

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования

«Витебский государственный технологический университет»

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Конспект лекций

**для студентов специальностей 1-36 01 01 «Технология машиностроения»,
1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства»,
1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки
материалов», 1-36 08 01 «Машины и аппараты легкой, текстильной
промышленности и бытового обслуживания», 1-53 01 01 «Автоматизация
технологических процессов и производств» высших учебных заведений**

**Витебск
2011**

УДК 620.22

ББК 30.3

П 99

Рецензент:

Савицкий В. В., к. т. н., доцент кафедры «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки» учреждения образования «Витебский государственный технологический университет»

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 1 от 24 февраля 2011 г.

П 99 Пятов, В.В. Материаловедение : конспект лекций / В. В. Пятов, С. В. Бровко. — Витебск : УО «ВГТУ», 2011. — 48 с.

ISBN 978–985–481–230–4

Конспект лекций содержит терминологический минимум по дисциплинам «Материаловедение», «Материаловедение и защита от коррозии», «Материаловедение и обработка материалов». Использование конспекта лекций облегчает понимание и ускоряет изучение соответствующего курса. Данный конспект лекций может оказаться полезным при чтении технической литературы.

УДК 620.22

ББК 30.3

ISBN 978–985–481–230–4

© Пятов В.В., 2011

© Бровко С.В., 2011

© УО «ВГТУ», 2011

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
История науки о материалах.....	4
Достижения и перспективы материаловедения.....	5
Проблемы, порождаемые материальной деятельностью людей.....	6
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ.....	7
Свойства материалов.....	7
Состояния материалов.....	8
Состав и структура материалов.....	9
Методы исследования материалов.....	10
Глава 2. ОСНОВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ.....	11
Кристаллизация металлов.....	11
Основы теории сплавов.....	12
Диаграммы состояния (ДС) двойных сплавов.....	13
Диаграмма железо-углерод (ДЖУ).....	14
Глава 3. МЕТОДЫ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ.....	15
Пластическая деформация металлов.....	15
Термическая обработка металлов.....	16
Термообработка стали.....	17
Химико-термическая обработка.....	18
Глава 4. ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ.....	19
Общая характеристика сталей.....	19
Углерод, примеси и легирующие элементы в сталях.....	20
Конструкционные стали.....	21
Инструментальные стали.....	22
Чугуны.....	23
Глава 5. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ.....	24
Медь.....	24
Никель.....	25
Алюминий.....	26
Магний.....	27
Титан.....	28
Бериллий.....	29
Тугоплавкие металлы.....	30
Благородные металлы.....	31
Глава 6. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	32
Органические материалы.....	32
Неорганические материалы.....	33
Твердые сплавы и сверхтвердые материалы.....	34
Пленкообразующие материалы.....	35
Жидкие и газообразные материалы.....	36
Глава 7. МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ.....	37
Композиционные материалы.....	37
Материалы с особыми триботехническими свойствами.....	38
Материалы с хорошими упругими свойствами.....	39
Материалы, устойчивые к воздействию среды.....	40
Материалы с особыми тепловыми свойствами.....	41
Нanomатериалы.....	42
Глава 8. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	43
Проводники.....	43
Диэлектрики.....	44
Полупроводники.....	45
Магнитные материалы.....	46
Рекомендуемая литература.....	47

ВВЕДЕНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ изучает связь между свойствами, составом и структурой материалов; при проектировании нового изделия конструктор по заданным эксплуатационным свойствам этого изделия сначала выбирает материал нужного состава, а затем указывает, какую он должен иметь структуру и как ее можно получить

- **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ** изучает общие закономерности строения материи, оно базируется на достижениях физики, химии и других фундаментальных наук
- **ПРИКЛАДНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ** исследует полезные структуры материалов и методы их получения, это научная основа для разработки новых технологий

История науки о материалах

ИСТОРИЯ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ тесно связана с историей развития общества

- **КАМЕННЫЙ ВЕК** начался с освоения первобытными людьми технологии обработки камня; историки называют этот прорыв первой технологической революцией
- **БРОНЗОВЫЙ ВЕК** наступил около 5000 лет назад, когда древние люди открыли оловянную бронзу; несколько ранее были освоены самородные золото и медь
- **ЖЕЛЕЗНЫЙ ВЕК** начался около 4000 лет назад с освоенияковки самородного железа; добывать его из руды и плавить люди научились значительно позже
- **АТОМНЫЙ ВЕК** наступил в 1908 году, когда британский физик Эрнест Резерфорд открыл процесс деления атома

РУССКАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ зародилась при Петре Первом, в начале 18 века; уральское железо «Старый соболь» считалось тогда лучшим в Европе

РУССКИЕ УЧЕНЫЕ-МЕТАЛЛОВЕДЫ

- **ЛОМОНОСОВ Михаил Васильевич (1711–1765)** издал первый в России учебник горнозаводского дела (о том, как добывать руду и получать из нее металл)
- **АНОСОВ Павел Петрович (1797–1851)** разработал научные основы литья легированной стали, первым применил микроскоп для исследования структуры стали, раскрыл утерянный в средние века секрет изготовления булата (труд «О булатах», 1841 год)
- **ЧЕРНОВ Дмитрий Константинович (1839–1921)** — основоположник металловедения: он открыл фазовые превращения стали и изучил влияние термообработки на ее структуру
- **КУРНАКОВ Николай Семенович (1860–1941)** основал отечественную школу физико-химического анализа сплавов, оказавшую огромное влияние на развитие металлургии
- **БАЙКОВ Александр Александрович (1870–1946)** создал теорию структурных превращений сплавов, открыл важную структурную составляющую стали — аустенит

ЗАРУБЕЖНЫЕ УЧЕНЫЕ-МЕТАЛЛОВЕДЫ

- **БЕССЕМЕР Генри (1813–1898, Англия)** запатентовал конвертер для передела жидкого чугуна в сталь продувкой воздухом без расхода горючего (бессемеровский процесс)
- **МАРТЕН Пьер (1824–1915, Франция)** разработал способ получения литой стали в регенеративных пламенных печах (мартеновский процесс)
- **ЛЕДЕБУР Адольф (1837–1906, Германия)** изучил и описал многие структуры железуглеродистых сплавов; одна из них (ледебурит) названа его именем

Достижения и перспективы материаловедения

НАНОТЕХНОЛОГИИ манипулируют частицами размером до 100 нанометров; возможность сборки материалов из объектов молекулярных размеров физическими методами появилась недавно и открыла удивительные перспективы

- **МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ДИЗАЙН** — изменение имеющихся и синтез новых молекул позволит создавать уникальные материалы по индивидуальным заказам

- **КРИСТАЛЛОГРАФИЯ** — изготовление высокопрочных материалов и материалов высокой проводимости с идеальной кристаллической решеткой
- **ЭЛЕКТРОНИКА** — конструирование элементной базы для компьютеров
- **МЕДИЦИНА** — создание микроскопических устройств для уничтожения вирусов и высокоточной доставки лекарств к больным органам, тонкий ремонт поврежденных тканей

СВЕРХЧИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ необходимы в квантовой электронике, полупроводниковой, космической и атомной технике; многие вещества после глубокой очистки проявляют неожиданные свойства: железо и цинк становятся стойкими к коррозии, а обычно хрупкие хром, титан, вольфрам и молибден приобретают высокую пластичность и способность прокатываться в фольгу

СОЗДАНИЕ СВЕРХПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ остается приоритетным направлением современного материаловедения; в XX веке прочность конструкционных материалов выросла в 10 раз; металлы уступили первенство волокнам и нитевидным монокристаллам, которыми армируют композиционные материалы; рекордной прочностью обладают некоторые углеродные наноструктуры (фуллерены, нанотрубки)

ПРОИЗВОДСТВО СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ, обладающих огромной стойкостью при трении и резании, традиционно характеризует техническую мощь страны; такие материалы чрезвычайно трудно обрабатывать; рекорд твердости по-прежнему принадлежит алмазу, но синтетические материалы уже конкурируют с ним

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, проектируемые по заданным свойствам, постепенно вытесняют металлы из многих высокотехнологичных областей

ПОЛУЧЕНИЕ ЛЕГКИХ И ПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ для авиации, космической техники и подводного судостроения чрезвычайно важно как для освоения околоземного пространства, так и при покорении океанских глубин; сплавы титана и алюминия постепенно вытесняются еще более легкими сплавами магния и лития

МАТЕРИАЛЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ «запоминают» две, а иногда и три формы, которые им придавали при разных температурах; после первоначального «обучения» они способны многократно изменять свою форму при изменении температуры; их используют в космической технике (для разворачивания антенн и солнечных батарей космических аппаратов), в медицине и других областях

ПРОИЗВОДСТВО МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

- **ЖАРОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ** нужны, прежде всего, в реактивных двигателях; резервы жаропрочности металлов уже исчерпаны; сейчас изучаются возможности использования керамики для изготовления жаропрочных деталей
- **КРИОГЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**, способные работать при очень низких температурах, все более востребованы современной техникой; они нужны при производстве и транспортировке сжиженных газов, для изготовления сверхпроводящих устройств

Проблемы, порождаемые материальной деятельностью людей

ЛОКАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ сказываются на экологии отдельных регионов, они сокращают продолжительность и снижают качество жизни местного населения; химическое производство, металлургические комбинаты, промышленные катастрофы...

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ связаны с истощением природных ресурсов и ухудшением экологии в масштабах всей планеты; с этими проблемами можно справиться лишь совместными усилиями всех промышленно-развитых стран

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ

- **ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ** — чистый воздух, пресная вода, естественная пища, древесина; скорость возобновления ресурсов может оказаться недостаточной
- **НЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ** — нефть, газ, уголь, металлы; запасы доступных углеводородов заканчиваются, а альтернативная энергетика все еще слаба: сегодня «чистая» энергия (энергия воды и атомная) составляет лишь 5%; будущее за атомной энергетикой; развитие экологически чистой водородной энергетики сдерживается энергоемкими и неэффективными традиционными методами получения водорода

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

- **ХИМИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ** — человеческая цивилизация, как и любая другая популяция организмов, может погибнуть в собственных отходах; особенно настораживает повышение кислотности окружающей среды
- **ГЛОБАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ** также могут быть весьма разрушительны; потепление климата, вызванное парниковым эффектом, возникающим из-за сжигания топлива в промышленных масштабах и выброса углекислого газа в атмосферу, вызывает таяние полярных льдов и повышение уровня мирового океана; уже сейчас многие прибрежные регионы находятся под угрозой катастрофы
- **УСИЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ФОНА** из-за технической деятельности человечества вызывает генные мутации людей и животных с непредсказуемыми последствиями
- **ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ** — радио, телевидение, беспроводная связь, электромагнитные поля различных электронных устройств; влияние на живую материю таких воздействий изучено недостаточно
- **ИСТОЩЕНИЕ ОЗОНОВОГО СЛОЯ**, частично спровоцированное нашей деятельностью, приводит к усилению губительного для жизни ультрафиолетового излучения; надо сокращать выбросы веществ, связывающих кислород (фреоны и др.)
- **ПРОБЛЕМЫ МИРОВОГО ОКЕАНА** — 97% воды находится в океанах, 70% кислорода планеты дает фитопланктон океана; третью часть углекислоты, продуцированной деятельностью человечества, поглощает океан; океан принимает загрязненные речные воды и возвращает их в виде чистых атмосферных осадков; океан загрязняется нефтепродуктами, затопленными токсичными отходами и боеприпасами с отравляющими веществами, затонувшими атомными подводными лодками
- **ПОТЕРЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСОВ**, являющихся «легкими» планеты, происходит главным образом из-за расширения сельскохозяйственной деятельности: более 800 тыс. км² новых сельскохозяйственных угодий появилось на месте тропических лесов в период с 1980 по 2000 год; такие масштабы вырубки отражаются на климате всей планеты
- **ЗАГРЯЗНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА** — сравнительно новая проблема; орбита земли уже сильно загрязнена в результате нашей космической деятельности

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ

Свойства материалов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА определяют возможность обработки материала различными методами (литьем, резанием, давлением, сваркой, термообработкой)

- **ЖИДКОТЕКУЧЕСТЬ** — способность металла качественно заполнять литейную форму
- **ЗАКАЛИВАЕМОСТЬ** — способность сплава увеличивать твердость при закалке
- **ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ** — способность сплава закаляться на определенную глубину

ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА определяют стойкость материала в агрессивных средах

- **КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ** — скорость потери массы при воздействии кислой среды
- **ЖАРОСТОЙКОСТЬ** или **ОКАЛИНОСТОЙКОСТЬ** — способность металла сопротивляться появлению окалины (окислов) при нагреве на воздухе

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА — плотность, температура плавления, радиационная стойкость; электрические, магнитные и оптические свойства...

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА определяют сопротивление материала нагрузкам

- **ПРОЧНОСТЬ** — способность материала противостоять разрушению
 - **СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ** — сопротивление материала медленно изменяющимся нагрузкам; критерий — временное сопротивление материала (разрушающее напряжение)
 - **ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ** — сопротивление материала ударным нагрузкам; критерий — ударная вязкость (удельная работа разрушения образца ударом)
 - **УДЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ** или **СВОБОДНАЯ ДЛИНА** — длина стержня постоянного сечения, при которой он разрывается под действием собственного веса; равна временному сопротивлению, деленному на удельный вес материала; измеряется в метрах
 - **ЖАРОПРОЧНОСТЬ** — способность материала сохранять прочность при нагреве
 - **КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ** — комплексная характеристика, учитывающая как свойства материала, так и условия эксплуатации изделия
- **ЖЕСТКОСТЬ** — способность материала противостоять упругим деформациям, определяется его модулем упругости; жесткость конструкции зависит не только от материала
- **УПРУГОСТЬ** — способность материала восстанавливать форму после снятия нагрузки
 - **ПРЕДЕЛ УПРУГОСТИ** — напряжение, после снятия которого остаточная деформация 0,002%
- **ТЕКУЧЕСТЬ** — способность материала деформироваться пластически
 - **ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ** — напряжение, после снятия которого остаточная деформация равна 0,2%
- **ТВЕРДОСТЬ** — способность материала противостоять внедрению какого-либо тела
- **НАДЕЖНОСТЬ** — способность материала противостоять хрупкому разрушению; критерии: пластичность, ударная вязкость, трещиностойкость и порог хладноломкости
- **ПОРОГ ХЛАДНОЛОМКОСТИ** — температура перехода от вязкого разрушения к хрупкому
- **ВЫНОСЛИВОСТЬ** — способность металла противостоять усталости
 - **УСТАЛОСТЬ** — изменение структуры и свойств металла под воздействием циклических нагрузок
 - **ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ** — напряжение, разрушающее материал за заданное число циклов
- **ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ** — сопротивление материала отрыву частиц с его поверхности; характеризует стойкость трущихся деталей или режущего инструмента

Состояния материалов

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ различаются потенциалом Гиббса $G = H - ST$, где H — энтальпия, S — энтропия, T — температура

- **РАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЕ** характеризуется минимальным потенциалом Гиббса, низкой прочностью и твердостью при высокой пластичности; получают его медленным охлаждением
- **НЕРАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЕ** характеризуется изменяющимся потенциалом Гиббса

- **МЕТАСТАБИЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ** характеризуется большим, но стабильным потенциалом Гиббса; прочность и твердость высокая, а пластичность — низкая; получают его быстрым охлаждением

АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ различаются прочностью межатомных связей

- **КОНДЕНСАТНОЕ СОСТОЯНИЕ** равновесно при очень низких температурах; почти неподвижные атомы образуют квантовый конденсат с необычными свойствами
- **ТВЕРДОЕ СОСТОЯНИЕ** равновесно ниже температуры плавления материала; прочность межатомных связей большая, поэтому твердое тело сохраняет как форму, так и объем
- **ЖИДКОЕ СОСТОЯНИЕ** равновесно от температуры плавления до температуры кипения материала; атомы связаны слабо, поэтому жидкость сохраняет только объем
- **ГАЗООБРАЗНОЕ СОСТОЯНИЕ** равновесно выше температуры кипения материала; атомы почти не связаны между собой, поэтому газ не сохраняет даже объем
- **ПЛАЗМА** равновесна при очень высоких температурах; это термически ионизированный газ

КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ характеризуется упорядоченным расположением атомов, образующих кристаллическую решетку; кристаллы имеют определенную температуру плавления, они анизотропны и могут обладать полиморфизмом

- **КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА** характеризует способ укладки атомов в кристалле
- **АНИЗОТРОПИЯ** — зависимость свойств (механических, магнитных, оптических) от направления
- **ПОЛИМОРФИЗМ** — способность изменять тип решетки при изменении внешних условий
- **ПАРАМЕТРЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ**
- **ПЕРИОД РЕШЕТКИ** — расстояние между ближайшими параллельными атомными плоскостями
- **КООРДИНАЦИОННОЕ ЧИСЛО** — число ближайших соседей атома в решетке
- **КОМПАКТНОСТЬ** — отношение объема атомов в элементарной ячейке к объему всей ячейки
- **ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЯЧЕЙКА** — наименьший объем решетки, дающий представление обо всем ее строении; у металлов обычно встречаются три типа ячеек: ОЦК, ГЦК и ГП
- **ОЦК** — объемноцентрированная кубическая ячейка; атомы в ней расположены по вершинам куба и один в его центре; координационное число 8, компактность 68%
- **ГЦК** — гранецентрированная кубическая ячейка; атомы в ней расположены по вершинам куба и в центре каждой его грани; координационное число 12, компактность 74%
- **ГП** — гексагональная плотноупакованная ячейка; коорд. число 12, компактность 74%
- **ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ** уменьшают прочность реальных кристаллов
- **ТОЧЕЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ** — вакансии и межузельные атомы
- **ЛИНЕЙНЫЕ ДЕФЕКТЫ** — дислокации (краевые и винтовые)
- **ПОВЕРХНОСТНЫЕ ДЕФЕКТЫ** — границы между зернами и фазами
- **ОБЪЕМНЫЕ ДЕФЕКТЫ** — поры, трещины и посторонние включения

АМОРФНОЕ СОСТОЯНИЕ характеризуется почти хаотическим расположением атомов, отсутствием кристаллической решетки и определенной температуры плавления; аморфно большинство жидкостей и некоторые твердые тела (стекла, смолы)

- **АМОРФНЫЕ МЕТАЛЛЫ** получают очень быстрым охлаждением расплава: они износостойки, коррозионностойки, жаростойки и метастабильны; выпускают аморфные металлические гранулы, ленту, фольгу и микропроволоку

Состав и структура материалов

МАТЕРИЯ существует в виде дискретной (вещество) и непрерывной (поле) форм; наличие состава и структуры у материалов является следствием дискретности вещества, состоящего из связанных между собой частиц различной природы

- **АТОМЫ** состоят из ядра и электронов; число протонов в ядре определяет принадлежность атома к какому-либо химическому элементу, а число нейтронов определяет изотоп атома; если число протонов и электронов не совпадает, то атом называют ионом
- **МОЛЕКУЛЫ** химических элементов состоят из одинаковых атомов, а молекулы химиче-

ских соединений — из разных, называемых компонентами соединения

- **КРИСТАЛЛЫ** состоят из атомов или молекул; кристаллы химических элементов состоят из одинаковых атомов, а кристаллы твердых растворов — из разных, называемых компонентами раствора; жидкие кристаллы состоят из молекул
- **ФАЗЫ** — однородные области в неоднородных материалах; фаза может быть газообразная (поры), жидкая или твердая (аморфная и кристаллическая); кристаллическая фаза — колония одинаковых по составу и свойствам кристаллов твердого раствора, химического элемента или химического соединения

СОСТАВ МАТЕРИАЛА — химический и фазовый

- **ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ** определяется содержанием в материале различных атомов (атомарный состав) и молекул (молекулярный состав)
- **ФАЗОВЫЙ СОСТАВ** определяется содержанием в материале различных фаз, он зависит от химического состава, внешних условий и технологических воздействий на материал; изменяется в процессе различных фазовых превращений, происходящих в материале
- **ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ** вызываются стремлением материала сохранять равновесное состояние при изменении внешних условий (температуры, давления); они осуществляются за счет диффузии (медленно) или посредством фазовых переходов (быстро)
- **ДИФфуЗИЯ** — хаотическое тепловое перемещение атомов различных химических элементов внутри материала, стремящихся равномерно распределиться по всему его объему
- **ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД** — бездиффузионное превращение неравновесной фазы в равновесную; переход первого рода сопровождается тепловым эффектом (плавление и кристаллизация, испарение и конденсация, сублимация и конденсация в твердую фазу); переход второго рода тепловым эффектом не сопровождается (парамагнетик-ферромагнетик, проводник-сверхпроводник)

СТРУКТУРА МАТЕРИАЛА определяется взаимным расположением образующих его частиц и типом связей между ними

- **СТРУКТУРА ТВЕРДОГО РАСТВОРА** определяется взаимным расположением атомов
- **РАСТВОР ВНЕДРЕНИЯ** — атомы растворенного компонента находятся между узлами кристаллической решетки компонента-растворителя
- **РАСТВОР ЗАМЕЩЕНИЯ** — атомы растворенного компонента находятся в некоторых узлах решетки компонента-растворителя
- **РАСТВОР ВЫЧИТАНИЯ** — в кристаллической решетке есть узлы, не занятые атомами
- **СТРУКТУРА КРИСТАЛЛОВ** во многом зависит от типа связей между узлами решетки
- **МОЛЕКУЛЯРНЫЕ КРИСТАЛЛЫ** связаны относительно слабыми силами Ван-дер-Ваальса
- **ИОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ** — атомы попарно перераспределяют свои валентные электроны
- **КОВАЛЕНТНЫЕ КРИСТАЛЛЫ** — атомы попарно обобщают свои валентные электроны
- **МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛЫ** — атомы обобщают свои валентные электроны, которые образуют электронный газ; возникает электрическая связь между положительно заряженными ионами, находящимися в узлах решетки, и электронным газом

Методы исследования материалов

ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ — определение химического состава материала

- **КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ** определяет, из каких атомов и молекул состоит материал
- **КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ** определяет содержание различных атомов и молекул в материале

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ — исследование структуры металла

- **МАКРОАНАЛИЗ** — исследование структуры с помощью лупы; позволяет определить размер и форму зерен металла, дефекты литья и сварки
- **МИКРОАНАЛИЗ** — изучение структуры с помощью микроскопа; позволяет определить размер, форму и характер взаимного расположения фаз; проводят на микрошлифе
- **МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП** — оптический микроскоп, работающий в отраженном свете; разрешение до 200 нм, оно ограничено волновой природой света

- **РАСТРОВЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП** сканирует электронным лучом поверхность образца, луч отражается от нее и создает изображение на экране; разрешение до 1 нм
- **ПРОСВЕЧИВАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП** просвечивает тонкую (около 100 нм) фольгу электронным лучом; разрешение до 0,2 нм; фольгу не всегда возможно изготовить

ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ заключается в исследовании изломов металла

- **ВЯЗКИЙ ИЗЛОМ** волокнистый, матовый; ему предшествует пластическая деформация
- **ХРУПКИЙ ИЗЛОМ** кристаллический, блестящий; развивается внезапно, часто на морозе
- **СМЕШАННЫЙ ИЗЛОМ** имеет зону как вязкого, так и хрупкого разрушения
- **УСТАЛОСТНЫЙ ИЗЛОМ** вызывается циклическими нагрузками; развивается трещина

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

- **РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ** основан на дифракции рентгеновских лучей в кристалле; позволяет определить тип и основные параметры решетки, плотность дефектов
- **ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ** заключается в построении кривой охлаждения, по которой затем определяют температуры фазовых переходов первого рода
- **КРИВАЯ ОХЛАЖДЕНИЯ** — зависимость температуры от времени при охлаждении образца
- **ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ** заключается в построении дилатометрической кривой, по которой затем определяют температуры фазовых переходов первого и второго рода
- **ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКАЯ КРИВАЯ** — зависимость длины образца от его температуры

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ на прочность, твердость, надежность, долговечность

- **ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ** заключается в построении кривой растяжения, по которой определяют пределы упругости и текучести, временное сопротивление
- **КРИВАЯ РАСТЯЖЕНИЯ** — зависимости деформации образца от напряжения в нем
- **ИСПЫТАНИЕ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ** — образец разрушают ударом маятникового копра и определяют работу разрушения, по которой судят о надежности материала
- **ИСПЫТАНИЕ НА УСТАЛОСТЬ** заключается в построении кривой усталости, по которой затем определяют предел выносливости материала
- **ИСПЫТАНИЕ НА ТВЕРДОСТЬ** статические методы измерения твердости основаны на вдавливании индентора в образец и измерении размеров полученного отпечатка
- **НВ** — твердость по Бринеллю; индентор — стальной закаленный шарик; для мягких металлов
- **HRC** — твердость по Роквеллу, шкала С: индентор — алмазный конус; для закаленных сталей
- **HV** — твердость по Виккерсу; индентор — алмазная пирамида; наиболее универсальный метод

Глава 2. ОСНОВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

МЕТАЛЛ — поликристаллический материал, состоящий из прочно связанных между собой мелких кристаллов (зерен); металлы из-за наличия в них электронного газа имеют ряд общих свойств: высокую тепло- и электропроводность, хорошую пластичность и отражающую способность, склонность к электронной эмиссии

Кристаллизация металлов

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ — фазовый переход I рода, протекает с выделением тепла

- **ПЕРВИЧНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ** — выпадение кристаллов из жидкости или газа; кристаллизация жидкости начинается при охлаждении металла ниже температуры плавления, когда термодинамический потенциал твердой фазы становится меньше, чем жидкой
- **ВТОРИЧНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ** — выпадение мелких вторичных кристаллов из крупных первичных при дальнейшем охлаждении металла; происходит это из-за переменной растворимости компонентов в твердых растворах
- **ПЕРЕМЕННАЯ РАСТВОРИМОСТЬ** — зависимость взаимной растворимости компонентов от температуры; излишки растворенного компонента при охлаждении диффундируют на поверхность первичных кристаллов, где образуют колонии вторичных кристаллов (вторичные фазы)

ЗЕРНО — размер и форма зерен сильно влияют на свойства литого металла

- **РАЗМЕР ЗЕРЕН** зависит от скорости образования зародышей, скорости их роста и наличия модификаторов в расплаве; чем меньше зерно, тем качественнее металл
- **ФОРМА ЗЕРЕН** зависит от направления отвода тепла в литейной форме; при направленном теплоотводе вырастают вытянутые зерна и образуется текстура
- **ТЕКСТУРА** — ориентация зерен в определенном направлении или плоскости
- **РОСТ ЗЕРНА** происходит по дендритной схеме; сначала в жидкости прорастают оси первого порядка, затем от них ответвляются оси второго порядка...; участки между осями кристаллизуются последними, поэтому они насыщены тугоплавкими включениями

СТРУКТУРА СЛИТКА зависит от технологии литья и может состоять из трех зон

- зоны мелких зерен у его поверхности
- зоны столбчатых (вытянутых от стенок литейной формы) кристаллов
- зоны крупных равноосных зерен в глубине слитка

ДЕФЕКТЫ СЛИТКА — усадочная раковина, ликвация, текстура

- **УСАДОЧНАЯ РАКОВИНА** образуется в верхней части слитка, которая затвердевает в последнюю очередь; под ней металл рыхлый, пористый; эту часть отливки отрезают
- **ЛИКВАЦИЯ** — химическая или структурная неоднородность металла, возникающая из-за ускоренного охлаждения слитка; различают микро- и макроликвацию
- **МИКРОЛИКВАЦИЯ** — химическая неоднородность отдельных зерен
- **МАКРОЛИКВАЦИЯ** — неоднородность всего слитка

ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ осуществляют в пересыщенной среде (пар, раствор, расплав) из одного центра кристаллизации

- **МЕТОД БРИДЖМЕНА** заключается в вытягивании тигля с расплавом из печи со скоростью кристаллизации металла; монокристалл растет из одного центра
- **МЕТОД ЧОХРАЛЬСКОГО** основан на использовании затравки, вырезанной из монокристалла; затравку медленно вытягивают из расплава и металл наследует ее структуру

Основы теории сплавов

СПЛАВ — металлический материал, полученный кристаллизацией жидкого раствора; химические элементы, образующие сплав, называют компонентами

КЛАССИФИКАЦИЯ СПЛАВОВ

- ПО КОЛИЧЕСТВУ КОМПОНЕНТОВ — двойные сплавы, тройные сплавы ...
- ПО КОЛИЧЕСТВУ ФАЗ — гомогенные и гетерогенные сплавы
 - ГОМОГЕННЫЕ СПЛАВЫ — однофазные сплавы, состоящие из одинаковых по составу зерен
- ПО ВЗАИМНОЙ РАСТВОРИМОСТИ КОМПОНЕНТОВ
 - СПЛАВЫ С НЕОГРАНИЧЕННОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ КОМПОНЕНТОВ — гомогенные сплавы, компоненты которых образуют твердые растворы любых концентраций: Au-Ag-Cu, W-Mo
 - СПЛАВЫ С ОГРАНИЧЕННОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ КОМПОНЕНТОВ — компоненты таких сплавов не способны образовать твердые растворы некоторых концентраций: Fe-C, Fe-Ni, Cu-Zn
- ПО НАЛИЧИЮ ИЛИ ОТСУТСТВИЮ ПОЛИМОРФНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ У КОМПОНЕНТОВ
 - СПЛАВЫ С ПОЛИМОРФНЫМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ также претерпевают аналогичное полиморфное превращение в некотором интервале концентраций
- ПО НАЛИЧИЮ ИЛИ ОТСУТСТВИЮ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
 - ПЕРИТЕКТИЧЕСКОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ — совместная кристаллизация твердой и жидкой фазы; в результате образуется новая твердая фаза, отличная от участвовавшей в превращении
 - ЭВТЕКТИЧЕСКОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ — образование эвтектики из жидкой фазы; эвтектика — хрупкая смесь твердых фаз постоянного состава, кристаллизующихся одновременно
 - МОНОТЕКТИЧЕСКОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ — распад жидкой фазы на твердую и жидкую
 - ПЕРИТЕКТОИДНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ — образование твердого раствора из двух твердых фаз
 - ЭВТЕКТОИДНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ — образование эвтектоида из твердой фазы; эвтектоид — мелкодисперсная смесь нескольких фаз постоянного состава, образующихся одновременно
- ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ сплавы делят на литейные и деформируемые
 - ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ хорошо текут, так как содержат в структуре легкоплавкую эвтектику
 - ДЕФОРМИРУЕМЫЕ СПЛАВЫ относительно пластичны, так как не содержат хрупкой эвтектики

ФАЗЫ В СПЛАВАХ могут быть газообразные, жидкие и твердые; твердые фазы могут быть кристаллические и аморфные, равновесные и метастабильные

- КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ФАЗЫ — колонии одинаковых по составу кристаллов
 - КРИСТАЛЛЫ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ состоят из одинаковых атомов
 - КРИСТАЛЛЫ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ состоят из разных атомов, сохраняют решетку растворителя
 - КРИСТАЛЛЫ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ФАЗ состоят из разных атомов, образующих новую решетку
 - КРИСТАЛЛЫ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ образуются в результате реакции компонентов

ПРАВИЛО ФАЗ ГИББСА применяют при анализе процесса формирования структуры сплавов; $C = K - \Phi + 1$, где C — число степеней свободы термодинамической системы, K — количество компонентов в сплаве, Φ — число одновременно сосуществующих фаз; для двойных ($K=2$) систем возможны три варианта

- $C=0$ ($\Phi=3$) — в системе протекает изотермическое превращение, сопровождающееся тепловыделением; температура сплава остается постоянной до завершения превращения
- $C=1$ ($\Phi=2$) — в сплаве протекают фазовые превращения, сопровождающиеся выделением тепла; сплав медленно остывает
- $C=2$ ($\Phi=1$) — однофазный сплав остывает с максимально возможной скоростью; фазовых превращений и тепловыделения нет

Диаграммы состояния (ДС) двойных сплавов

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ — графическое изображение равновесных фазовых состояний сплавов двойной системы компонентов А — В; горизонтальная ось — концентрация компонентов, вертикальные оси (для удобства их две) — температура

- ЛИНИИ НА ДИАГРАММЕ соответствуют фазовым превращениям, они разбивают диаграмму на области, внутри которых структура сплавов неизменна
- ЛИНИЯ ЛИКВИДУС соответствует началу кристаллизации, выше нее находится жидкая фаза

- **ЛИНИЯ СОЛИДУС** соответствует окончанию кристаллизации, ниже нее жидкой фазы нет
- **МЕЖДУ ЛИНИЯМИ ЛИКВИДУС И СОЛИДУС** одновременно сосуществуют жидкая и твердая фазы: сплавы (за исключением эвтектических) кристаллизуются в интервале температур
- **ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ЛИНИИ** соответствуют изотермическим фазовым превращениям
- **ЛИНИИ ПЕРЕМЕННОЙ РАСТВОРИМОСТИ** показывают предельную концентрацию компонентов в твердых растворах; на этих линиях при охлаждении образуются кристаллы вторичных фаз

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ПОЗВОЛЯЕТ

- представить полную картину формирования равновесной структуры любого сплава
- определить температуры начала и завершения кристаллизации разных сплавов
- определить оптимальную температуру заливки сплава и оценить его жидкотекучесть
- сделать заключение о возможности и условиях обработки сплава давлением
- определить оптимальный режим термической обработки сплава

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ

- **ДС С НЕОГРАНИЧЕННОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ КОМПОНЕНТОВ** состоит всего из двух линий (ликвидус и солидус), разбивающих ее на три области:
 - выше линии ликвидус находится однофазная область с жидким раствором ($C=2, \Phi=1$)
 - ниже линии солидус находится однофазная область с твердым раствором ($C=2, \Phi=1$)
 - между линиями сосуществуют жидкая и твердая фазы ($C=1, \Phi=2$); охлаждение сплава в этой области сопровождается изменением количественного соотношения и состава этих фаз
- **ДС С ОГРАНИЧЕННОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ КОМПОНЕНТОВ** содержит области, в которых компоненты образуют гомогенные твердые растворы и области, где это невозможно; в последнем случае при охлаждении протекают изотермические превращения (перитектическое или эвтектическое), приводящие к образованию гетерогенных структур
- **ДС С ЭВТЕКТИЧЕСКИМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ** содержит доэвтектические, эвтектический и заэвтектические сплавы; структура эвтектического сплава полностью состоит из легкоплавкой и хрупкой эвтектики
- **ДС С ПОЛИМОРФНЫМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ** — полиморфное превращение компонентов вызывает полиморфное превращение некоторых сплавов; в таких сплавах закалкой можно получить полезные метастабильные структуры
- **ДС С ЭВТЕКТОИДНЫМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ** содержит доэвтектоидные, эвтектоидный (структура которого полностью состоит из эвтектоида) и заэвтектоидные сплавы

АНАЛИЗ ДС основан на применении правила фаз Гиббса и еще двух правил:

- **ПРАВИЛО КОНЦЕНТРАЦИЙ** позволяет определить химический состав различных фаз в двухфазных областях при разных температурах
- **ПРАВИЛО ОТРЕЗКОВ** позволяет определить количественное соотношение различных фаз в двухфазных областях диаграммы при разных температурах

Диаграмма железо-углерод (ДЖУ)

КОМПОНЕНТЫ НА ДИАГРАММЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

- **ЖЕЛЕЗО** плавится при 1539°C , это непрочный (250 МПа), пластичный (50%) и мягкий (80 НВ) металл; железо полиморфно: различают его альфа и гамма модификации
- **АЛЬФА-ЖЕЛЕЗО** имеет ОЦК решетку и существует при температурах ниже 911°C и выше 1392°C ; плотность его при нормальных условиях около 7680 кг/м^3
- **ГАММА-ЖЕЛЕЗО** имеет ГЦК решетку и существует при температурах $911\text{--}1392^{\circ}\text{C}$; оно плотнее
- **УГЛЕРОД** в природе встречается в виде двух модификаций
- **ГРАФИТ** — стабильная при нормальных условиях модификация углерода с гексагональной решеткой; мягок, электропроводен, химически стоек, сгорает на воздухе при 700°C
- **АЛМАЗ** — метастабильная при нормальных условиях модификация углерода; тверд, хрупок, химически стоек, очень теплопроводен, сгорает на воздухе при 870°C

ФАЗЫ НА ДЖУ — жидкий раствор, твердые растворы (феррит и аустенит), химиче-

ское соединение (цементит) и химический элемент (углерод в форме графита)

- **ФЕРРИТ** — раствор внедрения углерода в альфа-железе; низкотемпературный феррит содержит до 0,02% С; пластичный, непрочный и мягкий материал
- **АУСТЕНИТ** — раствор внедрения углерода в гамма-железе; прочнее, плотнее и тверже феррита
- **ЦЕМЕНТИТ** — карбид железа Fe_3C ; содержит 6,67% углерода; тверд, хрупок, метастабилен

СТРУКТУРНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ на ДЖУ — феррит, аустенит, цементит (первичный, вторичный и третичный), графит, перлит (пластинчатый и зернистый) и ледебурит

- **ЦЕМЕНТИТ ПЕРВИЧНЫЙ** — крупные кристаллы, выпадающие из жидкости в чугунах
- **ЦЕМЕНТИТ ВТОРИЧНЫЙ** — мелкие кристаллы, выпадающие из аустенита при охлаждении
- **ЦЕМЕНТИТ ТРЕТИЧНЫЙ** очень мелкие кристаллы, выпадающие из феррита при охлаждении
- **ПЕРЛИТ** — эвтектоидная смесь феррита и цементита, содержащая 0,8% углерода; пластинчатый перлит состоит из чередующихся пластин феррита и цементита; зернистый перлит содержит округлые частицы цементита, его получают сфероидизирующим отжигом, он лучше режется
- **ЛЕДЕБУРИТ** — эвтектика, содержащая 4,3% углерода; тверд, хрупок, легкоплавок; высокотемпературный ледебурит (смесь аустенита и цементита) существует при температурах (727–1147)°С; низкотемпературный ледебурит (смесь перлита и цементита) существует ниже 727°С

ВАЖНЫЕ ЛИНИИ НА ДИАГРАММЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

- **ABCD** — ликвидус: начало кристаллизации; **АНIECF** — солидус: окончание кристаллизации
- **CD, SE и PQ** — начало выпадения кристаллов первичного, вторичного и третичного цементита
- **PSK** — эвтектоидное превращение аустенита в перлит (температура A_1 , 727°С)
- **MO** — магнитное превращение (точка Кюри) некоторых сталей (температура A_2 , 768°С)
- **GS и NI** — нижняя и верхняя границы аустенитной области (температуры A_3 и A_4)
- **HB** — перитектическое превращение: образование аустенита из феррита и жидкости, 1499°С
- **EF** — эвтектическое превращение жидкой фазы в высокотемпературный ледебурит, 1147°С

СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ — техническое железо, сталь и чугун

- **ТЕХНИЧЕСКОЕ ЖЕЛЕЗО** содержит до 0,02 % С; это непрочный и пластичный материал
- **СТАЛЬ** — сплав железа с углеродом, содержащий (0,02–2,14) % С
- **ДОЭВТЕКТОИДНАЯ СТАЛЬ** содержит до 0,8% С (феррит с перлитом); конструкционный материал
- **ЭВТЕКТОИДНАЯ СТАЛЬ** содержит 0,8% С (перлит), инструмент невысокой теплостойкости
- **ЗАЭВТЕКТОИДНАЯ СТАЛЬ** содержит более 0,8% С; это инструментальный материал
- **ЧУГУН** содержит 2,14–6,67 % С; доэвтектический, эвтектический и заэвтектический

Глава 3. МЕТОДЫ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ

Пластическая деформация металлов

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛА бывает горячая и холодная

ГОРЯЧАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ($T > 0,6T_{пл}$) используется для изменения формы заготовки; структуру металла она изменяет незначительно

ХОЛОДНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ($T < 0,3T_{пл}$) изменяет форму и структуру металла

- СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ проявляются в формировании текстуры деформации; металл запасает часть энергии деформирования и переходит в метастабильное состояние
- ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ связано с появлением наклепа: предел текучести, прочность, твердость и электрическое сопротивление металла возрастают, а его плотность, коррозионная стойкость, пластичность и ударная вязкость — уменьшаются
- НАКЛЕП — упрочнение металла в процессе холодной пластической деформации
- ДЕФОРМАЦИОННЫЙ НАКЛЕП вызывается внешними воздействиями
- ФАЗОВЫЙ НАКЛЕП связан с внутренними превращениями
- ОБЪЕМНЫЙ НАКЛЕП увеличивает прочность металла (ковка, прокатка, волочение)
- ПОВЕРХНОСТНЫЙ НАКЛЕП увеличивает износостойкость металла (дробеструйная обработка)

НАГРЕВ НАКЛЕПАННОГО МЕТАЛЛА возвращает его к равновесному состоянию

- ВОЗВРАТ — частичное восстановление кристаллической структуры металла при относительно небольшом нагреве; первая стадия возврата — отдых, вторая — полигонизация
- РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ — зарождение и рост новых равновесных зерен при нагреве наклепанного металла выше температуры рекристаллизации (примерно $0,4 T_{пл}$)
- ПЕРВИЧНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ полностью снимает наклеп и устраняет текстуру
- СОБИРАТЕЛЬНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ наблюдается при дальнейшем увеличении температуры и сопровождается ростом зерен, образовавшихся при первичной рекристаллизации
- ВТОРИЧНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ — аномальный рост отдельных зерен за счет соседей; это нежелательное явление наблюдается при чрезмерном нагреве и слишком длительной выдержке

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ПОСЛЕ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

- РАЗМЕР РЕКРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ ЗЕРЕН уменьшается с ростом степени деформации и увеличивается с ростом температуры нагрева
- ПЛАСТИЧНОСТЬ И ВЯЗКОСТЬ МЕТАЛЛА увеличивается с уменьшением размеров зерна; металлы с очень мелким ($0,5–10$ мкм) зерном иногда обладают сверхпластичностью
- ТЕКСТУРА РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ возникает сравнительно редко; иногда ее получают специально, когда требуется улучшить свойства в определенном направлении изделия; в листах трансформаторной стали текстура уменьшает потери на перемагничивание

КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ основаны на совмещении пластической деформации и термической обработки металла

- ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА — горячая пластическая деформация металла, совмещенная с закалкой; позволяет увеличить надежность хрупких высокопрочных сталей
- МЕХАНОТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА — отжиг с последующей деформацией металла
- ПАТЕНТИРОВАНИЕ — отжиг стали на троостит с последующим холодным волочением; высокоуглеродистая пружинная (канатная) проволока упрочняется таким образом до 5000 МПа!

Термическая обработка металлов

ТЕРМООБРАБОТКА — технологический процесс, заключающийся в тепловом воздействии на металл с целью изменения его структуры и свойств; термической обработке подвергают отливки, полуфабрикаты, сварные соединения, детали машин, инструменты; основные виды термообработки — отжиг, закалка, отпуск и старение

ОТЖИГ — нагрев, выдержка и медленное охлаждение металла; приближает структуру к равновесной: уменьшает твердость и прочность, увеличивает пластичность и вязкость, снимает внутренние напряжения

- **ОТЖИГ ПЕРВОГО РОДА** не связан с фазовыми превращениями
 - **ДИФфуЗИОННЫЙ ОТЖИГ** — длительная выдержка металла при высокой температуре для устранения ликвации; слитки легированных сталей, многих алюминиевых сплавов
 - **РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЙ ОТЖИГ** заключается в нагреве деформированного металла выше температуры рекристаллизации; устраняет наклеп и текстуру после холодной деформации
 - **ОТЖИГ ДЛЯ СНЯТИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ** требует относительно невысокого нагрева
- **ОТЖИГ ВТОРОГО РОДА** основан на фазовых превращениях
 - **ПОЛНЫЙ ОТЖИГ** заключается в полной гомогенизации сплава перед охлаждением
 - **НЕПОЛНЫЙ ОТЖИГ** отличается неполной гомогенизацией, сплав нагревают слабее

ЗАКАЛКА — нагрев и быстрое охлаждение сплава; дает твердую и прочную метастабильную структуру

- **ПОЛНАЯ ЗАКАЛКА** заключается в полной гомогенизации сплава перед охлаждением
- **НЕПОЛНАЯ ЗАКАЛКА** отличается неполной гомогенизацией, сплав нагревают слабее
- **ЗАКАЛКА БЕЗ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ** фиксирует высокотемпературную структуру сплава, которая при быстром охлаждении не успевает перейти в равновесное состояние и становится метастабильной (пересыщенный твердый раствор); упрочнение в этом случае происходит при последующем старении сплава
- **ЗАКАЛКА С МАРТЕНСИТНЫМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ** приводит к получению твердого, прочного и хрупкого метастабильного мартенсита
- **ОБЪЕМНАЯ ЗАКАЛКА** заключается в нагреве всей детали; применяют для упрочнения
- **ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА** увеличивает твердость, износостойкость и предел выносливости металла; остающаяся сырой и вязкой сердцевина изделия хорошо сопротивляется ударным нагрузкам; применяют индукционный или лазерный нагрев поверхности

ОТПУСК И СТАРЕНИЕ — нагрев закаленного сплава для приближения к равновесному состоянию; пересыщенный твердый раствор, полученный при закалке, частично распадается, что позволяет получить нужное сочетание механических свойств

- **ОТПУСК** — нагрев закаленного сплава ниже температуры фазовых превращений; стабилизирует структуру, уменьшает хрупкость и твердость металла; термин «отпуск» используют для сплавов с полиморфным превращением
- **СТАРЕНИЕ** — распад пересыщенного твердого раствора, часто сопровождающийся увеличением прочности и твердости; искусственное (с нагревом) и естественное старение

АТМОСФЕРА — газовая среда, в которой проводят термообработку

- **НЕЙТРАЛЬНАЯ АТМОСФЕРА** защищает металл от окисления (азот, инертные газы, вакуум)
- **ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ АТМОСФЕРА** восстанавливает оксиды (водород, диссоциированный NH_3)

Термообработка стали

ПРЕВРАЩЕНИЯ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО АУСТЕНИТА — основа термообработки стали

- **ПЕРЛИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ** — диффузионное превращение аустенита в ферритно-цементитные смеси (перлит, сорбит и троостит); протекает при отжиге стали

- **БЕЙНИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ** — промежуточное превращение аустенита в бейнит; бейнит — смесь пересыщенного углеродом феррита и цементита; различают верхний и нижний бейнит; твердый и прочный нижний бейнит образуется при температурах ниже 400 °С
- **МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ** — бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит; протекает при быстром охлаждении (закалке) стали; мартенсит — сильно пересыщенный углеродом феррит: тверд, прочен, хрупок, метастабилен

ВИДЫ ТЕРМООБРАБОТКИ СТАЛЕЙ — отжиг, нормализация, закалка и отпуск

ОТЖИГ СТАЛИ бывает первого и второго рода

- **ОТЖИГ ПЕРВОГО РОДА** не связан с фазовыми превращениями
- **ДИФфуЗИОННЫЙ ОТЖИГ** — нагрев свыше 1000 °С и длительная выдержка; устраняет ликвацию
- **РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЙ ОТЖИГ** — нагрев до 680–740 °С; устраняет наклеп и текстуру
- **НИЗКИЙ ОТЖИГ** — относительно небольшой нагрев для снятия остаточных напряжений
- **ОТЖИГ ВТОРОГО РОДА** основан на фазовых превращениях
- **ПОЛНЫЙ ОТЖИГ** заключается в полной аустенизации стали перед охлаждением
- **НЕПОЛНЫЙ ОТЖИГ** заключается в неполной аустенизации (сталь нагревают слабее)
- **ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ** предусматривает изотермическую выдержку стали при ее охлаждении; сокращает время отжига легированных сталей, требующих очень медленного охлаждения

НОРМАЛИЗАЦИЯ отличается от отжига тем, что сталь охлаждают на воздухе (а не в печи); устраняет крупное зерно и цементитную сетку в заэвтектоидных сталях

ЗАКАЛКА СТАЛИ протекает при ее быстром охлаждении; закалку классифицируют:

- **ПО СТЕПЕНИ АУСТЕНИЗАЦИИ ПРИ НАГРЕВЕ**
- **ПОЛНАЯ ЗАКАЛКА** заключается в полной аустенизации стали перед охлаждением
- **НЕПОЛНАЯ ЗАКАЛКА** заключается в частичной аустенизации стали (нагревают слабее); дает большую твердость, применяют для инструментальных сталей
- **ПО СПОСОБУ ОХЛАЖДЕНИЯ**
- **НЕПРЕРЫВНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ** приводит к большим остаточным напряжениям и короблению
- **ЗАКАЛКА В ДВУХ СРЕДАХ** (через воду в масло) позволяет уменьшить закалочные напряжения
- **СТУПЕНЧАТАЯ ЗАКАЛКА** — короткая остановка при охлаждении стали уменьшает напряжения
- **ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ЗАКАЛКА** основана на превращении аустенита в нижний бейнит
- **ЗАКАЛКА В ЗАНЕВОЛЕННОМ СОСТОЯНИИ** заключается в охлаждении плоской детали между массивными медными пластинами (для уменьшения коробления); скорость охлаждения мала
- **ГЛУБОКОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ** жидким азотом избавляет сталь от остаточного аустенита

ЗАКАЛОЧНЫЕ СРЕДЫ обеспечивают необходимую скорость охлаждения

- **ВОДА** применяется для углеродистых сталей, она дает большие закалочные напряжения
- **МАСЛО** применяют для легированных сталей, не требующих очень быстрого охлаждения
- **ВОЗДУХ** применяется для закалки некоторых высоколегированных (самокалящихся) сталей

ОТПУСК СТАЛИ повышает ее надежность, но уменьшает твердость

- **НИЗКИЙ** (150–250) °С, твердость HRC 58–63; для инструментальных и подшипниковых сталей
- **СРЕДНИЙ** (350–500) °С; твердость HRC 40–50; для рессорно-пружинных сталей
- **ВЫСОКИЙ** (500–700) °С; твердость HRC 25–30; закалка с высоким отпуском — улучшение

Химико-термическая обработка

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА заключается в диффузионном насыщении поверхности металла различными элементами, улучшающими ее свойства

ДИФфуЗИОННОЕ НАСЫЩЕНИЕ МЕТАЛЛОВ НЕМЕТАЛЛАМИ

- **ЦЕМЕНТАЦИЯ** — насыщение углеродом — увеличивает твердость и износостойкость ме-

тала; после цементации назначают закалку и низкий отпуск, затем деталь шлифуют

- **КАРБЮРИЗАТОР** — среда, из которой насыщают углеродом: древесный уголь, метан, керосин
- **АЗОТИРОВАНИЕ** увеличивает износостойкость и выносливость металла; азотируют стали, чугуны, титан, бериллий, вольфрам, ниобиевые сплавы; для насыщения азотом используют аммиак; сталь закаляют до азотирования, а шлифуют и полируют — после
- **НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ, ЦИАНИРОВАНИЕ и КАРБОНИТРАЦИЯ** — совместное насыщение металла углеродом и азотом часто оказывается эффективнее отдельных процессов; цианистые соли токсичны, а цианаты и карбонаты — нет
- **БОРИРОВАНИЕ** повышает коррозионную стойкость, жаростойкость и износостойкость; износостойкость стали после борирования выше, чем после цементации
- **СИЛИЦИРОВАНИЕ** — насыщение кремнием повышает коррозионную стойкость, жаростойкость и износостойкость стали, уменьшает трение

ДИФфуЗИОННАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

- **АЛИТИРОВАНИЕ и ХРОМИРОВАНИЕ** повышают коррозионную стойкость и жаростойкость сталей; используются защитные свойства оксидных пленок алюминия и хрома
- **ТИТАНИРОВАНИЕ и ЦИНКОВАНИЕ** также повышают коррозионную стойкость стали

СОВМЕСТНОЕ НАСЫЩЕНИЕ МЕТАЛЛАМИ И НЕМЕТАЛЛАМИ

- **КАРБОХРОМИРОВАНИЕ** — последовательное насыщение поверхности углеродом и хромом; повышает твердость, жаропрочность и коррозионную стойкость стали
- **ХРОМОСИЛИЦИРОВАНИЕ** — совместное насыщение поверхности хромом и кремнием; жаростойкость и кислотостойкость лучше, чем после хромирования
- **ХРОМОАЛИТИРОВАНИЕ** — насыщение поверхности хромом и алюминием; позволяет повысить жаростойкость стали до 900 °С и получить высокую эрозионную стойкость

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

- **НАСЫЩЕНИЕ В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ** — детали засыпают активированным порошком и нагревают в печи, насыщение идет через газовую фазу; устаревший способ
- **ОБМАЗКА ПАСТАМИ** с последующей сушкой облегчает обработку больших изделий
- **НАСЫЩЕНИЕ В РАСПЛАВАХ СОЛЕЙ** — опасный и неперспективный способ
- **НАСЫЩЕНИЕ В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ** — перспективный способ, не лишенный недостатков; например, газовая цементация потребляет много природного газа
- **ИОННОЕ НАСЫЩЕНИЕ** проводят в разреженной газовой среде, ионизированной тлеющим электрическим разрядом; ионное насыщение углеродом и азотом не загрязняет среду, его применяют для сталей, чугунов и титановых сплавов
- **ЦИРКУЛЯЦИОННОЕ НАСЫЩЕНИЕ** основано на циркуляции газовой смеси; позволяет получать качественные диффузионные покрытия в химически чистой среде

Глава 4. ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ — промышленное название железа и его сплавов; в технике используют около 2000 сплавов на основе железа, большая часть которых — стали

Общая характеристика сталей

СВОЙСТВА СТАЛЕЙ в широких пределах регулируют изменением содержания углерода и легирующих элементов, термической и химико-термической обработкой

- **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ** характеризуются наследуемой от железа высокой жесткостью ($E=210$ ГПа) и хорошей прочностью (как статической, так и динамической)
- **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ** — стали относят к деформируемым сплавам, не содержащим эвтектики; жидкотекучесть сталей позволяет получать отливки простой формы; стали обрабатывают давлением, резанием, сваркой

СТАЛИ КЛАССИФИЦИРУЮТ ПО химическому составу, степени раскисления и характеру затвердевания, качеству, структуре, прочности и назначению

- **ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ** все стали делят на углеродистые и легированные
 - **ПО СОДЕРЖАНИЮ УГЛЕРОДА** стали разделяют на низкоуглеродистые (менее 0,3% С), среднеуглеродистые (0,3–0,7)% С и высокоуглеродистые (более 0,7% С)
 - **ПО СТЕПЕНИ ЛЕГИРОВАНИЯ** стали разделяют на низколегированные (содержат до 5% легирующих элементов), среднелегированные (содержат до 10% легирующих элементов) и высоколегированные (содержат более 10% легирующих элементов)
 - **ПО ХАРАКТЕРУ ЛЕГИРОВАНИЯ** — хромистые, марганцевые, хромоникелевые и др. стали
- **ПО СТЕПЕНИ РАСКИСЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРУ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ** — спокойные стали (хорошо раскислены), полуспокойные стали и кипящие стали (при литье выделяют газы)
 - **РАСКИСЛЕНИЕ** — удаление кислорода из стали перед разливкой; в расплав вводят раскислители (Mn, Si, Al), отбирающие кислород у железа; уменьшает хрупкость сталей
- **ПО КАЧЕСТВУ** — стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные (с ростом качества допустимое содержание в стали двух самых вредных примесей — серы и фосфора — уменьшается)
- **ПО СТРУКТУРЕ** после отжига или после нормализации
 - **ПО ОТОЖЖЕННОЙ СТРУКТУРЕ** стали делят на доэвтектоидные (содержат избыточный феррит), эвтектоидные (перлитная структура), аустенитные (ГЦК-решетка, много Ni и Mn) и ферритные (ОЦК-решетка, много Cr, Si, V, W); углеродистые стали могут быть только двух первых классов
 - **ПО НОРМАЛИЗОВАННОЙ СТРУКТУРЕ** стали разделяют на перлитные (недорогие стали с феррито-цементитной структурой), мартенситные (самокалящиеся, закаляются на воздухе), аустенитные и ферритные (последние два класса совпадают с предыдущей классификацией)
- **ПО ПРОЧНОСТИ** — в зависимости от величины временного сопротивления стали делят на три класса: стали нормальной прочности (до 1000 МПа), стали повышенной прочности (до 1500 МПа) и высокопрочные стали (более 1500 МПа)
- **ПО НАЗНАЧЕНИЮ** — конструкционные, инструментальные, электротехнические стали
 - **КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ** имеют доэвтектоидный состав, их применяют для изготовления металлоконструкций, деталей машин, трубопроводов, железных дорог; это строительные, подшипниковые, рессорно-пружинные, котельные, рельсовые и другие стали
 - **ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ** применяют для изготовления мерительного, режущего и штампового инструмента; это твердые эвтектоидные и заэвтектоидные стали
 - **ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СТАЛЬ** — тонколистовая сталь, используемая при изготовлении электромагнитов, трансформаторов, генераторов, электродвигателей

Углерод, примеси и легирующие элементы в сталях

СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА сильно влияет на свойства сталей

- **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — с ростом содержания углерода прочность, твердость и по-

рог хладноломкости стали возрастают, а ее пластичность и вязкость уменьшаются; высокоуглеродистые стали после закалки тверды, хрупки и ненадежны

- **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — чем больше в стали углерода, тем лучше ее закаливаемость и хуже литейные свойства; низкоуглеродистые стали практически не закаляются; обрабатываемость резанием низко- и высокоуглеродистых сталей затруднена
- **ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — с ростом содержания углерода электросопротивление и коэрцитивная сила стали повышаются, а ее магнитная проницаемость снижается; поэтому сильные постоянные магниты делают из высокоуглеродистой закаленной стали

ПРИМЕСИ В СТАЛИ бывают случайные, постоянные и скрытые

- **СЛУЧАЙНЫЕ ПРИМЕСИ** попадают в сталь из скрапа или руд отдельных месторождений
 - **МЕДЬ** часто попадает в сталь из уральских руд
 - **МЫШЬЯК** содержится в керченских рудах
 - **ОЛОВО, СУРЬМА** и другие цветные металлы попадают в сталь из скрапа (металлолома)
- **ПОСТОЯННЫЕ ПРИМЕСИ** в той или иной степени присутствуют всегда
 - **МАРГАНЕЦ** полезная примесь, уменьшающая вредное влияние серы и кислорода; его вводят в расплав для раскисления с избытком, чтобы его осталось в стали (0,3–0,8)%
 - **КРЕМНИЙ** полезная примесь, упрочняющая сталь; его вводят в расплав для раскисления с избытком, чтобы его осталось в стали около 0,4%
 - **СЕРА** вредная примесь, вызывающая красноломкость стали (хрупкость при горячей деформации); сера облегчает обработку резанием, поэтому ее иногда добавляют в автоматные стали
 - **ФОСФОР** вреден, он вызывает хладноломкость стали; каждая 0,01% фосфора повышает порог хладноломкости на 25 °С; влияние фосфора сильнее проявляется в высокоуглеродистых сталях
- **СКРЫТЫЕ ПРИМЕСИ** — растворенные газы — ухудшают пластичность и прочность стали
 - **КИСЛОРОД** загрязняет сталь оксидами, уменьшающими прочность и повышающими хрупкость
 - **АЗОТ** загрязняет сталь нитридами, вызывающими ее деформационное старение, проявляющееся в разрывах при штамповке малоуглеродистых сталей
 - **ВОДОРОД** вызывает хрупкость закаленных сталей; он попадает из восстановительных атмосфер, при травлении стали кислотами, при нанесении гальванических покрытий

ЛЕГИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ улучшают какие-либо свойства стали

- **ХРОМ** улучшает механические свойства и коррозионную стойкость стали, повышает ее прокаливаемость, способствует получению высокой и равномерной твердости
- **НИКЕЛЬ** повышает прочность и прокаливаемость стали, понижает ее порог хладноломкости; это самый полезный, но дорогой легирующий элемент
- **МОЛИБДЕН, ВОЛЬФРАМ, ВАНАДИЙ И ТИТАН** — карбидообразователи; увеличивают прочность, теплостойкость и прокаливаемость, уменьшают зерно и порог хладноломкости
- **БОР** вводят в микродозах (до 0,005%); микролегирование бором по увеличению прокаливаемости эквивалентно введению 1% дорогого никеля
- **СВИНЕЦ** и **КАЛЬЦИЙ** облегчают обрабатываемость стали резанием
- **МАРКИРОВКА ЭЛЕМЕНТОВ** Х–хром, Н–никель, Г–марганец, А–азот, С–кремний, М–молибден, В–вольфрам, Т–титан, Ф–ванадий, Ю–алюминий, Д–медь, Р–бор, К–кобальт

Конструкционные стали

КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ бывают углеродистые и легированные

УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ дешевы и технологичны, но имеют низкую (до 12 мм) прокаливаемость и требуют очень быстрого охлаждения при закалке; выпускают углеродистые стали обыкновенного качества и качественные

- **УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ ОБЫКНОВЕННОГО КАЧЕСТВА** (ГОСТ 380-2005) — 20 марок
 - **МАРКИРОВКА** начинается буквами Ст, затем идет условный номер марки (обозначается цифрами от 0 до 6), буквой Г обозначают марганец (если его более 0,8%), две буквы в конце мар-

кировки указывают на степень раскисления стали (сп, пс, кп — спокойная, полуспокойная и кипящая сталь); Ст0 (степень раскисления не указывается), Ст1кп, Ст5Гпс

- ПРИМЕНЕНИЕ из этих недорогих сталей делают различные металлоконструкции и слабонагруженные детали машин; из относительно прочных сталей марок 5 и 6 делают рельсы, железнодорожные колеса, детали грузоподъемных и сельскохозяйственных машин
- **УГЛЕРОДИСТЫЕ КАЧЕСТВЕННЫЕ СТАЛИ** выпускают в виде полуфабрикатов с гарантированным химическим составом и механическими свойствами; их маркируют двужаыми числами, обозначающими углерод в сотых долях процента; сталь 20пс (0,2% С, полуспокойная); эти стали выпускают низко-, средне- и высокоуглеродистыми
- **НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ** бывают высокопластичными (05–10) и цементируемыми (15–25)
- **СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ** 30–55 применяют после улучшения, нормализации или поверхностной закалки для самых разных изделий
- **ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ** 60–85 и стали с повышенным содержанием марганца 60Г, 70Г после закалки и среднего отпуска применяют как рессорно-пружинные; после нормализации из них делают прокатные валки, шпиндели станков и другие прочные детали

ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ после термообработки отличаются повышенным пределом текучести и хорошей прокаливаемостью; однако они менее технологичны, часто подвержены отпускной хрупкости и содержат больше остаточного аустенита

- **МАРКИРОВКА ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ** может начинаться с буквы, указывающей ее назначение (А — автоматная, Ш — подшипниковая); затем идет число, соответствующее содержанию углерода в сотых долях %; легирующие элементы обозначают буквами, а цифра после буквы указывает на содержание этого элемента в %; буква в конце указывает на качество стали (А — высококачественная сталь, Ш — особовысококачественная сталь); 20ХНА (0,2% С, по 1% Cr и Ni, сталь высококачественная)
- **АВТОМАТНАЯ СТАЛЬ** хорошо режется, что позволяет обрабатывать ее на станках-автоматах; ее легируют серой, свинцом (С), селеном (Е), кальцием (Ц); А20, АС12ХН
- **ПОДШИПНИКОВАЯ СТАЛЬ** — износостойкая высокоуглеродистая сталь, после закалки и низкого отпуска имеет твердость HRC 60...64; ШХ4, ШХ15
- **ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ НОРМАЛЬНОЙ И ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ** бывают цементируемые (низкоуглеродистые) и улучшаемые (среднеуглеродистые)
- **ЦЕМЕНТУЕМЫЕ СТАЛИ** содержат 0,1–0,3 % С; их используют после цементации для деталей, работающих в условиях трения (зубчатые колеса, кулачки); 15Х, 25ХГМ, 12Х2Н4А
- **УЛУЧШАЕМЫЕ СТАЛИ** содержат 0,3–0,5 % С; из них делают валы, штоки, шатуны; 50Х, 40ХНМА
- **ЛЕГИРОВАННЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СТАЛИ** — среднеуглеродистые комплексно легированные стали, мартенситно-стареющие стали и метастабильные аустенитные стали
- **МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩИЕ СТАЛИ** — железоникелевые сплавы, содержащие 8–25 % никеля и другие легирующие элементы; термообработка: закалка от 850 °С на воздухе и старение при 500 °С; очень высокая прочность и упругость; пример маркировки: 03Н12К15М10
- **АУСТЕНИТНЫЕ СТАЛИ** сочетают высокую прочность с хорошей пластичностью; закаляют их от 1100 °С; плохо режутся; проволока для тросов, броневой лист; пример: 25Н25М4Г

Инструментальные стали

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ отличаются высокой износостойкостью; их применяют для изготовления режущего, мерительного и штампового инструмента; инструментальные стали бывают углеродистые, низколегированные и быстрорежущие

УГЛЕРОДИСТЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ — качественные и высококачественные стали эвтектоидного или заэвтектоидного состава

- **СВОЙСТВА** — углеродистые инструментальные стали поставляются отожженными на зернистый перлит, что облегчает изготовление из них инструмента; после неполной закалки и низкого отпуска они тверды (HRC 62–64), но имеют малую (до 200 °С) теплоустойчивость и низкую (до 12 мм) прокаливаемость

- **ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ** — способность сплава сохранять высокую твердость при нагреве; для стали это температура, при которой мартенсит начинает распадаться
- **ПРИМЕНЕНИЕ** углеродистых инструментальных сталей ограничено их низкой теплостойкостью, не позволяющей резать металл на больших скоростях; из них делают метчики, сверла, напильники, пилы и другой инструмент для ручной обработки металлов, а также мерительный инструмент и мелкие штампы для холодной деформации металла
- **МАРКИРОВКА** этих сталей начинается с буквы У (углеродистая сталь), затем идет число (содержание углерода в десятых долях процента); У7 (углеродистая инструментальная качественная сталь, содержащая 0,7% С), У13А (1,3% С, высококачественная сталь)

НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ — заэвтектоидные стали перлитного класса, легированные хромом, марганцем, кремнием, вольфрамом

- **МАРКИРОВКА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ** начинается с числа, обозначающего содержание углерода в десятых долях процента (если углерода более 1%, то число опускают); 9ХС, ХВГ, ХВ4 (углерода >1%, хрома 1% и вольфрама 4%)
- **СВОЙСТВА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ** — после неполной закалки в масле и низкого отпуска они очень тверды (HRC 62–69); рекордной твердостью обладает т.н. алмазная сталь ХВ4 (HRC 67–69); теплостойкость этих сталей довольно низкая (260 °С), а прокаливаемость — высокая
- **ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ** ограничено их низкой теплостойкостью, недостаточной для резания металлов на станках

БЫСТРОРЕЖУЩАЯ СТАЛЬ — высоколегированная сталь ледебуритного класса с высокой (до 640 °С) теплостойкостью; содержит карбидообразователи (W, Mo, V, Cr); всего по ГОСТ 19265-73 выплавляют 14 марок быстрорежущих сталей, которые по эксплуатационным характеристикам делят на две группы: быстрорежущие стали нормальной и повышенной производительности

- **СТАЛЬ ЛЕДЕБУРИТНОГО КЛАССА** после литья содержит в структуре эвтектику (ледебурит), которую необходимо измельчать тщательной ковкой для устранения карбидной ликвации
- **МАРКИРОВКА БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ** начинается с буквы Р, после которой указывают содержание вольфрама в процентах; ванадий (до 2%) и хром (около 4%) не указывают; Р18 (18% W, до 2% V, 4% Cr); Р6М5 (6% W, 5% Mo, до 2% V, 4% Cr)
- **ТЕРМООБРАБОТКА БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ** — закалка от 1280 °С и трехкратный (для устранения нестабильного остаточного аустенита) отпуск при 560 °С; HRC 63–65
- **ПРИМЕНЕНИЕ** — из быстрорежущих сталей делают инструмент (резцы, сверла, зенкеры, фрезы, протяжки) для обработки металлов на металлорежущих станках

Чугуны

СОСТАВ ЧУГУНОВ кроме железа и углерода, чугуны содержат кремний и примеси

- **УГЛЕРОД** в чугунах может находиться в связанном (цементит) или свободном (графит) состояниях, его содержание в промышленных чугунах не превышает 3,7%; чем больше в чугуне углерода, тем хуже его механические и лучше литейные свойства
- **КРЕМНИЙ** обладает сильным графитизирующим действием, обычно его не более 3%
- **ПОСТОЯННЫЕ ПРИМЕСИ** — марганец, фосфор и сера
- **МАРГАНЕЦ** улучшает механические свойства чугуна, но затрудняет процесс его графитизации (отбеливает чугун); обычно марганца в чугуне содержится не более 1%
- **ФОСФОР** улучшает литейные и ухудшает механические свойства чугуна; его содержание в обычных чугунах до 0,3% (в чугунах для художественного литья — до 1%)
- **СЕРА** ухудшает как механические, так и литейные свойства чугунов; не более 0,15%
- **СЛУЧАЙНЫЕ ПРИМЕСИ** чаще других попадают в чугун из руды хром, никель и медь

СВОЙСТВА ЧУГУНОВ зависят от их состава и структуры

- **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** определяются формой графитовых включений и структурой

- металлической основы; чугуны хорошо сопротивляются сжатию и плохо — растяжению
- **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** определяются содержанием в структуре чугунов легкоплавкой и хрупкой эвтектики (ледебурита); чугуны хорошо льются, удовлетворительно режутся, но их нельзя обрабатывать давлением и трудно сваривать

КЛАССИФИКАЦИЯ ЧУГУНОВ осуществляется по химическому составу, по структуре металлической основы, по форме графитовых включений и по назначению

- **ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ** все чугуны делят на обыкновенные и легированные
- **ПО СТРУКТУРЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ** бывают чугуны с ферритной, ферритно-перлитной и перлитной структурой; структуру регулируют содержанием углерода и кремния
- **ПО ФОРМЕ ГРАФИТА** чугуны делят на белые, серые, ковкие и высокопрочные
- **БЕЛЫЙ ЧУГУН** не имеет в структуре графита (весь содержащийся в нем углерод связан химически и находится в цементите); он тверд и хрупок, для изготовления деталей машин не используется; ограниченно применяют отбеленный чугун (серый чугун с коркой белого на поверхности; из него делают износостойкие изделия: лемехи плугов, прокатные валки, тормозные колодки)
- **СЕРЫЙ ЧУГУН** содержит пластинчатый графит и обладает высокой демпфирующей и звукогасящей способностью; хорошо лется, из него делают большие и сложные по форме отливки: станины станков, блоки цилиндров, коленчатые валы; из прочных перлитных чугунов марок СЧ 30 и СЧ 45 делают зубчатые колеса, из ферритно-перлитных чугунов марок СЧ 20 и СЧ 25 отливают блоки цилиндров, из непрочных ферритных чугунов марок СЧ 10 и СЧ 15 делают различные слабонагруженные детали; число в маркировке — прочность при растяжении в кГ/мм^2
- **КОВКИЙ ЧУГУН** содержит хлопьевидный или вермикулярный (червеобразный) графит; получают его длительным отжигом белого чугуна; он прочнее, пластичнее и дороже серого; выпускают ферритный и перлитный ковкий чугун; чугун с вермикулярным графитом маркируют ЧВГ
- **ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ЧУГУН** содержит шаровидный графит, относительно мало ослабляющий металлическую основу; из него делают тяжело нагруженные детали: прокатные валки, кузнечно-прессовое оборудование, коленчатые валы; выпускают ферритный и перлитный высокопрочный чугун; ВЧ 50–7, ВЧ 120–2 (второе число в маркировке — относительное удлинение в %)
- **ПО НАЗНАЧЕНИЮ** чугуны делят на пердеельные (П1, П2), антифрикционные (АЧС — серый, АЧК — ковкий, АЧВ — высокопрочный), износостойкие, для художественного литья и легированные чугуны со специальными свойствами (Ч)

ТЕРМООБРАБОТКА ЧУГУНОВ чугуны подвергают отжигу, нормализации и закалке

Глава 5. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Медь

МЕДЬ — пластичный золотисто-розовый металл с ГЦК решеткой; это один из первых металлов, освоенных человеком; медная руда содержит менее 1% меди

- **СВОЙСТВА МЕДИ** зависят от ее состояния и структуры
 - **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — плотность $8,9 \text{ т/м}^3$, температура плавления 1083°C , высокая тепло- и электропроводность; на воздухе медь пассивируется (покрывается оксидной пленкой), после чего ведет себя как коррозионно-стойкий металл; при нагреве медь окисляется
 - **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — литая медь имеет прочность 160 МПа и пластичность 25%, отожженная медь имеет прочность 220 МПа и пластичность 50%, деформированная медь имеет прочность 450 МПа и пластичность 3%
 - **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДИ** — медь хорошо прокатывается, протягивается, полируется, сваривается и паяется; льется и режется медь плохо
- **ПРИМЕНЕНИЕ МЕДИ** весьма разнообразно
 - электротехника: из мягкой меди делают обмоточные провода, а из твердой — контактные
 - машиностроение: бесшовные трубы для транспортировки жидкостей и газов, теплообменники
 - архитектура: кровли и фасады из листовой меди служат 150 лет
 - медицина: бактерицидные поверхности (перилы, поручни, ручки, краны, столешницы)
- **МАРКИРОВКА** — М00 (99,99% меди), М0 (99,97% меди), М1 (99,9% меди), М2 (99,7% меди), М3 (99,5% меди); ММ — мягкая (отожженная), МТ — твердая (тянутая)

МЕДНЫЕ СПЛАВЫ могут содержать алюминий (А), никель (Н), олово (О), свинец (С), фосфор (Ф), железо (Ж), кремний (К), марганец (Мц), бериллий (Б), цинк (Ц)

- **СВОЙСТВА МЕДНЫХ СПЛАВОВ** — прочность 300–500 МПа, пластичность до 65%, некоторые сплавы очень упруги; хорошие литейные и антикоррозионные свойства
- **КЛАССИФИКАЦИЯ МЕДНЫХ СПЛАВОВ** осуществляется по технологическим свойствам (деформируемые и литейные сплавы), по способности упрочняться термически (упрочняемые и неупрочняемые сплавы) и по химическому составу (латуни, бронзы и др.)
 - **ДЕФОРМИРУЕМЫЕ СПЛАВЫ** не содержат эвтектики, они пластичны, но плохо льются
 - **ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ** содержат в структуре эвтектику, они хрупкие, льются хорошо
- **ЛАТУНЬ** — сплав меди с цинком; бывает двойная и легированная латунь
 - **ДЕФОРМИРУЕМЫЕ ЛАТУНИ** маркируют так: ЛАН59-3-2 (59% Cu, 3% Al, 2% Ni); томпак — двойная латунь, содержит 90–97% меди, обладает хорошей пластичностью, коррозионной стойкостью, антифрикционными свойствами; радиаторы, художественные изделия (имитация золота)
 - **ЛИТЕЙНЫЕ ЛАТУНИ** маркируют иначе: ЛЦ40Мц3А (40% Zn, 3% Mn, 1% Al)
- **БРОНЗА** — сплав меди с любыми элементами, кроме цинка и никеля; бронзы делят на оловянные и безоловянные
 - **ДЕФОРМИРУЕМЫЕ БРОНЗЫ** маркируют так: БрОЦС4-4-2,5 (по 4% Sn и Zn, 2,5% Pb)
 - **ЛИТЕЙНЫЕ БРОНЗЫ** маркируют иначе: БрО6Ц6С3 (по 6% Sn и Zn 3% Pb)
 - **ОЛОВЯННАЯ БРОНЗА** содержит до 10% олова; она обладает высокой упругостью и коррозионной стойкостью, хорошими антифрикционными и отличными литейными свойствами; оловянные бронзы легируют цинком (адмиралтейская бронза содержит до 10% цинка, она обладает повышенной стойкостью в морской воде), никелем и фосфором; это самый древний сплав
 - **БЕРИЛЛИЕВАЯ БРОНЗА** — прочный (1200 МПа) пружинный материал; пружины часов...
 - **АЛЮМИНИЕВАЯ БРОНЗА** обладает хорошими механическими и антифрикционными свойствами; антикоррозионные свойства лучше, чем у оловянных бронз; имитация золота в бижутерии

Никель

НИКЕЛЬ — твердый и пластичный серебристый металл, содержание его в земной коре довольно велико (0,01%), но в свободном состоянии никель не встречается

(он содержится в сульфидных и мышьяк-содержащих медно-никелевых рудах)

- **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИКЕЛЯ** — плотность $8,9 \text{ т/м}^3$, температура плавления 1455°С , никель ферромагнитен (точка Кюри 340°С); на воздухе пассивируется (покрывается оксидной пленкой NiO), после чего ведет себя как коррозионно-стойкий металл (устойчив на воздухе, в пресной и морской воде, в некоторых кислотах)
- **ПРИМЕНЕНИЕ НИКЕЛЯ** — никель используют в ювелирном деле, из него делают защитные покрытия и химическую аппаратуру, никель применяют в вакуумной электронике, в аккумуляторах, из него делают магнитострикционные ультразвуковые генераторы (никель сильно изменяет объем при намагничивании), в медицине (брекет-системы, биопротезы); примерно у 12% людей никель вызывает контактный дерматит

ХИМИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ — никель склонен к образованию соединений переменного состава; никельаммиачные комплексы используют при никелировании

- **НИКЕЛИРОВАНИЕ** — нанесение гальванического или химического покрытия, предохраняющего как металлы (сталь, медь, цинк, алюминий, титан, вольфрам, молибден), так и неметаллы (полимеры, стекло, керамику) от воздействия окружающей среды

СПЛАВЫ НИКЕЛЯ — никель образует сплавы почти со всеми известными металлами; промышленность использует несколько тысяч никелевых сплавов; наиболее распространены сплавы с медью, железом, хромом, золотом

- **МЕДНО-НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ** представляют собой твердые растворы с неограниченной растворимостью компонентов; нейзильбер, мельхиор, монель-металл и др.
- **НЕЙЗИЛЬБЕР** (новое серебро) красивый и технологичный сплав на медной основе, содержащий 13–45 % цинка и 5–35 % никеля; он прочен, пластичен, коррозионностоек, внешне похож на серебро; из нейзильбера делают детали точных приборов, реостаты, пружины реле, медицинский инструмент, посуду, ордена, медали, монеты (как «медного», так и «никелевого» цвета)
- **МЕЛЬХИОР** — медно-никелевый сплав, содержащий около 1% марганца; обладает рекордной стойкостью против ударной (струевой) коррозии; краны и клапаны, замена столового серебра
- **МОНЕЛЬ-МЕТАЛЛ** содержит 60–70% никеля, около 30% меди и легирующие добавки; это «натуральный» сплав из сульфидных медно-никелевых руд, поэтому он относительно дешев (однако значительно дороже нержавеющей стали); высокая химическая стойкость и отличные механические свойства сделали его основным металлом химического машиностроения
- **ЖЕЛЕЗО-НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ** — возможно, земное ядро состоит из Fe–Ni сплава
- **МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩИЕ СТАЛИ** по упругости превосходят рессорно-пружинные стали
- **ЭЛИНВАР** содержит 55% Fe и 45% Ni, упругость элинвара почти не зависит от температуры
- **ИНВАР** имеет очень малый коэффициент теплового расширения
- **ПЛАТИНИТ** имеет коэффициент теплового расширения такой же, как платина и стекло; им заменяют дорогую платину в электровакуумных приборах (лампах, кинескопах)
- **ПЕРМАЛЛОЙ** — магнитно-мягкий сплав, применяют в электротехнике
- **ХРОМО-НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ** — нихром, инконель...
- **НИХРОМ** содержит 55–78 % никеля, 15–25 % хрома и 1,5% марганца; большое удельное сопротивление и жаростойкость нихрома позволяют делать из него нагревательные элементы; это технологичный (проволока, лента), но довольно дорогой сплав
- **ИНКОНЕЛЬ** — хромоникелевый сплав, легированных титаном и другими элементами; инконель обладает хорошей коррозионной стойкостью (на воздухе пассивируется) и высокой жаропрочностью; этот сплав работает в экстремальных условиях (газотурбинные двигатели, химические аппараты, пароперегреватели); инконель — один из основных металлов ракетной техники

Алюминий

АЛЮМИНИЙ — легкий пластичный серебристо-белый металл с ГЦК решеткой; третий по распространенности (после кислорода и кремния) элемент в земной коре; производство алюминия требует больших затрат электроэнергии

- **СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ** зависят от его чистоты, состояния и структуры

- **ХИМИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — малая плотность ($2,7 \text{ т/м}^3$), высокая тепло- и электропроводность, большая теплоемкость, хорошая отражающая способность; на воздухе пассивируется (покрывается оксидной пленкой Al_2O_3), после чего ведет себя как коррозионно-стойкий металл
- **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — у алюминия низкая прочность и высокая пластичность; упрочняют алюминий холодной пластической деформацией (нагартовкой)
- **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — алюминий хорошо деформируется и сваривается, но плохо режется (налипает на инструмент) и паяется (мешают окислы); при литье дает большую усадку
- **МАРКИРОВКА АЛЮМИНИЯ** — алюминий особой чистоты А999 содержит менее 0,001% примесей, алюминий высокой чистоты от А995 до А95 содержит менее 0,05% примесей, алюминий технической чистоты А85, А8 и т.д. содержит до 1% примесей, деформируемый полуфабрикат (листы, профили, прутки) маркируют АД0 и АД1
- **ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЯ** — электротехника, машиностроение, бытовые изделия...
- из алюминия особой и высокой чистоты делают провода, кабели, шины
- из алюминия технической чистоты — рамы, двери, трубы, цистерны, фольгу, посуду, отражатели

АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ часто содержат медь, магний, кремний, марганец, цинк; реже — никель, литий и титан; их прочность достигает 700 МПа, а удельная прочность — 23 км (сталь до 27 км); хорошо обрабатываются давлением, резанием и сваркой; алюминиевые сплавы бывают деформируемые, литейные и спеченные

- **ДЕФОРМИРУЕМЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ** пластичны, так как не содержат хрупкой эвтектики; сплавы Al-Mn и Al-Mg не упрочняются термически; термообработкой упрочняют дуралюмины (Д), ковочные (АК) и высокопрочные (В) сплавы
- **ДУРАЛЮМИН** — деформируемый сплав системы Al-Cu-Mg; обладает хорошим сочетанием прочности и пластичности; применяют его в авиации, строительстве и автомобилестроении; Д1 — лопасти воздушных винтов, Д16 — шпангоуты и тяги управления, Д18 — заклепки; термообработка: закалка от 500°C и охлаждение в воде при 40°C , затем естественное старение 6 суток
- **КОВОЧНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ** от дуралюминов отличаются повышенным содержанием кремния; хорошая пластичность и трещиностойкость; АК8 — лопасти вертолетных винтов
- **ВЫСОКОПРОЧНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ** принадлежат к системе Al-Zn-Mg-Cu с добавками Mn, Cr или Zr; сплав В96 после закалки и старения имеет прочность 700 МПа при относительном удлинении 7%; обшивки, шпангоуты и лонжероны самолетов
- **ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ** содержат в структуре эвтектику, обладают хорошей жидкотекучестью и плохой пластичностью; это сплавы систем Al-Si, Al-Cu и Al-Mg; маркируют их буквами АЛ; наилучшими литейными свойствами обладают силумины
- **СИЛУМИН** — литейный сплав системы Al-Si (до 13% Si); силумины бывают двойные и легированные; хорошая жидкотекучесть, трещиностойкость и герметичность, малая усадка и плотность (2650 кг/м^3); термообработка силуминов: закалка от 530°C , затем искусственное старение (170°C); из них делают корпуса компрессоров, головки цилиндров
- **СПЕЧЕННЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ** изготавливают из гранул методами порошковой металлургии; прочность спеченных дуралюминов может достигать 800 МПа
- **МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ ГРАНУЛЫ** получают сверхбыстрым (до миллиона градусов в секунду, распыляя расплав струей газа) охлаждением, поэтому они имеют чрезвычайно мелкокристаллическую структуру, минимальную ликвацию и представляют собой аномально (до 5 раз по сравнению с равновесной концентрацией) пересыщенные твердые растворы

Магний

МАГНИЙ — легкий серебристо-белый металл с ГП решеткой

- **СВОЙСТВА** главное достоинство магния — очень малая плотность ($1,7 \text{ т/м}^3$)
- **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — температура плавления 650°C , температура воспламенения 623°C , в измельченном состоянии пирофорен, коррозионная стойкость низкая; теплопроводность и модуль упругости магния в 1,5 раза, а электрическая проводимость в 2 раза ниже, чем у алюминия, однако по удельной жесткости они примерно равны
- **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — прочность 120 МПа, пластичность 7%, твердость НВ 30; магний и его сплавы хорошо воспринимают ударные нагрузки и гасят вибрацию

- **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — магний хорошо режется, однако мелкая стружка может вспыхнуть; при литье также может воспламениться, нужна защита; магний и его сплавы обрабатывают давлением при температуре наибольшей пластичности (около 400 °С)
- **МАРКИРОВКА** — Mg96 (99,96% Mg) ... Mg90 (99,90% Mg); освоено производство сверхчистого магния, содержащего 99,9999% металла
- **ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИЯ** — пиротехника, химическая промышленность (синтез органических соединений), металлургия (раскислитель, восстановитель, легирующий элемент); как конструкционный материал магний не используют, но используют его сплавы

СПЛАВЫ МАГНИЯ обычно содержат алюминий, цинк и марганец; часто их модифицируют цирконием, кадмием и церием

- **СВОЙСТВА** главное достоинство магниевых сплавов — высокая удельная прочность
- **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — прочность до 400 МПа при плотности менее 2 т/м³; удельная вибрационная прочность (с учетом демпфирующей способности) почти в 100 раз больше, чем у дуралюминов, и в 20 раз больше, чем у легированных сталей
- **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — сплавы магния отлично режутся, шлифуются и полируются; возможна горячая деформация (ковка, прокатка, прессовка); литейные свойства плохие (плавка и разливка производится под флюсом, иначе вспыхнут); свариваются сплавы магния удовлетворительно (применяется как контактная, так и дуговая сварка в защитной атмосфере)
- **КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ** осуществляется по технологическим свойствам (деформируемые и литейные сплавы), по способности к термическому упрочнению (упрочняемые и неупрочняемые сплавы) и по прочности (сплавы средней прочности, высокопрочные и жаропрочные)
- **ДЕФОРМИРУЕМЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ** не содержат в структуре эвтектики и поэтому сравнительно пластичны; наиболее прочны сплавы магния с алюминием и цинком, модифицированные кадмием и серебром (сплав МА10 имеет прочность 430 МПа и удельную прочность 24 км); эти сплавы выпускают в виде полуфабрикатов: поковок, труб, профилей, прутков, листов
- **ЛИТЕЙНЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ** имеют грубозернистую структуру, их механические свойства хуже, чем у деформируемых сплавов; обычно это сплавы системы Mg-Al-Zn, из них делают детали авиадвигателей, корпуса ракет, элементы гоночных автомобилей, а также используют в атомной технике, так как они слабо поглощают нейтроны
- **ТЕРМООБРАБОТКА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ** осложняется очень медленной диффузией, для завершения которой требуются продолжительные энергозатратные выдержки; упрочняют сплавы магния закалкой на воздухе с последующим искусственным старением при 200 °С (20 часов), снимают упрочнение отжигом (гомогенизационным, рекристаллизационным и отжигом для снятия остаточных напряжений)
- **ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА** — высокоэффективный процесс упрочнения
- **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА** — интенсивная пластическая деформация магниевых сплавов, совмещенная с закалкой
- **НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА** — деформация магниевых сплавов при температурах ниже температуры рекристаллизации

Титан

ТИТАН — легкий тугоплавкий металл серебристо-белого цвета; до 882 °С имеет ГП решетку (Ti_α), а выше — ОЦК решетку (Ti_β); полиморфное превращение при быстром охлаждении протекает по мартенситному механизму

- **СВОЙСТВА ТИТАНА** — малая плотность, высокая удельная прочность, хорошие механические свойства и технологичность, отличная коррозионная стойкость; свойства титана зависят от его чистоты (от содержания водорода, кислорода, азота и углерода)
- **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — прочность до 600 МПа (при нагреве до 250 °С прочность снижается вдвое), пластичность 25%, удельная прочность 30 км; низкий модуль упругости (почти вдвое меньше, чем у железа и никеля) затрудняет изготовление жестких конструкций; титан склонен к ползучести даже при комнатной температуре
- **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — титан хорошо обрабатывается давлением (выпускают все

виды прессованного и катаного полуфабриката: листы, проволоку, трубы, поковки), сваривается аргонодуговой и точечной сваркой; режется титан плохо (налипает на инструмент, что приводит к быстрому его износу); пыль титана взрывается при 400 °С; высокая химическая активность расплавленного титана требует применения при плавке и сварке защитной атмосферы; титан хорошо наклепывается, наклеп снимают рекристаллизационным отжигом (около 700 °С)

- **ХИМИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — высокая температура плавления (1671 °С), температура рекристаллизации 400–600 °С (зависит от чистоты металла), малая (4,5 т/м³) плотность, хорошая хладостойкость и коррозионная стойкость (пассивируется на воздухе); жаростойкость титана низкая, антифрикционные свойства плохие; при нагреве титан активно поглощает газы
- **МАРКИРОВКА ТИТАНА** — ВТ1–00 (примесей до 0,1%), ВТ1–0 (примесей до 0,3%)
- **ПРИМЕНЕНИЕ ТИТАНА** весьма разнообразно:
 - **МЕТАЛЛУРГИЯ** — титан является ценным легирующим элементом многих сплавов
 - **ЭЛЕКТРОНИКА** — титан используют как геттерный материал (геттеры повышают вакуум электронных ламп за счет газопоглощения при нагреве)
 - **ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ** — из титана делают реакторы, трубопроводы, насосы
 - **МЕДИЦИНА** — хорошая биосовместимость титана позволяет делать из него остеопротезы

СПЛАВЫ ТИТАНА классифицируют по технологическим свойствам (деформируемые и литейные), по прочности, по структуре и по способности к термическому упрочнению; наиболее важны сплавы титана с алюминием и никелем

- **ТЕРМООБРАБОТКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ** — отжиг (700–800 °С), закалка на мартенсит (пересыщенный раствор легирующих элементов в Ti_α) и старение; химико-термическая обработка — азотирование для износостойкости, силицирование для жаростойкости, термоводородная обработка (до 0,8% Н) для повышения конструкционной прочности
- **СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ** — малая плотность (до 5 т/м³), прочность достигает 1800 МПа, пластичность (5–60)%, низкая теплопроводность; титановые сплавы дешевле, пластичнее и технологичнее бериллиевых сплавов, они превосходят сплавы алюминия и магния по удельной прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости; сплавы титана с никелем (нитинолы) обладают эффектом памяти формы (запоминают две формы, которые им придали ниже и выше температуры мартенситного превращения, после чего переход через эту температуру ведет к изменению формы сплава)
- **НИТИНОЛ** — прочный, коррозионностойкий и упругий сплав никеля с титаном; его применяют в космической технике (самораскрывающиеся под воздействием солнечного тепла антенны и солнечные батареи), в промышленности (самосрабатывающие муфты трубопроводов, саморасклепывающиеся в труднодоступных местах конструкции заклепки), в медицине
- **ПРИМЕНЕНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ** — авиация (обшивка самолетов), ракетная техника (корпуса ракетных двигателей), судостроение (обшивка морских судов и подводных лодок), промышленность (баллоны для сжатых и сжиженных газов), криогенная техника

Бериллий

БЕРИЛЛИЙ — легкий, редкий (в земной коре его всего 0,0005%) и дорогой металл серого цвета; ниже температуры 1250 °С имеет ГП решетку (Be_α), а выше — ОЦК решетку (Be_β); главное достоинство бериллия — огромная удельная жесткость

- **СВОЙСТВА БЕРИЛЛИЯ** зависят от его чистоты, размеров зерна и наличия текстуры
- **ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — у бериллия очень малая (1848 кг/м³) плотность, высокая электропроводность и теплопроводность (лишь на 12% уступает алюминию), огромная теплоемкость (по теплоемкости бериллий в 8 раз превосходит сталь, в 4 раза титан и в 2,5 раза — алюминий); скорость распространения звука в бериллии 2,5 раза выше, чем в стали
- **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** — прочность 300–700 МПа (у микропроволоки более 1300 МПа) при пластичности 2–40%, огромный (310 ГПа) модуль упругости (больше только у тяжелых вольфрама и молибдена); у бериллия очень большая (37 км) удельная прочность и рекордная (16 км) удельная жесткость (удельная жесткость магниевых сплавов достигает 2,3 км, алюминевых сплавов — 2,4 км, титановых и железных сплавов — 2,6 км); бериллий обладает высокой стойкостью к резонансным колебаниям, обладает хорошей демпфирующей способностью и хо-

рошо сопротивляется усталостному разрушению

- **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕРИЛЛИЯ** плохие: из-за высокой химической инертности его трудно извлекать из руды, низкая пластичность литого бериллия затрудняет обработку давлением, из-за высокой твердости он плохо режется; сваривают бериллий дуговой сваркой в аргоне, гелии или вакууме; бериллий токсичен при переработке (вызывает тяжелое легочное заболевание — бериллиоз, а также раздражение кожи, опухоли и язвы), поэтому его режут в специальных помещениях с использованием пылезащитных костюмов и масок
- **ПРИМЕНЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ** — это один из лучших материалов для конструкций, где нужна малая масса и большая жесткость
- **АВИАЦИЯ** — передние кромки и консоли крыльев, элероны, тяги управления и другие детали
- **РАКЕТОСТРОЕНИЕ и КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА** — из бериллия делают тепловую защиту, головные части и обшивку ракет, оболочки кабин космонавтов; применение бериллия в ракетных двигателях позволило вдвое увеличить тягу при значительном снижении массы двигателя (сопло из бериллия не разрушается даже при 3000°C); в космической технике используют композиты на основе легких металлов, армированных прочной бериллиевой микропроволокой
- **АТОМНАЯ ТЕХНИКА** бериллий используют как конструкционный материал в ядерных реакторах
- **РЕНТГЕНОВСКАЯ ТЕХНИКА** — бериллий поглощает рентгеновские лучи в 17 раз слабее алюминия, из него делают окна рентгеновских трубок
- **МЕТАЛЛУРГИЯ** — бериллий используют как легирующий элемент в сплавах (сталь, бронза)
- **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** — из бериллия делают ответственные детали высокоточных приборов (акселерометров, гироскопов, навигационных систем ракет, самолетов, подводных лодок)

СПЛАВЫ БЕРИЛЛИЯ сложно получить из-за малых размеров его элементарной ячейки; основной легирующий элемент — алюминий, реже — магний

- **СВОЙСТВА СПЛАВОВ** — сплавы пластичнее и технологичнее чистого бериллия; сплав, содержащий 24% алюминия, имеет прочность 620 МПа и модуль упругости 260 ГПа при относительном удлинении 3%

ХИМИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ БЕРИЛЛИЯ — высокой жаропрочностью обладают бериллиды — твердые и хрупкие интерметаллидные соединения бериллия с переходными металлами (танталом, ниобием, цирконием)

- **ИНТЕРМЕТАЛЛИД** — химическое соединение нескольких металлов между собой
- **СВОЙСТВА БЕРИЛЛИДОВ** — эти твердые и хрупкие материалы имеют температуру плавления около 2000°C , их модуль упругости достигает 350 ГПа при плотности до 5 т/м^3
- **ПРИМЕНЕНИЕ БЕРИЛЛИДОВ** — из них делают (методами порошковой металлургии) мелкие детали простой формы для гироскопов и систем управления

Тугоплавкие металлы

ТУГОПЛАВКИЕ — так называют металлы, превосходящие по температуре плавления железо; их свойства (высокая жесткость и температура плавления, малое тепловое расширение, низкая теплопроводность, большая жаропрочность) во многом объясняются прочными межатомными связями; тугоплавкими являются: титан (1665°C), цирконий (1855°C), хром (1890°C), ванадий (1920°C), гафний (2230°C), ниобий (2477°C), молибден (2623°C), тантал (2996°C), рений (3170°C) и вольфрам (3380°C), также тугоплавкими являются все платиноиды

- **ЦИРКОНИЙ** — блестящий, пластичный и коррозионностойкий металл серебристо-серого цвета; циркониевые сплавы применяют как конструкционные материалы в ядерной энергетике, из них делают химическую аппаратуру, хирургические инструменты и остеопротезы (по биосовместимости он превосходит титан)
- **ХРОМ** — очень твердый голубовато-белый металл с ОЦК решеткой; обязательный компонент нержавеющей, кислотоупорных и жаростойких сталей; хром используется для образования многих технически полезных сплавов (нихромы, хромали), а также для получения защитных и декоративных покрытий (хромирование)

- **ВАНАДИЙ** — пластичный и неплотный ($6,11 \text{ т/м}^3$) металл серебристо-серого цвета; 80% выплавленного ванадия используют для легирования сталей и сплавов, применяемых в космической технике, авиации и судостроении; ванадий и его соединения токсичны
- **ГАФНИЙ** — плотный ($13,35 \text{ т/м}^3$) металл серебристо-белого цвета; из него делают регулирующие стержни и защиту ядерных реакторов; гафний — важный компонент жаропрочных и тугоплавких сплавов для авиации и ракетной техники; сплав карбида гафния (HfC , 20 %) с карбидом тантала (TaC , 80 %) является самым тугоплавким сплавом (4216°C)
- **НИОБИЙ** — блестящий серебристо-серый металл с ОЦК решеткой; очень стоек химически, им покрывают тепловыделяющие элементы ядерных реакторов; сплавы ниобия используют для изготовления сверхпроводников
- **МОЛИБДЕН** — светло-серый металл с ОЦК решёткой; химически стоек (на воздухе окисляется при температурах более 400°C); ценный легирующий элемент в сталях (увеличивает их прочность и ударную вязкость); из молибдена делают нити накаливания электрических ламп, катоды электровакуумных приборов
- **ТАНТАЛ** плотный ($16,6 \text{ т/м}^3$), прочный, твердый, пластичный и теплопроводный металл; чрезвычайно коррозионностойкий (поддается только смеси плавиковой и азотной кислот), из него делают химическую аппаратуру (тигли, теплообменники, катоды); тантал обладает очень высокой биологической совместимостью, из него делают пластинки для черепных проломо́в; важный легирующий элемент в сталях специального назначения; сплав из 90% тантала и 10% вольфрама работает до 3300°C ; в ювелирном деле им часто заменяют платину (браслеты, корпуса часов); дешевле платины, но дороже серебра
- **РЕНИЙ** — редкий и дорогой металл; обладает высокой плотностью ($21,02 \text{ т/м}^3$), пластичностью, коррозионной стойкостью и жаропрочностью (при 2000°C это самый прочный из известных металлов); идет в основном на сплавы, которые дешевле чистого рения; сплавы рения используют в авиации, космической и атомной технике
- **ВОЛЬФРАМ** — плотный ($19,3 \text{ т/м}^3$) похожий на платину серебристо-белый металл; самый тугоплавкий из известных металлов; важнейший компонент инструментальных быстрорежущих сталей и твердых сплавов; при нагреве приобретает высокую пластичность; из вольфрама делают нити ламп накаливания, электроды электронных приборов; сплавы вольфрама получают преимущественно по порошковой технологии, плавить его трудно

Благородные металлы

БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ обладают высокой термодинамической стабильностью и химической инертностью; из благородных металлов и их сплавов делают электрические контакты, припои и защитные покрытия, их применяют в химическом машиностроении, медицине (инструменты, протезы, препараты); благородными являются золото, серебро и платиноиды (платина, палладий, рутений, иридий, осмий, родий); иногда к благородным металлам причисляют технеций

- **ЗОЛОТО** — пластичный и плотный ($19,32 \text{ т/м}^3$) металл желтого цвета, плавится при температуре 1064°C , химически инертно (его растворяет только царская водка), на воздухе не окисляется даже при нагреве; из золота делают ювелирные украшения и припои, его применяют в стоматологии; сплавы золота используют для изготовления химически стойкой аппаратуры, контактов приборов ответственного назначения
- **СЕРЕБРО** — пластичный металл белого цвета с плотностью $10,5 \text{ т/м}^3$ и температурой плавления 962°C ; серебро обладает рекордной электропроводностью, теплопроводностью и отражательной способностью; из него делают зеркала, припои и фотоматериалы; в медицине применяют препараты на основе серебра
- **ПЛАТИНА** — очень плотный ($21,45 \text{ т/м}^3$) и химически инертный тугоплавкий металл белого цвета с температурой плавления 1769°C , обладает высокой пластичностью и электропроводностью; платину используют в химической промышленности (из нее делают химическую посуду, она является мощным катализатором многих реакций), в электро-

- технике (контакты, термопары), в ювелирном деле и медицине (из платины делают зубные протезы и хирургические инструменты); платина образует много полезных сплавов
- **ПАЛЛАДИЙ** — серебристо-белый пластичный металл, самый легкий (12 т/м^3) и легкоплавкий (1552°C) платиноид; палладий не тускнеет со временем, не подвержен коррозии (противостоит даже воздействию фтора); отличный катализатор, как и все платиноиды; чрезвычайно сильно поглощает водород; палладий применяют в электротехнике и химии (как катализатор и для очистки водорода от примесей)
 - **РУТЕНИЙ** — хрупкий и редкий металл с температурой плавления 2250°C , адсорбирует водород в пропорции 1:1500, его используют для извлечения и очистки водорода
 - **ИРИДИЙ** — твердый и прочный металл с рекордной плотностью ($22,65 \text{ т/м}^3$); плавится при температуре 2447°C , устойчив во всех кислотах (даже в царской водке); из иридия делают химическую посуду, наконечники перьев (золотых) для авторучек, защитные покрытия, его используют в термопарах; иридий сильно упрочняет платину в сплавах
 - **ОСМИЙ** — твердый, чрезвычайно плотный ($22,61 \text{ т/м}^3$) и очень тугоплавкий (3027°C) серовато-белый металл; осмий используют для производства сверхтвердых износостойких сплавов с иридием и как мощный катализатор многих реакций; это наименее благородный (окисляется на воздухе) и самый дорогой платиноид
 - **РОДИЙ** — красивый серебристый металл с голубоватым оттенком и температурой плавления 1960°C ; устойчив ко всем кислотам, щелочам и галогенам; один из самых дорогих металлов; обычно его используют в сплавах с платиной (платинородий)
 - **ТЕХНЕЦИЙ** — металл серебристо-серого цвета с гексагональной решеткой; радиоактивен, стабильных изотопов не имеет; это редкий и очень дорогой металл (значительно дороже золота); его получают из радиоактивных отходов, он накапливается в ядерных реакторах как результат деления урана (в земной коре его уже нет, весь распался); по химическим свойствам технеций близок к рению; он используется в медицине при диагностике желудочно-кишечного тракта; соли технеция — лучший ингибитор коррозии

Глава 6. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Органические материалы

ПРИРОДНЫЕ СМОЛЫ — шеллак, канифоль и янтарь

- **ШЕЛАК** — продукт жизнедеятельности тропических насекомых; клеящие растворы
- **КАНИФОЛЬ** — твердая смола, получаемая из хвойной смолы; пропитка, флюс при пайке
- **ЯНТАРЬ** — ископаемая смола растений, отличный диэлектрик

СИНТЕТИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ бывают термопластичные и термореактивные

- **ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЙ ПОЛИМЕР** состоит из макромолекул, не связанных в поперечном направлении; малая прочность и жесткость, но высокая долговечность; термопласт размягчается и затвердевает при изменении температуры, стареет под воздействием света, влаги и кислорода; состояния термопласта — стеклообразное (ниже температуры стеклования), высокоэластичное и вязкотекучее (выше температуры текучести)
- **ПОЛИЭТИЛЕН** состоит из макромолекул $(-CH_2-)_n$, образованных мономерами этилена; (n — степень полимеризации); при комнатной температуре нерастворим в щелочах и кислотах; быстро стареет (2–3 года под солнцем), но стабилизаторы (сажа) могут сильно замедлить этот процесс
- **ОРГАНИЧЕСКОЕ СТЕКЛО** — техническое название оптически прозрачных материалов на полимерной основе; полиметилметакрилат (плексиглас) выделяется теплостойкостью (до 140 °С)
- **ТЕРМОРЕАКТИВНЫЙ ПОЛИМЕР** состоит из линейных макромолекул, прочно связанных между собой в поперечном направлении (такая сетчатая структура образуется после введения в полимер отвердителя); реактопласт не плавится, не растворяется и не стареет; основа реактопласта — эпоксидная, полиуретановая или другая смола

ПЛАСТМАССА — многокомпонентный материал на полимерной основе; может содержать наполнители, стабилизаторы, пластификаторы и отвердители; малая плотность, низкая теплопроводность, высокая химическая стойкость и хорошая технологичность; пластмассы классифицируют по полимеру: фенолоформальдегидные (фенопласты), эпоксидные, полиамидные, полиуретановые, стирольные и др.

- **НАПОЛНИТЕЛЬ** вводят для увеличения прочности и уменьшения стоимости пластмассы; в качестве наполнителя используют порошки (древесную муку, сажу, тальк, слюду, графит), волокна (хлопчатобумажные, стеклянные, полимерные, асбестовые), листы (бумагу, ткань, шпон)
- **СТАБИЛИЗАТОР** — органическое вещество, замедляющие старение пластмассы
- **ПЛАСТИФИКАТОР** улучшает пластичность и формуемость пластмассы; эфиры, полимеры
- **ОТВЕРДИТЕЛЬ** вводят в реактопласт для поперечной сшивки макромолекул и получения прочной сетчатой структуры; обычно это органическая перекись или сера (в резинах)

КАУЧУК — натуральный или синтетический эластомер, упругий в широком диапазоне температур; вулканизация (нагрев с введением серы) превращает его в резину

РЕЗИНА — многокомпонентный высокоэластичный материал, содержащий каучук, пластификатор, наполнитель, вулканизатор, антиоксидант и краситель; упругая деформация достигает 800%; резина стареет под воздействием тепла, света и озона

ДРЕВЕСИНА — природное высокомолекулярное соединение, состоящее из 51% углерода, 43% кислорода, 6% водорода и 0,1% азота; промышленную древесину обычно подвергают модификации или уплотнению для улучшения свойств

- **МОДИФИКАЦИЯ ДРЕВЕСИНЫ** заключается в ее пропитке синтетическими смолами, легкоплавкими металлами, солями, антисептиками (против гниения); модифицированная древесина приобретает повышенную прочность, влагостойкость, негорючесть
- **УПЛОТНЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ** позволяет получить лигностон (каменное дерево); его плотность и прочность в 3 раза выше, чем у натуральной древесины; обычно совмещают с модификацией

Неорганические материалы

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ не горят, химически инертны и прочны на сжатие; однако они хрупкие, плохо переносят резкую смену температур и растягивающие нагрузки; неорганика — графит, слюда, стекло, керамика, ситаллы

- **ГРАФИТ** бывает природный и искусственный; искусственный графит отличается от природного совершенной кристаллической структурой и сильно выраженной анизотропией свойств; графит — хрупкий, легкий и жаропрочный материал; его используют в авиации и космонавтике, в ядерных реакторах графит используют для замедления нейтронов, его применяют при производстве композиционных и антифрикционных материалов, в электротехнике как хорошо проводящий материал; технический графит получают из твердого сырья, а пиролитический — из газов (он плотнее и анизотропия больше)
- **СЛЮДА** — водный алюмосиликат со слоистой структурой и сильно выраженной анизотропией свойств; обладает высокой механической и электрической прочностью, хорошей химической стойкостью; бывает минеральная и синтетическая слюда; слюду используют для изоляции в электродвигателях и конденсаторах
- **СТЕКЛО** — аморфный материал, полученный охлаждением расплава, состоящего из окислов; прозрачно в определенной области оптического диапазона; стекло может быть галогенидное, халькогенидное (на основе талька) и оксидное; оксидное стекло бывает силикатное, боратное, фосфатное, алюмосиликатное
 - **СИЛИКАТНОЕ СТЕКЛО** состоит в основном из оксида кремния SiO_2 ; оно устойчиво во всех кислотах, кроме плавиковой, щелочи его разлагают; свойства силикатного стекла сильно зависят от состава (например, плотность может изменяться в пределах от 2 т/м^3 до 8 т/м^3); выдающим представителем силикатных стекол является кварцевое стекло
 - **КВАРЦЕВОЕ СТЕКЛО** состоит из чистого оксида кремния SiO_2 ; выплавляют его из горного хрусталя или чистых кварцевых песков; оно прозрачно в широком диапазоне длин волн (200–5000) нм, в том числе прозрачно и для ультрафиолетовых лучей; кварцевое стекло обладает высокой кислото- и огнеупорностью (длительно выдерживает температуру 1000°C и кратковременно — 1900°C), а также хорошей радиационной стойкостью; из него делают смотровые окна электрических печей и летательных аппаратов, химическую посуду
- **КЕРАМИКА** — искусственный материал, получаемый обжигом минеральных порошков (глин); керамика обычно содержит три фазы: кристаллическую (оксиды, карбиды), аморфную (стекло) и газовую (поры); керамика обладает высокой прочностью и жаропрочностью, очень высокой химической инертностью и устойчивостью к старению; главный недостаток керамики — высокая хрупкость и ненадежность при эксплуатации; керамика бывает строительная (черепица, кирпич, шифер), диэлектрическая (электротехнический фарфор) и техническая (оксидная и бескислородная)
 - **ОКСИДНАЯ КЕРАМИКА** изготавливается на основе оксидов алюминия, циркония, магния, кальция, бериллия, урана и др.; она не окисляется при нагреве
 - **БЕСКИСЛОРОДНАЯ КЕРАМИКА** изготавливается на основе карбидов, боридов, нитридов, силицидов и сульфидов; при нагреве бескислородная керамика окисляется
- **СИТАЛЛЫ** — стеклокристаллические материалы, получаемые кристаллизацией специальных стекол; содержат как кристаллическую (до 95% объема), так и аморфную (остаточное стекло) фазы; различают термо- и фотоситаллы
 - **ТЕРМОСИТАЛЛЫ** образуются при введении в расплав нескольких процентов оксидов или фторидов; их применяют как твердые износостойкие материалы в узлах трения (заменяют драгоценные или полудрагоценные камни в точечных опорах), для изготовления защитных эмалей, как прочные и стабильные диэлектрики в радиоэлектронной промышленности
 - **ФОТОСИТАЛЛЫ** содержат малые добавки золота, серебра, платины, меди; центры кристаллизации образуются в них при облучении ультрафиолетом, необлученные участки остаются аморфными; фотоситаллы используют как светочувствительные материалы в фотографии

Твердые сплавы и сверхтвердые материалы

ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ состоят из твердых и тугоплавких карбидов вольфрама, титана и тантала, соединенных металлической связкой; твердосплавными пластинами оснащают инструмент, предназначенный для скоростного резания металлов

- **СВОЙСТВА** — твердые сплавы обладают высокой твердостью (HRC 74...76) и прочностью на сжатие (6 ГПа), большим модулем упругости (680 ГПа) и теплостойкостью (до 1000 °С); по износостойкости они значительно превосходят быстрорежущую сталь; твердые сплавы очень хрупки и из них трудно изготовить фасонное изделие
- **ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ** — твердосплавные изделия получают методами порошковой металлургии: порошки карбидов смешивают с порошком кобальта, выполняющего роль связки, прессуют и спекают при температуре 1500 °С; при спекании кобальт растворяет часть карбидов и плавится; получаются плотные (пористость 2%) пластины, на (80–95)% состоящие из карбидных частиц, соединенных прочной связкой; затем ими оснащают режущий инструмент (резцы, фрезы, сверла, зенкеры, протяжки...)
- **КЛАССИФИКАЦИЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ** — твердые сплавы делят на три класса: вольфрамовые, титановольфрамовые и титанотанталовольфрамовые
- **ВОЛЬФРАМОВЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ** состоят из карбида вольфрама WC и кобальтовой связки; маркировка: от ВК3 до ВК25 (цифра — кобальт в %); вольфрамовые твердые сплавы самые прочные, но не самые твердые, их теплостойкость 800 °С; сплавы ВК3–ВК8 применяют для резания чугунов, цветных металлов, фарфора, керамики; сплавы ВК10 и ВК15 применяют для изготовления волоочильных и буровых инструментов, по стойкости в десятки раз превосходящих стальные; сплавы с высоким содержанием кобальта ВК20 и ВК25 применяют для изготовления штампов, а также для износостойких деталей машин и приборов
- **ТИТАНОВОЛЬФРАМОВЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ** состоят из карбида титана, карбида вольфрама и кобальтовой связки (TiC-WC-Co); твердый сплав марки Т30К4 содержит 30% TiC и 4% Co, его теплостойкость 1000 °С; титановольфрамовые сплавы тверже вольфрамовых, но прочность у них ниже; основное применение — высокоскоростное резание стали
- **ТИТАНОТАНТАЛОВОЛЬФРАМОВЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ** состоят из карбидов титана, тантала и вольфрама, связанных кобальтом (TiC-TaC-WC-Co); твердый сплав марки ТТ8К6 содержит 8% карбидов титана и тантала (в сумме) и 6% кобальта; эти твердые сплавы применяют для наиболее тяжелых режимов резания (для черновой обработки стальных отливок и поковок)

СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ применяют для изготовления вставок лезвийных инструментов (резцов, фрез, сверл), используемых для чистовой высокоточной обработки твердых материалов на высоких скоростях резания; сверхтвердые материалы — синтетический алмаз и кубический нитрид бора

- **СИНТЕТИЧЕСКИЙ АЛМАЗ** имеет твердость 10000 HV (твердость быстрорежущей стали 1300 HV) и теплостойкость 800 °С; получают его из графита при температуре 1500 °С и давлении 6 ГПа в присутствии катализаторов; синтетические алмазы (борт, балас, карбонадо) имеют поликристаллическое строение; алмазом режут цветные металлы и сплавы, пластмассы, керамику (но не сталь и чугун из-за его адгезии к железу)
- **КУБИЧЕСКИЙ НИТРИД БОРА** получают спеканием микропорошка нитрида бора BN с гексагональной или кубической решеткой при высоких температурах и давлениях или прямым синтезом из нитрида бора с гексагональной решеткой; в зависимости от технологии получения КНБ выпускают под названиями эльбор, эльбор-Р, боразон; КНБ имеет алмазоподобную решетку и близкую к алмазу твердость (9000 HV), но он превосходит алмаз по теплостойкости (1200 °С) и химической инертности (нет сродства к железу, хорошо режет закаленные и цементованные стали); высокоскоростное точение закаленных сталей инструментом из КНБ может заменить их шлифование, сокращая в 2–3 раза время обработки и обеспечивая низкую шероховатость поверхности

Пленкообразующие материалы

ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ — сложные композиции (лакокрасочные мате-

риалы, клеи, герметики, компаунды и пленки), состоящие из простых компонентов

- **КОМПОНЕТЫ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ КОМПОЗИЦИЙ**

- **ПЛЕНКООБРАЗОВАТЕЛИ** — обработанные растительные масла (олифы), синтетические и природные полимеры, неорганические вяжущие вещества (известь, цемент, жидкое стекло)
- **РАСТВОРИТЕЛИ** — летучие жидкости, растворяющие густые пленкообразователи и придающие составу оптимальную для покраски вязкость; ацетон, бензин, скипидар, уайт-спирит, ксилол
- **РАЗБАВИТЕЛИ** дополнительно снижают, если это необходимо, вязкость композиции; бензол ...
- **ПЛАСТИФИКАТОРЫ** повышают эластичность покрытия; касторовое масло, дибутилфталат
- **СИККАТИВЫ** ускоряют высыхание покрытия; соли свинца, марганца, кобальта, цинка
- **ОТВЕРДИТЕЛИ** вводят в термореактивные смолы для придания им прочности (сшивка молекул)
- **АНТИОКСИДАНТЫ** — вещества, замедляющие старение покрытия
- **КРАСИТЕЛИ** придают составу необходимый цвет
- **ПИГМЕНТЫ** — нерастворимые цветные порошки (сухие краски), окрашивающие композицию, улучшающие ее эксплуатационные свойства и влияющие на стоимость состава
- **НАПОЛНИТЕЛИ** повышают кроющую способность композиции (тальк, мел)
- **ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ** широко используются в качестве противокоррозионных, электроизоляционных, теплозащитных и декоративно-отделочных покрытий
- **ЛАК** — раствор пленкообразующей смолы в спирте, масле или скипидаре; после высыхания превращается в тонкую прозрачную блестящую пленку; лаки: автомобильные, строительные...
- **МАСЛЯНАЯ КРАСКА** — загущенное пигментом растительное масло
- **ЭМАЛЕВАЯ КРАСКА** — суспензия различных пигментов и наполнителей в лаке
- **ЛАКОКРАСОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ** состоит из четырех слоев
- **ГРУНТОВКА** — подстилающий слой, обеспечивающий хорошее сцепление покрытия с основой
- **ШПАТЛЕВКА** — промежуточный выравнивающий слой, содержащий недорогие наполнители
- **КРАСКА** — окрашивающий покрытие слой
- **ЛАКОВАЯ ПЛЕНКА** на поверхности защищает и украшает покрытие
- **КЛЕИ** классифицируют по виду клеевой основы (органические, неорганические и металлические клеи) и по типу полимера (термопластичные и термореактивные клеи)
- **КЛЕЕВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ** должны обладать стойкостью к старению, водо- и атмосферостойкостью, длительной прочностью под нагрузкой, усталостной долговечностью и термостойкостью
- **ГЕРМЕТИКИ** — полимерные массы, предотвращающие утечки рабочих сред; часто это материалы на основе синтетических каучуков; бывают невысыхающие и высыхающие герметики; свойства герметиков: жизнеспособность, газонепроницаемость, адгезия к поверхности, прочность; в машиностроении герметизируют болтовые, резьбовые, заклепочные и фланцевые соединения, а также ветровые стекла, бензобаки, переборки
- **КОМПАУНДЫ** — пропиточные и заливочные составы, служащие для влагозащиты и улучшения диэлектрических свойств в электроприборах и аппаратах
- **ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ** по структуре и свойствам отличаются от традиционных полимеров, поэтому их выделяют в отдельный класс материалов; толщина пленок колеблется от 5 до 250 микрон, при больших толщинах специфические свойства пленок исчезают; основное применение пленок — упаковка; получают пленки экструзией (выдавливанием через фильеру) термопластов или осаждением из раствора на подложку; пленки бывают однослойные (полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид), многослойные (полиамид-полиэтилен) и армированные сетками из полиамидных или стеклянных волокон

Жидкие и газообразные материалы

СМАЗОЧНЫЕ МАСЛА — минеральные (нефтяные) и синтетические; по назначению их делят на моторные, трансмиссионные, индустриальные и электроизоляционные

- **МОТОРНОЕ МАСЛО** применяют для смазки двигателей; оно состоит из минерального масла и присадок; обладает моющими, смазывающими и антикоррозионными свойствами

- **ТРАНСМИССИОННОЕ МАСЛО** предназначено для смазки механических и гидродинамических передач, оно содержит противозадирные присадки
- **ИНДУСТРИАЛЬНОЕ МАСЛО** — очищенное нефтяное масло, иногда с присадками; уменьшает трение в механизмах, защищает их от коррозии, отводит тепло из нагретых мест

ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ получают введением в масло твердого загустителя; такие мази хорошо удерживаются в негерметичных узлах трения; их классифицируют по составу (бариевые, натриевые и углеводородные смазки, кальциевые солидолы) и по назначению (антифрикционные, консервационные и герметизирующие)

ТЕХНИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ — рабочие среды, технологические жидкости, топливо

- **РАБОЧИЕ СРЕДЫ** — гидравлические и вакуумные масла, теплоносители, амортизационные, демпфирующие и ферромагнитные жидкости
- **ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ЖИДКОСТИ** — коллоидные растворы, состоящие из ферромагнитных наночастиц, взвешенных в несущей жидкости; их применяют в электронике для уплотнения осей жестких дисков, в машиностроении как антифрикционные материалы, в оптике используют возможность изменения у магнитных жидкостей преломляющих свойств; поглощающая радиоволны краска военных самолетов делает их почти невидимыми для радаров
- **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ** — разделительные составы, закалочные среды, моющие жидкости, смазочно-охлаждающие жидкости, охладители и хладоносители
- **ЗАКАЛОЧНЫЕ СРЕДЫ** — водные растворы NaCl и NaOH, минеральное масло, вода
- **РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СОСТАВЫ** уменьшают адгезию (схватывание) металлических поверхностей
- **МОЮЩИЕ ЖИДКОСТИ** — водные щелочные растворы на содовой основе, ацетон, бензин...
- **СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИЕ ЖИДКОСТИ** смазывают, охлаждают, очищают и защищают металлы от коррозии; их широко применяют при обработке металлов резанием и давлением
- **ХЛАДОНОСИТЕЛИ** — водные растворы этиленгликоля с антикоррозионными присадками
- **ТОПЛИВО** — нефтепродукты: бензин, дизельное топливо, керосин и мазут; нефтепродукты используют также как компоненты растворяющих, охлаждающих и моющих сред

ГАЗЫ применяют при термической и химико-термической обработке, как топливо при сварке и резке металлов, как хладагенты в холодильных установках; кроме воздуха в технике используют азот, аммиак, аргон, ацетилен, водород, кислород, хладоны, фреоны, метан и пропан, углекислый и другие газы

- **ВОЗДУХ** содержит 78% азота, 21% кислорода и 1% аргона; основные промышленные газы — кислород, азот и аргон — получают методом криогенного разделения воздуха
- **КИСЛОРОД** используют как окислитель при сварке, резке и ковке металлов
- **АЦЕТИЛЕН** в смеси с кислородом позволяет получить температуру пламени более 3000 °C
- **АЗОТ** применяют для предотвращения пожаро- и взрывоопасных ситуаций, для продувки при испытаниях трубопроводов в нефтегазовой промышленности; в лакокрасочной промышленности его используют для предотвращения полимеризации масел
- **АРГОН** используют как инертный газ при сварке металлов, при получении нержавеющей стали
- **ВОДОРОД** применяют в нефтепереработке, при гидрогенизации нефти, угля и масел; его используют при производстве аммиака и как восстановительную атмосферу при термообработке
- **УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ** используют в пищевой промышленности для производства газированных напитков, из него получают сухой лед для холодильных установок; получают его окислением углеродсодержащих соединений или при переработке природного газа

Глава 7. МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

Композиционные материалы

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ состоят из пластичной матрицы, упрочненной жесткой арматурой; среди них есть материалы с огромной удельной прочностью, жаропрочностью, выносливостью и другими уникальными свойствами

- **МАТРИЦА** обеспечивает рациональное распределение напряжений в арматуре; она придает форму изделию, поэтому ее также называют связкой или основой; матрица бывает полимерная, металлическая, керамическая, углеродная и комбинированная
- **АРМАТУРА** воспринимает нагрузку; в качестве арматуры используют порошки, волокна, нитевидные монокристаллы, ткани, сетки; в зависимости от вида арматуры различают дисперсноупрочненные (порошковые), волокнистые и слоистые композиты
- **ВОЛОКНА** — очень прочные тонкие нити: стальные (3,5 ГПа), стеклянные (5 ГПа), углеродные (8 ГПа), борные, асбестовые и органические; синтетические органические волокна бывают полиамидные (капрон, нейлон) и арамидные (кевлар, таврон), их прочность достигает 5 ГПа
- **НИТЕВИДНЫЕ МОНОКРИСТАЛЛЫ** имеют форму коротких разветвляющихся волокон; наиболее распространены монокристаллы оксидов алюминия и титана; рекордной механической (40 ГПа) и удельной (1300 км) прочностью обладают нитевидные монокристаллы карбида кремния

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ — наполненные пластики, жидкофазные композиты, пористые пластмассы, волокнистые и слоистые пластики

- **НАПОЛНЕННЫЕ ПЛАСТИКИ** — конструкционные пластики, металлонаполненные пластмассы, антифрикционные графитопласты, износостойкие саженнаполненные каучуки (шинные протекторы), фено- и аминопласты (абразивный инструмент), текстурированные пластмассы
- **ПОРИСТЫЕ ПЛАСТМАССЫ** — пенопласты (закрытые поры) и поропласты (сообщающиеся поры); плотность от 10 кг/м³; пористые пластмассы применяют для тепло- и звукоизоляции
- **ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИТЫ** — прочные и тяжелые стеклопластики, жесткие и легкие углепластики, теплостойкие асбобластики, прочные и жесткие бороволокниты, легкие органоволокниты (из синтетических органоволокнитов делают парашюты, паруса, баллоны, тросы)
- **СЛОИСТЫЕ КОМПОЗИТЫ** — текстолиты (упрочнены тканью), гетинаксы (пропитанная бумага), дублированные пластики (дуплен, линолиум), древесно-слоистые пластики и металлопласты

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ — дисперсноупрочненные, волокнистые и эвтектические; матрица алюминиевая, бериллиевая, магниевая, никелевая; их отличает прочность, жесткость и негорючесть

- **ДИСПЕРСНОУПРОЧНЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ** армируют мелкими частицами тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, нитридов, боридов); алюминиевые композиты имеют прочность до 450 МПа и свободную длину до 17 км; легкие и жесткие бериллиевые композиты применяют в ракетостроении; чрезвычайно легкие магниевые композиты применяют в авиации, ракетостроении и ядерной технике; из жаропрочных (до 1200 °С) никелевых композитов делают лопатки турбин, теплозащитные панели, трубопроводы для агрессивных сред
- **ВОЛОКНИСТЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ** получают из порошков прессованием, прокаткой, экструзией, сваркой; матрицы алюминиевые, магниевые, титановые, медные, никелевые
- **ЭВТЕКТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ** армированы ориентированными эвтектическими кристаллами, образовавшимися в результате направленной кристаллизации; в таких естественных материалах нет проблемы химической совместимости матрицы и арматуры; алюминиевые, никелевые, кобальтовые, танталовые, ниобиевые; эвтектические алюминиевые композиты армированы эвтектикой CuAl_2 или Al_3Ni , из них делают прочные провода и электрические контакты

КЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ обладают высокой прочностью и теплостойкостью; арматуру в керамику вводят для уменьшения хрупкости; технология порошковая

- **КЕРМЕТ** — оксидный, нитридный или карбидный металлокерамический композит; используют как режущий инструмент и как износостойкий триботехнический материал (точечные опоры)

Материалы с особыми триботехническими свойствами

Триботехнические материалы обладают аномальным коэффициентом трения; их делят на две группы: антифрикционные материалы и фрикционные материалы

Антифрикционные материалы имеют аномально малый коэффициент трения, из них делают износостойкие подшипники (опоры) скольжения; бывают металлические, неметаллические и комбинированные антифрикционные материалы

- **Металлические антифрикционные материалы** — баббиты, бронзы, латуни, чугуны

- **Баббит** ($f=0,1$) — мягкий и непрочный сплав на оловянной или свинцовой основе с очень хорошими антифрикционными свойствами; Б83 (83% Sn, 11% Sb, 6% Cu); Б16 (16% Sn, 16% Sb, 2% Cu); из него делают тонкие износостойкие покрытия и подшипники ответственного назначения, работающие при больших скоростях и нагрузках (в паровых турбинах и дизелях)

- **Антифрикционные бронзы** ($f=0,15$) — оловянные (Бр010Ф1, Бр010Ц2) и оловянисто-цинково-свинцовистые (Бр05Ц5С5, Бр06Ц6С3); бронзы применяют для подшипников скольжения, работающих при значительных давлениях и средних скоростях (электродвигатели)

- **Антифрикционные латуни** ($f=0,2$) уступают по коэффициенту трения бронзам, их применяют при малых скоростях скольжения и невысоких нагрузках (для опор трения приборов)

- **Легированные антифрикционные чугуны** ($f=0,2$) — серые (АЧС-1, АЧС-2, АЧС-3), высокопрочные (АЧВ-1, АЧВ-2) и ковкие (АЧК-1, АЧК-2); дешевы, но плохо сопротивляются ударам

- **Неметаллические антифрикционные материалы** — пластмассы, минералы и ситаллы; антифрикционные пластмассы: фторопласт, полиамид, капрон, текстолит

- **Фторопласт** ($f=0,05$) имеет чрезвычайно низкий коэффициент трения по стали без смазки, но он непрочный и плохо отводит тепло; используют как покрытие или наполнитель; Ф4, Ф40

- **Полиамид и капрон** ($f=0,17$) также отличаются малым коэффициентом трения

- **Текстолит** ($f=0,2$) — подшипники прокатных станов, гидравлических машин, гребных винтов; такие подшипники могут работать в тяжелых условиях, они смазываются и охлаждаются водой

- **Минералы антифрикционные** — естественные (агат) и искусственные (рубин, корунд) камни; из них делают миниатюрные подшипники скольжения — камневые опоры (для часов, тахометров и гироскопов), выдерживающие громадные давления остро заточенной цапфы; камни обладают низким и стабильным коэффициентом трения, высокой твердостью и износостойкостью; дорогие минералы иногда заменяют ситаллами (стеклокристаллическими материалами)

- **Комбинированные материалы** состоят из металлов и неметаллов; самосмазывающиеся железо-графитовые и бронзо-графитовые порошковые втулки, металлофторопластовые подшипники с очень низким трением, изготовленные из четырехслойной ленты

Фрикционные материалы имеют аномально большой коэффициент трения; их используют в тормозных механизмах и для передачи вращения; эти материалы работают в очень тяжелых условиях (давление до 6 МПа, скорость скольжения до 40 м/с, температура до 1000 °С); от фрикционных материалов требуется большой и стабильный в широком интервале температур коэффициент трения, высокая теплопроводность и теплостойкость, прирабатываемость и прочность; спеченные асбофрикционные материалы (ретинакс), псевдосплавы железа и меди, бериллий

- **Ретинакс** содержит 25% фенолформальдегидной смолы, 40% асбеста, 35% барита, рубленую латунь и пластификатор; коэффициент трения по стали 0,37–0,40; его используют в тормозных механизмах самолетов и автомобилей; ФК-24А, ФК-16Л

- **Металлические фрикционные материалы** обладают большей теплопроводностью, что позволяет применять их при скоростных режимах трения; такие материалы выпускают на железной (ФМК-8 и ФМК-11) и медной (МК-5) основе с неметаллическими добавками (асбест, графит); в многодисковой тормозной системе самолетов применяют чистый бериллий из-за его высокой теплоемкости, теплопроводности и малой плотности

Материалы с хорошими упругими свойствами

УПРУГИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА определяются его пределом упругости, релаксационной стойкостью и величиной внутреннего трения

- **РЕЛАКСАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ** — способность материала сопротивляться релаксации напряжений; эта характеристика особенно важна при длительном нагружении пружины
- **РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ** — самопроизвольное уменьшение напряжений в материале с течением времени, приводящее к необратимой деформации пружины; для уменьшения релаксации напряжений необходимо стабилизировать дислокационную структуру сплава (легированием, повышением плотности дислокаций, выделением дисперсных частиц вторичных фаз)
- **ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ** проявляется в необратимом превращении механической энергии в тепловую при циклическом упругом нагружении материала; хорошая пружина мало греется и колебания в ней долго не затухают

СВОЙСТВА УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА (пружины, мембраны) определяются его характеристикой, чувствительностью, упругим последствием и упругим гистерезисом

- **ХАРАКТЕРИСТИКА ПРУЖИНЫ** — зависимость ее деформации от приложенного усилия; у хорошей пружины она должна быть линейной и минимально зависеть от внешних условий
- **ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРУЖИНЫ** — тангенс угла наклона ее характеристики к оси напряжений; чем выше чувствительность, тем больше упругие деформации и выше точность измерений
- **УПРУГОЕ ПОСЛЕДЕЙСТВИЕ** проявляется в отставании упругой деформации от нагрузки; высокочастотные нагрузки вызывают меньшие деформации, чем статические нагрузки той же силы
- **УПРУГИЙ ГИСТЕРЕЗИС** проявляется в несовпадении характеристик пружины при нагрузке и разгрузке; вызывается рассеянием энергии при возникновении упругих напряжений

УПРУГИЕ СПЛАВЫ — рессорно-пружинные и мартенситно-стареющие стали, бериллиевые бронзы, железоникелевые сплавы, сверхупругие материалы

- **РЕССОРНО-ПРУЖИННЫЕ СТАЛИ** бывают углеродистые (60, 70Г) и легированные (55С2, 50ХФА); их используют для силовых пружин из-за высокой прочности и жесткости
- **ТЕРМООБРАБОТКА СТАЛЬНЫХ ПРУЖИН** — закалкой на мартенсит и средним отпуском получают троостит со стабильной дислокационной структурой и высокой упругостью; хорошие результаты дают также изотермическая закалка на нижний бейнит и патентирование
- **МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩИЕ СТАЛИ** обладают рекордным для пружинных сплавов пределом упругости (1500 МПа) и низким порогом хладноломкости
- **БЕРИЛЛИЕВЫЕ БРОНЗЫ** обладают линейной характеристикой и высокой чувствительностью; их используют для упругих элементов ответственного назначения; бронзы БрБ2 и БрБНТ1,9 после термомеханической обработки имеют предел упругости 1000 МПа
- **ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ** не уступают по пределу упругости бериллиевым бронзам, но имеют меньшую чувствительность; сплав с аустенитной структурой 36НХТЮ коррозионностоек, хорошо обрабатывается давлением и легко сваривается
- **СВЕРХУПРУГИЕ МАТЕРИАЛЫ** способны к аномально высокой (до 10%) упругой деформации, что связано с наличием у них обратимого мартенситного превращения, вызываемого внешними воздействиями (механическими и тепловыми); так, замена стальных пружин этими материалами позволяет в 20 раз реже заводить часы или сократить время сращения перелома челюсти с трех недель до одной; сплав Оландера, нитинол, сплавы Ti-Co, Ti-Fe, Mn-Cu; эти сплавы обладают также эффектом памяти формы
- **СПЛАВ ОЛАНДЕРА** состоит из золота и кадмия; он обладает также эффектом памяти формы
- **ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ** проявляется в способности сплава к обратимому мартенситному превращению; материал «запоминает» две формы: ниже и выше температуры мартенситного превращения; такие материалы используют в медицине и космической технике

Материалы, устойчивые к воздействию среды

Коррозионно- радиационно- и жаростойкие, жаропрочные, криогенные материалы

КОРРОЗИЯ — химическое разрушение металлов; коррозионная стойкость оценивается по потере массы образца за единицу времени в агрессивной среде

- **ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ** развивается под воздействием электролитов
- **ХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ** развивается под действием газов и неэлектролитов (нефтепродуктов)
- **КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ** — все благородные и многие тугоплавкие металлы, коррозионно-стойкие стали, сплавы титана и меди
- **КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ СТАЛИ** легированы элементами, образующими защитные пленки или повышающими электрохимический потенциал стали; хромистые коррозионно-стойкие стали содержат не менее 12% хрома, они устойчивы к атмосферной коррозии, в пресной и морской воде, в слабых электролитах (12Х13, 15Х28); хромоникелевые коррозионно-стойкие стали бывают аустенитные (12Х18Н9), аустенитно-ферритные (08Х22Н6Т) и аустенитно-мартенситные

РАДИАЦИЯ — облучение потоками элементарных частиц или электромагнитных волн; наиболее часто встречается облучение нейтронами, протонами, электронами и рентгеновскими лучами; радиационное разбухание наблюдается у многих металлов, оно сопровождается короблением и ухудшением механических свойств

- **РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ СТАЛИ** наименее других подвержены разбуханию; обычно это перлитные и ферритные высокохромистые стали, часто легированные Ti, Mo, Nb

НАГРЕВ ускоряет окисление, уменьшает прочность и вызывает ползучесть металла

- **ЖАРОСТОЙКОСТЬ** — способность металла не окисляться (не покрываться окалиной) при нагреве; жаростойкие стали легируют хромом и алюминием; 8% хрома повышают жаростойкость до 750 °С, 25% — до 1100 °С, 25% хрома + 5% алюминия — до 1300 °С
- **ЖАРОПРОЧНОСТЬ** — способность материала выдерживать нагрузки при высокой температуре в течение определенного времени; критерии жаропрочности — условный предел ползучести, предел длительной прочности и рабочие температуры материала
- **ПОЛЗУЧЕСТЬ** — медленная деформация металла при напряжениях ниже предела текучести, вызванная одновременным воздействием нагрузки и высокой температуры
- **УСЛОВНЫЙ ПРЕДЕЛ ПОЛЗУЧЕСТИ** — напряжение, вызывающее определенное удлинение образца за оговоренное время при заданной температуре
- **ПРЕДЕЛ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ** — напряжение, вызывающее разрушение образца за определенное время при заданной температуре
- **ЖАРОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ** бывают металлические (жаропрочные стали, никелевые и железоникелевые сплавы) и неметаллические (керамика, кварцевое стекло)
- **ЖАРОПРОЧНЫЕ СТАЛИ** имеют рабочие температуры 500–750 °С; они могут быть перлитными (котельная сталь 15К содержит 1,5% С), мартенситными (15Х11МФ), мартенситно-ферритными (сильхромы 40Х9С2, 40Х10С2М) и аустенитными (10Х18Н12Т)
- **ЖАРОПРОЧНЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ** имеют рабочие температуры до 850 °С; они содержат около 20% хрома, 1–5% алюминия, 1–3% титана, молибден, вольфрам и кобальт; сплав ХН77ТЮР содержит 20% хрома, 2,5% титана, 1% алюминия, 6% вольфрама и 0,01% бора
- **ЖАРОПРОЧНЫЕ ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ** — ХН35ВТЮ (до 0,08% С, 12–15% Cr, 3% Ti, рабочие температуры до 750 °С), ХН38ВТ (до 0,12% С, 20–23% Cr, 1% Ti, 3% W, до 1100 °С)

КРИОГЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ сохраняют пластичность и надежность ниже температуры кипения кислорода (-183 °С); сплавы титана и криогенные стали

- **КРИОГЕННЫЕ СТАЛИ** — низкоуглеродистые (содержат до 0,1% С) высококачественные никелевые стали (ОН6А, ОН9А), из них делают резервуары для сжиженных газов; некоторые сорта дорогих аустенитных сталей еще более морозостойчивы

Материалы с особыми тепловыми свойствами

СПЛАВЫ С МАЛЫМ ТЕПЛОВЫМ РАСШИРЕНИЕМ — железо-никелевые инварные сплавы с ярко выраженным магнитострикционным эффектом

- **МАГНИТОСТРИКЦИЯ** — изменение размеров ферромагнетика при его намагничивании; тепло-

вое расширение инварных сплавов компенсируется магнитострикционным эффектом

- ИНВАР содержит 64% Fe и 36% Ni; имеет малый коэффициент теплового расширения в интервале температур от 0 °С до 100 °С; хорошие механические, технологические и антикоррозионные свойства позволяют использовать его как конструкционный материал для деталей приборов, от которых требуется постоянство размеров; маркировка: 36Н
- СУПЕРИНВАР дополнительно легируют кобальтом и медью, что позволяет еще сильнее уменьшить коэффициент теплового расширения; маркировка: 32НҚД

СПЛАВЫ ДЛЯ ПАЙКИ СО СТЕКЛОМ имеют коэффициент теплового расширения такой же, как и стекло, что позволяет сохранять герметичность соединения в электровакуумных приборах (лампы, кинескопы) в рабочем интервале температур

- КОВАР содержит 29% Ni и 1% Co; до 420 °С имеет коэффициент теплового расширения такой же, как термостойкое стекло; этот сплав пластичен и хорошо обрабатывается давлением, он заменил вольфрам и молибден в электровакуумном производстве; 29НҚ
- ПЛАТИНИТ содержит 47% Ni и 1% Cu; имеет такой же коэффициент теплового расширения, как платина и нетермостойкое стекло, им заменяют дорогую платину; 47НД

БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛАСТИНЫ состоят из двух металлов с разным тепловым расширением; при нагреве изгибаются и разрывают контакт (терморегуляторы)

СПЛАВЫ С АНОМАЛЬНЫМ ТЕПЛОВЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ УПРУГОСТИ — железо-никелевые элинварные сплавы с механострикционным эффектом; при нагреве сохраняют свою упругость (обычно она уменьшается); позволяют устранить, например, температурную погрешность акустических приборов (камертонов, резонаторов)

- МЕХАНОСТРИКЦИЯ — разновидность магнитострикции, имеет ферромагнитное происхождение
- ЭЛИНВАР (36НХ) содержит 36% Ni и 12% Cr; имеет плохие механические свойства и термически не упрочняется; точка Кюри всего 100 °С, поэтому у элинвара малый рабочий интервал температур; дополнительное легирование позволяет улучшить элинвар
- СПЛАВ 36НХТЮ легирован титаном и алюминием, что позволяет упрочнять его термообработкой, но еще сильнее снижает точку Кюри; его используют как сплав с хорошими упругими свойствами для пружин и упругих элементов, от которых требуются немагнитность и высокая коррозионная стойкость в агрессивных средах
- ЭЛИНВАРНЫЕ СПЛАВЫ обычно содержат, кроме железа, около 5% Cr и 43% Ni; термоупругий коэффициент таких сплавов близок к нулю; повышенное содержание никеля увеличивает точку Кюри, что расширяет их область применения; для улучшения механических свойств элинвары дополнительно легируют титаном и алюминием, после чего их можно упрочнять термически; содержание углерода в элинварных сплавах должно быть минимальным; эти сплавы обладают хорошими антикоррозионными свойствами и, что особенно важно для упругих материалов, малым внутренним трением
- СПЛАВЫ 42НХТЮ и 44НХТЮ для получения минимальных значений термоупругого коэффициента и уменьшения внутреннего трения подвергают термической обработке: закалке от 950 °С, при которой избыточные фазы растворяются в аустените, и последующему старению при 700 °С в течение 4 часов; однако эти сплавы очень чувствительны к девиациям химического состава, что требует высокой культуры их выплавки

Наноматериалы

НАНОМАТЕРИАЛЫ состоят из ультрадисперсных (менее 100 нм хотя бы в одном из измерений) фаз; их свойства уникальны из-за наличия чрезвычайно развитой внутренней поверхности фазового раздела (например, наномедь прозрачна, а нанокремний — проводник); основные потребители наноматериалов — электроника, медицина, фармацевтика и биология; получают такие материалы с помощью нанотехнологий, оперирующих мельчайшими частицами вещества

НАНОТЕХНОЛОГИИ уже сегодня сталкиваются с фундаментальными физическими ограничениями: дальнейшему прогрессу в этой области мешают квантовые эффекты, ограниченность скорости света, дифракционные явления

- **ИДЕАЛЬНАЯ НАНОТЕХНОЛОГИЯ** — непосредственная сборка материала с заданными свойствами из атомов и молекул — дело будущего, сейчас нет нужных инструментов
- **РЕАЛЬНЫЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ** оперируют более крупными, чем атомы и молекулы, объектами; материал или собирают из наночастиц, или диспергируют макроматериалы
- **ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ** также оперируют нанообъектами, но не напрямую, а используя физические законы самоорганизации материи; иногда грань между химическими и нанотехнологиями становится весьма эфемерной
- **СОВРЕМЕННАЯ НАНОТЕХНОЛОГИЯ** отличается от традиционных технологий тем, что она соединяет талант химика-синтетика и физика-теоретика с мастерством инженера, и именно этот союз позволяет создавать самые замысловатые наноструктуры; переход от традиционных макро- и микротехнологий к нанотехнологиям означает создание нанопроductов и наносистем, обеспечивающих существенную экономию сырья и энергии и открывающих путь к более эффективному решению экологических проблем

КЛАССИФИКАЦИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ осуществляется по их происхождению (естественные и искусственные), по назначению (функциональные, композиционные и конструкционные), а также по структуре (нуль-, одно-, двух- и трехмерные)

- **ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ** — природные пористые наноструктуры (кремний, оксид алюминия) — обладают огромной внутренней фазовой поверхностью, определяющей многие их свойства (например, фото- и электролюминесценцию пористого кремния); их используют в оптоэлектронике, при изготовлении тонких фильтров и мембран
- **ИСКУССТВЕННЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ** — это, прежде всего, различные углеродные наноструктуры, называемые фуллеренами (большие геометрически правильные молекулы углерода); фуллерены бывают развернутые (графен) и свернутые (нанотрубки)
 - **ГРАФЕН** — атомарный слой, состоящий из гексагональных углеродных ячеек (двумерная модификация графита); это самый тонкий из известных материалов с уникальными свойствами
 - **УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ** бывают одностенные (свернутый графен) и многостенные (концентрически вставленные друг в друга одностенные трубки); они обладают огромной тепло- и электропроводностью, рекордной прочностью (в десятки раз превосходящей прочность лучших сортов стали); нанотрубки используют в оптической электронике (энергосберегающие дисплеи), в наноэлектронике (диоды, транзисторы) и других областях

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ НАНОМАТЕРИАЛОВ — нанокластеры, наночастицы, нанокристаллы, нанотрубки, нановолокна, нанодисперсии (коллоиды), наноструктурированные поверхности и пленки, многообразные нанопористые структуры

- **НАНОКЛАСТЕРЫ** имеют размер 1–5 нм и содержат до 1000 атомов
- **НАНОЧАСТИЦЫ** имеют размер 5–100 нм и содержат 10^3 – 10^8 атомов

Глава 8. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Проводники

ПРОВОДНИКИ имеют удельное сопротивление до 10 мкОм·м; их классифицируют по агрегатному состоянию (твердые, жидкие, газообразные, плазма), по типу проводимости (проводники первого и второго рода) и по удельному сопротивлению (материалы высокой проводимости и сплавы с большим сопротивлением)

- **ПРОВОДНИК ПЕРВОГО РОДА** имеет электронную проводимость (жидкие и твердые металлы)
- **ПРОВОДНИК ВТОРОГО РОДА** обладает ионным типом проводимости (электролиты); электрический ток в проводниках второго рода сопровождается переносом вещества

МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ имеют удельное сопротивление до 0,05 мкОм·м; это серебро (0,016 мкОм·м), медь (0,017 мкОм·м), золото (0,024 мкОм·м), алюминий (0,028 мкОм·м), сверхпроводники и криопроводники

- **СВЕРХПРОВОДНИКИ** полностью теряют электрическое сопротивление при критических значениях температуры и напряженности магнитного поля; сверхпроводимость обнаружена как у металлических, так и у неметаллических материалов
- **КЛАССИФИКАЦИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВ** осуществляется по физико-механическим характеристикам (мягкие и жесткие), по термодинамическим параметрам (первого, второго и третьего рода) и по температуре перехода в сверхпроводящее состояние (обычные и высокотемпературные); высокотемпературные сверхпроводники переходят в сверхпроводящее состояние при температурах выше температуры кипения кислорода (-183 °С); керамика с иттрием Y-Ba-Cu-O сохраняет сверхпроводимость до -163 °С при плотности тока 1 А/м² (сегодня это уже не рекорд)
- **КРИОПРОВОДНИКИ** приобретают высокую проводимость при глубоком охлаждении; из них делают жилы кабелей, охлаждаемых жидким водородом (-253 °С), неоном (-246 °С) или азотом (-196,6 °С); сверхчистые алюминий, медь и бериллий после отжига

СПЛАВЫ С БОЛЬШИМ УДЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ (более 0,3 мкОм·м) применяют в электроизмерительных и нагревательных приборах, реостатах и других устройствах; манганин, константан, нихром, нейзильбер, фехрали и хромали

- **МАНГАНИН** содержит 85–89% меди, 11–13% марганца и 2–4% никеля; его удельное сопротивление (0,4–0,5 мкОм·м) достаточно стабильно от -100 °С до 100 °С; резисторы точных приборов
- **КОНСТАНТАН** содержит 56–59% меди, 1–2% марганца и 39–41% никеля; его удельное сопротивление (0,5 мкОм·м) почти не зависит от температуры; прочен (500 МПа), пластичен (15%) и технологичен (микропровода, лента, фольга); используют его в реостатах и нагревателях
- **ФЕХРАЛИ** — сплавы на железной основе, содержащие 12–25% Cr, 4–7% Al и до 1% Si и Mn; их удельное сопротивление 1,4 мкОм·м при прочности 800 МПа, рабочая температура до 1200 °С; это коррозионностойкие и технологичные сплавы, из них делают нагреватели и реостаты
- **ХРОМАЛИ** по составу и свойствам близки к фехралям; железная основа, 22–28% Cr и 4–6% Al

СПЛАВЫ ДЛЯ ТЕРМОПАР дают при правильном подборе пары большую термо-ЭДС; наиболее часто применяют алюмель (95% Ni и 5% Al), копель (Cu-Ni-Mn), хромель (90% Ni и 10% Cr), константан и платинородий (90% Pt и 10% Rh)

- **ТЕРМОПАРА** — датчик температуры, состоящий из двух соединенных между собой разнородных проводников; если контакты (спаи) термопары находятся при разных температурах, то в цепи возникает термо-ЭДС, по величине которой определяют температуру горячего контакта

КОНТАКТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ — сплавы тугоплавких и благородных металлов (Au-Ag, Pt-Rh), металлокерамика (Ag-CdO, Cu-C, Ag-C), уголь электротехнический; высокая коррозионная и эррозионная стойкость, малое удельное сопротивление

- **УГОЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ** состоит из сажи, графита, антрацита и связки; скользящие контакты, электроды прожекторов и дуговых печей, аноды гальванических элементов

Диэлектрики

ДИЭЛЕКТРИК — материал с удельным сопротивлением более 10^8 Ом·м; важной особенностью диэлектриков является их поляризация в электрическом поле; диэлектрики бывают полярные и неполярные, пассивные и активные

- **ПОЛЯРИЗАЦИЯ** — смещение зарядов в атомах или молекулах под действием электрического поля; поляризация бывает вынужденная и спонтанная, электронная (быстрая) и ионная

СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ — электрическая прочность, сквозная и поверхностная проводимость, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери

- **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ** — напряженность поля, при которой наступает пробой диэлектрика; пробой может быть сквозной или поверхностный
- **СКВОЗНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ** связана с наличием небольшого количества свободных зарядов в диэлектрике, она вызывает сквозной ток утечки
- **ПОВЕРХНОСТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ** связана с наличием загрязнений и влаги на поверхности диэлектрика, она может значительно превышать сквозную проводимость
- **ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ** показывает, во сколько раз взаимодействие зарядов в вакууме сильнее, чем в материале
- **ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ** — потери мощности в диэлектрике, вызванные наличием сквозного тока утечки и поляризации; электрическая энергия переходит в тепловую

ПОЛЯРНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК — материал с ионным типом поляризации; диэлектрическая проницаемость у полярных диэлектриков большая (до 200); слюда, керамика

НЕПОЛЯРНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК — материал с электронным типом поляризации; диэлектрическая проницаемость мала (до 6); алмаз, парафин, полиэтилен

ПАССИВНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ имеют диэлектрические свойства, слабо зависящие от внешних условий; их обычно используют для электроизоляции

- **ОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ** — полимеры, пластмассы, резины...
- **НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ** — слюда, керамика, стекло...
- **ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА** — фарфор электротехнический, стеатитовая керамика
- **ФАРФОР ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ** — керамика на основе каолина, кварца, шпата, гипса, пегматита; из него делают изоляторы на линиях электропередач
- **СТЕАТИТОВАЯ КЕРАМИКА** изготавливается на основе талька; большое сопротивление и малые диэлектрические потери; высоковольтные изоляторы, работающие на высоких частотах

АКТИВНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ имеют диэлектрические свойства, сильно зависящие от внешних условий; сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты, жидкие кристаллы

- **СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК** обладает спонтанной поляризацией; имеет огромную диэлектрическую проницаемость, зависящую от температуры и напряженности внешнего электрического поля; керамика BaTiO_3 , KNbO_3 ; емкие конденсаторы, усилители, модуляторы
- **ПЬЕЗОЭЛЕКТРИК** имеет электрические свойства, сильно зависящие от механических напряжений; кварц монокристаллический, некоторые виды керамики; резонаторы, микрофоны, детонаторы, датчики давлений
- **ЭЛЕКТРЕТ** долго сохраняет остаточную поляризацию и создает вокруг себя электрическое поле; пленки лавсана, фторопласт; микрофоны, телефоны, дозиметры
- **ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ** — оптические свойства зависят от электромагнитных полей

Полупроводники

ПОЛУПРОВОДНИК имеет удельное сопротивление 10^{-5} – 10^8 Ом·м; важной особенностью полупроводников является зависимость их сопротивления от внешних воздействий, что позволяет использовать полупроводниковые элементы в цепях управления для преобразования сигналов различной природы в электрические

- ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ используют зависимость сопротивления полупроводника от различных внешних воздействий: температуры (терморезистор), освещения (фоторезистор), механических напряжений (тензорезистор), напряженности электрического поля (варистор)

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ — бывают простые и сложные, собственные и примесные, электронные и дырочные полупроводники

- ПРОСТОЙ ПОЛУПРОВОДНИК — чистый химический элемент — германий, кремний, селен, теллур; для получения качественных изделий нужны сверхчистые монокристаллы (в первую очередь кремния и германия) с идеальной кристаллической структурой; для получения нужного типа проводимости кристаллы точнейшим образом легируют
- СЛОЖНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК — полупроводниковое химическое соединение (чаще всего бинарное) или полупроводниковый комплекс
- БИНАРНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ состоят из двух компонентов; это нитриды, карбиды, фосфиды, арсениды (соединения с мышьяком) и антимониды (с сурьмой)
- КАРБИД КРЕМНИЯ (SiC) получают восстановлением кварцевого песка углеродом; монокристаллы до 1 см в поперечнике выращивают при температуре 2500°C в аргоне; рабочая температура карбида кремния до 700°C ; он очень тверд, химически инертен (при комнатной температуре не взаимодействует ни с одной кислотой), не окисляется на воздухе до 1400°C ; из карбида кремния делают варисторы, светодиоды, транзисторы, терморезисторы
- АРСЕНИД ГАЛЛИЯ (GaAs) обладает высокой скоростью перемещения электронов и поэтому способен работать на высоких частотах; из него делают светодиоды, туннельные диоды, диоды Ганна, транзисторы, солнечные батареи, инжекционные лазеры; это самый перспективный полупроводниковый материал, несмотря на сложность его получения
- АНТИМОНИД ИНДИЯ (InSb) имеет высокую подвижность электронов; из него делают детекторы инфракрасного света, тензометры
- АНТИМОНИД ГАЛЛИЯ (GaSb) очень чувствителен к механическим напряжениям; тензометры...
- ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ КОМПЛЕКС содержит проводящую или полупроводниковую фазу и керамическую связку; тирит, силит...
- СОБСТВЕННЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК сам себя обеспечивает электронами проводимости; содержание примесей в нем ничтожно; при очень низких температурах вырождается в диэлектрик, так как все электроны в нем становятся связанными
- ПРИМЕСНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК получает электроны проводимости от примесей и дефектов решетки; большинство используемых в технике полупроводников примесные
- ПРИМЕСИ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ — доноры (отдают электроны и обеспечивают электронную проводимость) и акцепторы (забирают электроны, что приводит к дырочной проводимости)

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ — получение сверхчистого монокристалла и его дозированное микролегирование (диффузионное, ионное)

- ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ — дисцилляция (испарение жидкой фазы), ректификация (многократное испарение и конденсация) и сублимация (испарение твердой фазы)
- КРИСТАЛЛОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ — метод направленной кристаллизации, метод вытягивания монокристалла из расплава, метод бестигельной зонной очистки, метод эпитаксии
- МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ позволяет получить в чистом полупроводниковом монокристалле электронно-дырочный *p-n* переход; концентрация вводимых элементов 10^{-5} – 10^{-7} %; степень легирования (также, как и степень очистки кристалла) контролируют по его электросопротивлению

Магнитные материалы

СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ — намагниченность, магнитная проницае-

мость, коэрцитивная сила, потери на перемагничивание, рабочие частоты...

- **НАМАГНИЧЕННОСТЬ** — магнитный момент единицы объема материала $J=(m-1)H$, где m — магнитная проницаемость, $(m-1)$ — магнитная восприимчивость, H — напряженность внешнего магнитного поля; измеряется намагниченность, как и напряженность, в А/м
- **КОЭРЦИТИВНАЯ СИЛА** — напряженность внешнего магнитного поля, размагничивающая намагниченный до насыщения материал; по ней можно судить о «силе» магнита

ПО МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ все материалы разделяют на 5 классов

- **ДИАМАГНИТНЫЙ МАТЕРИАЛ** имеет небольшую отрицательную магнитную восприимчивость, не зависящую от величины магнитного поля и температуры; медь, свинец, золото, серебро
- **ПАРАМАГНИТНЫЙ МАТЕРИАЛ** имеет небольшую положительную магнитную восприимчивость, не зависящую от величины магнитного поля, но зависящую от температуры; щелочные и щелочноземельные металлы, некоторые переходные элементы
- **ФЕРРОМАГНИТНЫЙ МАТЕРИАЛ** имеет большую магнитную восприимчивость, сильно зависящую от величины магнитного поля и температуры; магнитные моменты соседних атомов внутри доменов параллельны (складываются), поэтому суммарная намагниченность материала велика; ферромагнитны железо, никель, кобальт и многие редкоземельные элементы
- **АНТИФЕРРОМАГНИТНЫЙ МАТЕРИАЛ** имеет небольшую магнитную восприимчивость, зависящую от температуры; магнитные моменты соседних атомов внутри доменов направлены навстречу (вычитаются), поэтому суммарная намагниченность материала мала; хром, марганец
- **ФЕРРИМАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ** имеют большую магнитную восприимчивость, зависящую как от величины магнитного поля, так и от температуры; магнитные моменты соседних атомов хотя и направлены навстречу друг другу, но не уравновешены, поэтому суммарная намагниченность может быть значительной; ферримагнетизмом обладают некоторые ферриты

ПО КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЕ — магнитно-мягкие и магнитно-твердые материалы

- **МАГНИТНО-МЯГКИЙ МАТЕРИАЛ** — ферромагнетик, намагничивающийся до насыщения в слабых полях; большая (до 10000) магнитная проницаемость и малая (до 8 А/м) коэрцитивная сила; потери на перемагничивание малы: сердечники катушек электромагнитов, пластины электрических машин; низкочастотные (рафинированное железо, электротехническая сталь, пермаллой, альсиферы) и высокочастотные (ферриты)
- **ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ ЖЕЛЕЗО** очищено электролизом, оно содержит углерода до 0,02% и имеет коэрцитивную силу около 28 А/м; дополнительная переплавка в вакууме позволяет уменьшить концентрацию углерода до 0,01% и коэрцитивную силу до 7 А/м
- **КАРБОНИЛЬНОЕ ЖЕЛЕЗО** получают путем термического разложения карбонила $\text{Fe}(\text{CO})_5$ в вакууме с последующим спеканием полученного порошка; оно содержит всего 0,005% углерода и имеет коэрцитивную силу 6 А/м; технология получения такого железа сложная и дорогая
- **ПЕРМАЛЛОЙ** — сплав никеля (45–83)% с железом и другими элементами; коэрцитивная сила 16 А/м, рабочие частоты до 25 кГц; его применяют в радиоаппаратуре и телефонии
- **АЛЬСИФЕР** — сплав $\text{Fe}-\text{Al}(5\%)-\text{Si}(10\%)$; коэрцитивная сила 2 А/м, очень малы потери на перемагничивание; альсифер нетехнологичен: тверд и хрупок, получают его литьем
- **ФЕРРИТЫ** — оксидная керамика с большим удельным сопротивлением; ферритные антенны, сердечники высокочастотных контуров, покрытия магнитных пленок, дисков, головок, мелкие постоянные магниты; твердые и хрупкие, получают по порошковой технологии; $\text{FeO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$
- **МАГНИТНО-ТВЕРДЫЙ МАТЕРИАЛ** — ферро- или ферримагнетик с большой (до 300 кА/м) коэрцитивной силой; потери энергии на перемагничивание большие; сплавы системы $\text{Fe}-\text{Ni}-\text{Al}$, ферриты и редкоземельные металлы, высокоуглеродистые стали, платинакс
- **МАГНИТНО-ТВЕРДАЯ СТАЛЬ** — высокоуглеродистая сталь с мартенситно-цементитной структурой (после закалки и низкого отпуска); коэрцитивная сила достигает 13 кА/м; EX3, EX5K5
- **ПЛАТИНАКС** — магнитно-твердый материал, состоящий на 78% из платины и на 22% из кобальта; обладает рекордно высокой (320 кА/м) коэрцитивной силой

Рекомендуемая литература

1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. — Москва : Машиностроение, 1990. — 528 с.
2. Материаловедение / под ред. Б. Н. Арзамасова. — Москва : МГТУ, 2005. — 648 с.
3. Пятов, В.В. Материаловедение : конспект лекций / В. В. Пятов, С. В. Бровко. — Витебск: УО «ВГТУ», 2011. — 48 с.
4. Материаловедение. Основные термины и понятия / В. В. Пятов [и др.]. — Витебск : ВГТУ, 2000. — 106 с.
5. Пятов, В. В. Материаловедение и обработка материалов : электронный учебник / В. В. Пятов. — Витебск : ВГТУ, 2005.
6. Пятов, В. В. Материаловедение и защита от коррозии : электронный курс лекций / В. В. Пятов. — Витебск : ВГТУ, 2006.
7. Материаловедение : методические указания и контрольные задания для студентов-заочников машиностроительных специальностей вузов / Н. Е. Гарбузова [и др.]. — Москва, 1988.

Учебное издание

Пятов Владислав Владимирович

Бровко Сергей Владимирович

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Конспект лекций

Редактор *А. К. Новиков*

Технический редактор *В. В. Савицкий*

Корректор *Е. М. Богачева*

Компьютерная верстка *Н. Н. Матвеева*

Подписано к печати 04.03.11. Формат 60×90 1/16. Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Franklin Gothic». Усл. печ. листов 1,6. Уч.–изд. листов 4,5. Тираж 217 экз. Заказ № 93.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210035, Витебск, Московский проспект, 72

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 года.