

В. В. Пятов, А. Н. Голубев

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Материаловедение и обработка материалов.
Материаловедение и защита от коррозии.
Конструкционные и электротехнические материалы**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

Витебск
2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

В. В. Пятов, А. Н. Голубев

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Материаловедение и обработка материалов.
Материаловедение и защита от коррозии.
Конструкционные и электротехнические материалы**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

для студентов специальностей 1-36 01 01 «Технология машиностроения»,
1-36 07 02 «Производство изделий на основе трёхмерных технологий»,
1-36 08 01 «Машины и аппараты лёгкой, текстильной промышленности и
бытового обслуживания», 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация
энергооборудования организаций» и 1-53 01 01 «Автоматизация
технологических процессов и производств»

Витебск
2018

УДК 620.22
ББК 30.3
П 99

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Технология текстильных материалов» УО «ВГТУ» Рыклин Д. Б.,

член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор
технических наук, директор ГНУ «Институт технической акустики
Национальной академии наук Беларуси» Рубаник В. В.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО «ВГТУ», протокол № 7 от 27.10.2017.

Пятов, В. В.

П99 **Материаловедение. Материаловедение и обработка материалов. Материаловедение и защита от коррозии. Конструкционные и электротехнические материалы : конспект лекций / В. В. Пятов, А. Н. Голубев. — Витебск : УО «ВГТУ», 2018. — 59 с.**
ISBN 978–985–481–533–6

Конспект лекций содержит необходимый минимум информации по дисциплинам «Материаловедение», «Материаловедение и защита от коррозии», «Материаловедение и обработка материалов», «Конструкционные и электротехнические материалы». Издание облегчает понимание и ускоряет изучение соответствующего курса. Предназначено для студентов специальностей 1-36 01 01 «Технология машиностроения», 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трёхмерных технологий», 1-36 08 01 «Машины и аппараты лёгкой, текстильной промышленности и бытового обслуживания», 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» и 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств».

УДК 620.22

ББК 30.3

ISBN 978–985–481–533–6

© УО «ВГТУ», 2018

Содержание

Введение	4
Лекция 1. История материаловедения	5
Лекция 2. Свойства материалов	8
Лекция 3. Состояния материалов	10
Лекция 4. Состав и структура материала	12
Лекция 5. Методы исследования материалов	14
Лекция 6. Кристаллизация металлов и сплавов	16
Лекция 7. Диаграммы состояния сплавов	18
Лекция 8. Деформация металлов	20
Лекция 9. Термическая обработка металлов	22
Лекция 10. Черные металлы	24
Лекция 11. Медь и никель	26
Лекция 12. Легкие металлы	28
Лекция 13. Благородные и тугоплавкие металлы	31
Лекция 14. Неметаллические материалы	33
Лекция 15. Технические жидкости и газы	35
Лекция 16. Материалы с особыми свойствами	37
Лекция 17. Износостойкие материалы	39
Лекция 18. Композиционные материалы	41
Лекция 19. Электротехнические материалы	43
Лекция 20. Защита металлов от коррозии	46
Лекция 21. Наноматериалы	48
Лекция 22. Адаптивные материалы	54
Литература	58

Введение

В курсе «Материаловедение» изучают материалы, используемые в современном машино- и приборостроении, энергетике и электронике. Это металлы, полимеры, керамика и стекло, проводники и диэлектрики, полупроводники и магнитные материалы.

Материаловедение изучает связи между свойствами, составом и структурой материалов. Различают теоретическое и прикладное материаловедение.

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.

Связь между свойствами материала и его химическим составом представляется достаточно очевидной. Действительно, трудно ожидать одинаковых свойств от таких разных материалов, как сталь, пластмасса, керамика или стекло.

Менее очевидна связь между свойствами и структурой материала. Например, углерод может существовать как в виде очень мягкого графита, так и в виде чрезвычайно твердого алмаза. А ведь эти два материала различаются только своей кристаллической структурой, химический состав у них одинаков! Более того, углерод также может существовать в форме гибких и жестких волокон, тончайшего электропроводного графена или чрезвычайно прочных углеродных нанотрубок.

Цель изучения дисциплины – научиться по заданным свойствам проектируемого изделия выбирать для него материал нужного состава и посредством термической, механической или какой-либо другой обработки придавать ему оптимальную для конкретных условий эксплуатации структуру.

Задача выбора материала по его химическим, физическим, механическим, экологическим и экономическим свойствам обычно сложна и не всегда имеет хотя бы одно решение. Например, мощность современных реактивных двигателей, от которой зависит прогресс в авиакосмической промышленности, ограничена жаропрочностью лопаток турбин. У нас пока нет материалов с необходимыми военными свойствами, их еще предстоит создать.

Часто задача поиска нужного материала имеет несколько альтернативных решений и приходится выбирать оптимальный по каким-либо критериям вариант. Обычно критерием выбора выступает себестоимость или долговечность изделия, но возможны и другие (например, экологические) соображения. Для решения такой задачи требуются не только хорошие теоретические знания по материаловедению, но и большой практический опыт. От грамотного выбора материалов зависит экономический успех предприятий.

Лекция 1. История материаловедения

История известная – каменный век, бронзовый век, железный век...

3 000 000 лет назад приматы встали на ноги и освободили руки для работы. 1 000 000 лет назад у них появились каменные орудия. 500 000 лет назад был покорен огонь; материалы начали нагревать. Появилась посуда из обожженной глины; керамика – первый искусственный материал, полученный человеком. Совершенствовались орудия: ковать горячие металлы стало легче.

200 000 лет назад в Африке сформировался современный человек *Homo sapiens*. Около 40 000 лет назад многочисленные африканские мигранты начали заселять Европу и растворили в себе проживавших там неандертальцев.

10 000 лет назад появились украшения из самородного золота и меди. Для изготовления орудий эти мягкие металлы не годились, да и было их мало.

5 000 лет назад у первобытных людей появилась оловянная бронза и начала зарождаться металлургия. Это был первый сплав, освоенный человечеством. Бронзовые орудия были значительно прочнее и тверже медных.

Около 4 000 лет назад люди начали ковать железо и наступил железный век. Плавить железо тогда не умели, огонь открытого костра не давал нужной температуры. В 14 веке в Европе были построены первые доменные печи, в которых из руды выплавляли чугун.

В 1688 году голландец Левенгук изобрел (точнее, сильно модифицировал) микроскоп. Его работы открыли людям невидимый и удивительный микромир. Анализ микроструктур стал основным методом исследования материалов.

В 1763 году Михаил Ломоносов издал первый в России учебник горнозаводского дела, в котором изложил, как надо добывать руду и извлекать из нее металл. Это позволило организовать подготовку горных инженеров централизованно в университетах (а не на местах у мастеров).

В 1825 году датчанин Ганс Эрстед получил легкий металл – алюминий. Без сплавов алюминия не было бы современной авиации.

В 1831 году великий русский металлург Павел Петрович Аносов, исследуя сталь под микроскопом, обнаружил у нее структуру; при большом увеличении сталь уже не казалась однородной. В 1841 году он издал книгу «О булатах», в которой раскрыл утерянный в средние века секрет изготовления булатных сталей.

В 1856 году англичанин Генри Бессемер изобрел конвертерный способ выплавки стали, а в 1864 году француз Пьер Мартен впервые выплавил сталь в регенеративной пламенной печи. Развивающаяся промышленность получила недорогую и качественную сталь.

В 1864 году Дмитрий Иванович Менделеев создал периодическую систему химических элементов, а в 1871 году издал свою знаменитую книгу «Основы химии».

В 1867 году швед Альфред Нобель изобрел динамит. Промышленность наконец получила доступную взрывчатку и началась масштабная разработка земных недр.

В 1868 году Дмитрий Константинович Чернов открыл фазовые превращения в стали (точки Чернова); начала развиваться термообработка.

В 1876 году американец Виллард Гиббс опубликовал основы современной термодинамики. Теоретическое материаловедение получило мощный толчок.

В 1896 году немец Вильгельм Конрад Рентген открыл удивительные пронизывающие материю лучи. Вскоре появился новый метод исследования материалов — рентгенография. Без него немыслимы современная медицина, материаловедение и многие другие науки.

В 1896 году француз Анри Беккерель открыл радиоактивность. Супруги Пьер и Мария Кюри начали ее изучать и нашли новые элементы — радий и полоний; они стали первыми жертвами неизвестной тогда лучевой болезни.

В 1897 году англичанин Джозеф Джон Томсон (лорд Кельвин) открыл существование электронов, а шотландец Чарльз Вильсон своей «туманной камерой» сумел зафиксировать их следы.

В 1900 году швед Август Бринелль предложил измерять твердость металла вдавливанием в него шарика; этот метод актуален и в наши дни.

В 1908 году британский физик Эрнест Резерфорд открыл процесс деления атома; начался атомный век, породивший новую энергетику и новое оружие.

В 1911 году голландский физик Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости. Зародилось новое направление — материаловедение сверхпроводников.

В 1912 году немец Макс Лауэ обнаружил дифракцию рентгеновских лучей в кристаллической решетке; начала развиваться наука о тонком строении вещества — кристаллография.

В 1913 году датчанин Нильс Бор построил планетарную модель атома, связавшую химические свойства элемента с числом электронов на внешней орбите атома.

В 1918 году поляк Ян Чохральский изобрел эффективный метод выращивания монокристаллов, используемый ныне при производстве монокристаллического кремния.

В 1925 году немцы Вернер Гейзенберг и Эрвин Шредингер создали основы квантовой механики; без нее трудно представить современную физику.

В 1927 году немец Арнольд Зоммерфельд, применив квантовую механику, построил теорию электронного газа в металлах, объясняющую их особенности.

В 1932 году швед Арне Оландер обнаружил в сплаве Au–Cd память формы. Сейчас сплавы с памятью формы (главным образом нитинолы) используют в медицине, космонавтике и многих других областях.

В 1932 году немец Эрнст Август Руска создал электронный микроскоп. Сейчас это основной инструмент исследования наноструктур.

В 1935 году был создан нейлон и начала бурное развитие полимерная промышленность. Затем были получены прочнейшие арамидные волокна — кевлар и тварон; это отличная арматура для легких и прочных композитов.

В 1942 году итальянец Энрико Ферми запустил в Чикаго первый экспе-

риментальный ядерный реактор, а уже через три года, в 1945 году, США взорвали над Японией атомные бомбы.

В 1948 году был создан первый полупроводниковый транзистор и наступил кремниевый век. С тех пор прошло всего 70 лет!

В 1953 году шведы получили из графита искусственный алмаз. Появился сверхтвердый инструмент, расширяющий возможности металлообработки.

В 1954 году в СССР (г. Обнинск) была запущена первая в мире атомная электростанция, а в США была спущена на воду первая атомная подводная лодка (в СССР такая лодка появилась в следующем году) и взорвана первая термоядерная (водородная) бомба (атолл Бикини).

В 1958 году американец Джек Килби создал микросхему. Зарождающаяся микроэлектроника потребовала сверхчистый монокристаллический кремний. Эта задача была успешно решена: были получены монокристаллы, примеси в которых можно сосчитать по отдельным атомам! Таких чистых веществ в природе не существует.

В 1959 году известный американский физик Ричард Фейнман указал на перспективность развития нанотехнологий. В своем докладе он отметил, что в наном мире чрезвычайно много свободного места, надо лишь научиться его грамотно использовать. Но тогда для этого не было инструментов.

В 1970 году создано оптическое волокно и зародились глобальные сети.

В 1971 году создан микропроцессор «Интел», содержащий всего 2250 транзисторов. Сейчас микропроцессоры содержат миллиарды транзисторов!

В 1985 году открыто существование углеродных наноструктур — фуллеренов. В 1991 году были получены прочнейшие углеродные нанотрубки.

В 1986 году была обнаружена высокотемпературная сверхпроводимость. Некоторые виды керамики переходят в сверхпроводящее состояние при температурах, превышающих температуру кипения кислорода (90 К).

В 2004 году был синтезирован графен (двумерная кристаллическая модификация графита с уникальными свойствами) и начали развиваться нанотехнологии. Сбываются предсказания Ричарда Фейнмана, сделанные им в далеком 1959 году!

Перспективы материаловедения — наноматериалы, термоядерный синтез.

Наноматериалы собирают из атомов и молекул физическими методами по заданной схеме. Пока это в основном углеродные и кремниевые структуры.

Термоядерный синтез позволит получать любые химические элементы прямым слиянием легких атомных ядер в более тяжелые. Такая реакция сопровождается выделением колоссальной энергии, способной покрыть все наши потребности. Сейчас мы можем запустить термоядерную реакцию (взорвать водородную бомбу), но не умеем ее контролировать. Пока ближайшим к нам термоядерным реактором остается Солнце, в недрах которого водород превращается в гелий. Для синтеза более тяжелых элементов нужны более крупные звезды. От успехов в освоении термоядерного синтеза и создании термоядерной энергетики зависит существование нашей цивилизации, ведь ресурсы планеты не бесконечны.

Лекция 2. Свойства материалов

Свойства делят на технологические, физико-химические и механические.

Технологические свойства определяют возможность обработки материала каким-либо методом: литьем, давлением, резанием, сваркой, закалкой...

Литейные свойства зависят в основном от жидкотекучести металла. Сплавы с хорошей жидкотекучестью (чугуны, латуни) называют литейными, из них отливают большие фасонные изделия (станины станков). Металлы с плохой жидкотекучестью (стали, медь) позволяют отливать лишь простые заготовки.

Реакция сплава на закалку зависит от закаливаемости и прокаливаемости.

Закаливаемость оценивают по увеличению прочности и твердости закаленного металла. Закаливаемость стали растет с увеличением содержания углерода.

Прокаливаемость — максимально возможная толщина закаленного слоя. Прокаливаемость углеродистых (нелегированных) сталей всего 12 мм.

Физические свойства — плотность, температура плавления, электрические, магнитные, оптические и другие свойства.

По плотности металлы делят на легкие и тяжелые.

Лёгкие металлы, т/м³ — Mg = 1,74; Be = 1,85; Al = 2,7; Ti = 4,5.

Тяжелые металлы, т/м³ — Ir и Os ≈ 22,6; Pt и Re ≈ 21; Au, W и U ≈ 19.

По температуре плавления металлы делят на легкоплавкие и тугоплавкие.

Легкоплавкие металлы, °C — Hg = -39; Cs = 29; Sn = 232; Pb = 327.

Тугоплавкие металлы, °C — W ≈ 3400; Re ≈ 3200; Os и Ta ≈ 3000.

Химические свойства — коррозионная стойкость, жаростойкость, кислотостойкость, влагостойкость и др.

Коррозионная стойкость зависит от электрохимического потенциала металла и его склонности к пассивации.

Металлы с большим электрохимическим потенциалом называют благородными. Благородны Ag, Au, Pt, Ir, Os и некоторые другие металлы.

Пассивация — образование на поверхности металла окисной пленки, защищающей его от дальнейшего окисления. На воздухе пассивируются Ti, Al, Ni, Cr и многие другие металлы.

Механические свойства определяют сопротивление материала внешним нагрузкам; это прочность, пластичность, упругость, жесткость, твердость и др.

Прочность — сопротивление разрушению. Прочность бывает статическая, динамическая, удельная, усталостная и конструкционная.

Статическая прочность характеризует сопротивление материала постоянным и медленно изменяющимся нагрузкам. Ее критерии — предел текучести и временное сопротивление материала.

Напряжение, при котором начинается пластическая деформация, называют условным пределом текучести ($\sigma_{0,2}$). Это начало разрушения. После снятия этого напряжения остаточная деформация образца составляет 0,2 %.

Напряжение, при котором разрушение завершается, называют временным сопротивлением (σ_B), пределом прочности или просто прочностью. Например,

говорят, что прочность большинства сталей лежит в диапазоне 1–2 ГПа, а прочность стеклянных и углеродных волокон достигает 4 ГПа.

Динамическая прочность характеризует сопротивление материала удару. Основным критерий — ударная вязкость материала КС.

Ударная вязкость — удельная работа разрушения образца ударом копра.

Удельная прочность — свободная длина стержня, при которой он рвется под собственным весом. Равна временному сопротивлению, деленному на удельный вес материала. Удельная прочность бериллия – 37 км, титана – 30 км, лучшей стали – 27 км.

Усталость металла проявляется в деградации его структуры и свойств при циклическом нагружении. Повторяющиеся нагрузки вызывают развитие усталостной трещины. Усталость металла привела в 2009 году к катастрофе на Саяно-Шушенской ГЭС. Основным критерий усталостной прочности называют пределом выносливости.

Предел выносливости — напряжение, разрушающее материал через N циклов нагружения. Базовое число N для черных металлов 10^7 циклов, а для цветных металлов — 10^8 циклов.

Конструкционная прочность — комплексная характеристика, сочетающая критерии прочности, надежности и долговечности материала или конструкции.

Критерии надежности – пластичность, трещиностойкость, ударная вязкость и порог хладноломкости.

Пластичность оценивают по удлинению образца при его разрыве.

Трещиностойкость — способность противостоять развитию трещины.

Порог хладноломкости — температура перехода от вязкого разрушения к хрупкому. Ниже этой температуры металл хрупок и ненадежен. Для сталей он лежит в диапазоне ($-40\dots-70$)°С. А вот Al не склонен к хладноломкости.

Долговечность — способность материала противостоять постепенному разрушению. Есть два вида долговечности — выносливость и износостойкость.

Износостойкость металла зависит от его твердости, коэффициента трения, чистоты поверхности и взаимной прирабатываемости трущейся пары. Хорошо прирабатываются мягкие металлы к твердым. Контакт твердых или мягких металлов недолговечен.

Жаропрочность — способность металла сопротивляться ползучести. Ползучесть — неограниченная деформация нагретого металла под нагрузкой; ее критерии — условный предел ползучести и предел длительной прочности.

Упругость — способность материала восстанавливать форму после разгрузки. Предел упругости — напряжение, после снятия которого остаточная деформация образца равна 0,002 %. Обозначают $\sigma_{0,002}$.

Жесткость — сопротивление упругой деформации. Критерий — модуль Юнга. Удельная жесткость — модуль упругости, деленный на удельный вес.

Твердость — сопротивление материала внедрению (царапинам). Ее оценивают по шкале Мооса: графит – 1; Au и Ag – 3; минеральное стекло – 5; W и Gorilla Glass – 6; кварц и Os – 7; сапфир и WC – 9; эльбор и алмаз – 10.

Лекция 3. Состояния материалов

Состояния делят на термодинамические и агрегатные, кристаллические и аморфные.

Термодинамические состояния различают по величине потенциала Гиббса $G = H - ST$, где H — энтальпия, S — энтропия, T — абсолютная температура. Термодинамических состояний всего три — равновесное, неравновесное и метастабильное.

В равновесном состоянии потенциал Гиббса минимален, прочность и твердость металла мала, а пластичность и вязкость — велика. Получают равновесное состояние медленным охлаждением металла (отжигом). Оно сохраняется до тех пор, пока какие-либо внешние воздействия не нарушат установившееся равновесие. Механическая аналогия — неподвижный маятник, находящийся в нижнем положении.

В неравновесном состоянии потенциал Гиббса изменяется, в материале идут превращения, он нестабилен. Такой металл обычно не обрабатывают.

В метастабильном состоянии потенциал Гиббса большой и относительно стабильный. Прочность и твердость у метастабильных металлов высока, а пластичность и вязкость — мала. Получают метастабильное состояние быстрым охлаждением (закалкой) сплава или холодной пластической деформацией металла (нагартовкой).

Агрегатные состояния различаются прочностью межатомных связей. Их всего пять: конденсатное, твердое, жидкое, газообразное и плазма. Каждое агрегатное состояние термодинамически равновесно (существует) в определенном интервале температур и давлений.

Конденсатное состояние равновесно вблизи абсолютного нуля; почти неподвижные при таких низких температурах атомы образуют квантовый конденсат с необычными свойствами (сверхтекучесть, сверхпроводимость).

Твердое состояние равновесно ниже температуры плавления материала. Прочность межатомных связей в твердых телах большая, они сохраняют форму.

Жидкое состояние равновесно между температурой плавления и температурой кипения материала. Атомы в жидкости связаны слабо, поэтому она сохраняет только объем, а форму не сохраняет (всегда принимает форму сосуда, в который налита).

Газообразное состояние равновесно выше температуры кипения материала. Атомы газа почти не связаны между собой, поэтому он не сохраняет даже объем и занимает все доступное пространство.

Плазма — термически ионизированный газ, равновесный при очень высоких температурах. Это основное состояние вещества во Вселенной.

По степени упорядоченности расположения атомов состояния делят на кристаллические (с дальним порядком) и аморфные (с ближним порядком).

В кристаллическом состоянии упорядоченно расположенные атомы образуют кристаллическую решетку. В таком состоянии находится большинство твердых тел и некоторые жидкости (т. н. жидкие кристаллы).

Кристаллические материалы имеют определенную температуру плавления, они анизотропны и, часто, полиморфны.

Анизотропия — зависимость механических или физических свойств материала от направления в пространстве. Например, оптическая анизотропия жидких кристаллов позволяет создавать устройства отображения информации, а магнитная анизотропия некоторых сплавов — получать сильные магниты.

Полиморфизм — способность материала изменять тип кристаллической решетки при изменении внешних условий (в первую очередь температуры и давления). Полиморфные превращения стремятся перестроить решетку так, чтобы материал всегда оставался в равновесном состоянии.

Кристаллическая решетка характеризуется типом элементарной ячейки, периодом, координационным числом и компактностью упаковки атомов.

Период решетки — расстояние между ближайшими параллельными атомными плоскостями.

Координационное число — число ближайших соседей атома в решетке.

Компактность упаковки атомов — процент заполнения элементарной ячейки атомами.

Элементарные ячейки металлов — ОЦК, ГЦК и ГП.

ОЦК — объемноцентрированная кубическая ячейка; атомы в ней расположены по вершинам куба и один в его центре. Координационное число 8, компактность упаковки атомов 68 %.

ГЦК — гранецентрированная кубическая ячейка; атомы в ней расположены по вершинам куба и в центре его граней; координационное число 12, компактность упаковки атомов 74 %.

ГП — гексагональная плотноупакованная ячейка; координационное число 12, компактность упаковки атомов 74 %.

Ячейки ГЦК и ГП упакованы максимально плотно.

Реальные кристаллы отличаются от идеальных наличием дефектов в решетке, которые могут быть точечными, линейными и поверхностными.

Точечные дефекты — вакансии (пустые узлы) и межузельные атомы.

Линейные дефекты решетки называют дислокациями, они появляются в результате неполного сдвига атомных плоскостей при пластической деформации металла. Дислокации бывают краевыми и винтовыми.

Поверхностные дефекты — двумерные нарушения кристаллической решетки, например, отсутствующая атомная плоскость.

Аморфное состояние характеризуется почти хаотическим расположением атомов, отсутствием кристаллической решетки и определенной температуры плавления (при нагреве аморфный материал размягчается постепенно). Аморфны почти все жидкости (кроме жидких кристаллов) и некоторые твердые тела (полимеры, стекла).

Аморфные металлы получают очень быстрым охлаждением расплава. Металлическое стекло сохраняет аморфную структуру жидкости, кристаллы в нем образоваться не успевают. Освоено производство аморфных гранул, ленты, фольги и микропроволоки.

Лекция 4. Состав и структура материала

Материя существует в виде дискретной (вещество) и непрерывной (поле) форм. Наличие состава и структуры у материалов — следствие дискретности вещества, состоящего из прочно связанных между собой частиц — атомов, молекул и кристаллов.

Атомы состоят из компактного ядра и электронной оболочки. Число протонов в ядре определяет принадлежность атома к какому-либо химическому элементу, а число нейтронов определяет изотоп атома. Если число протонов и электронов разное, то такой электрически заряженный атом называют ионом.

Молекулы и кристаллы химических элементов состоят из одинаковых атомов, а молекулы и кристаллы химических соединений и твердых растворов — из разных атомов, называемых компонентами соединения или раствора.

Состав материала — химический, изотопный и фазовый.

Химический состав — атомарный или молекулярный. Атомарный состав определить проще, но для органических материалов часто этого недостаточно.

Природное вещество обычно состоит из смеси разных изотопов. Так, основной изотоп углерода ^{12}C имеет атомную массу 12 (по 6 протонов и нейтронов), но есть также изотопы ^{13}C (7 нейтронов, стабильный) и ^{14}C (8 нейтронов, радиоактивный изотоп).

Фазой называют обособленную однородную область в материале. Фаза может быть газообразная, жидкая и твердая; твердая фаза может быть равновесная и метастабильная, кристаллическая и аморфная, металлическая и нематаллическая, парамагнитная и ферромагнитная...

Кристаллическая фаза — колония одинаковых атомов, молекул или кристаллов, сгруппировавшихся совместно и отделенная от других колоний границей раздела. Фазы в сплавах обычно очень дисперсны и видны лишь под микроскопом.

Фазовый состав материала зависит от его химического состава, внешних условий (температура, давление) и технологических воздействий (деформация, сварка, термообработка). Изменение фазового состава происходит либо за счет диффузии, либо посредством внутренних фазовых переходов первого и второго рода. Фазовые превращения всегда стремятся поддерживать термодинамическое равновесие в материале.

Фазовый переход первого рода сопровождается тепловым эффектом: выделением тепла при охлаждении материала (кристаллизация, конденсация) или поглощением тепла при его нагреве (плавление, кипение, сублимация).

Сублимация (возгонка) — переход вещества из твердой фазы сразу в газообразную. Например, кристаллический углекислый газ (сухой лед, используемый для заморозки продуктов) при нормальном давлении и температуре $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ переходит сразу в газообразное состояние, минуя жидкую фазу (получить сжиженную углекислоту для заправки баллонов можно при высоком давлении). Йод вообще не имеет жидкой фазы. Сублимацию льда используют при вакуумной сушке продуктов (фрукты, кофе и др.).

Фазовый переход второго рода протекает без теплового эффекта. Пример

— магнитное превращение: переход ферромагнетика в парамагнетик при нагреве материала до температуры Кюри. Переходы второго рода термическим анализом не определяются, их регистрируют дилатометрией.

Свойства материала зависят не только от его химического состава, но и от структуры. Так, мягкий графит и твердый алмаз имеют одинаковый состав (это чистый углерод), но разную структуру и совершенно разные свойства. Твердая закаленная сталь отличается от мягкой отожженной лишь структурой.

Структура материала определяется взаимным расположением образующих его частиц и фаз, а также типом связей между ними.

Структура твердого раствора определяется взаимным расположением образующих его атомов. Бывают растворы внедрения, замещения и вычитания.

В растворах внедрения растворенные атомы находятся между узлами кристаллической решетки компонента-растворителя и искажают ее. Из-за этого пересыщенные растворы внедрения метастабильны: они прочные и твердые, но при нагреве распадаются.

В растворах замещения растворенные атомы находятся в некоторых узлах кристаллической решетки компонента-растворителя.

В решетке растворов вычитания есть пустые узлы, не занятые атомами.

Структура кристаллов в значительной степени зависит от химических связей между узлами кристаллической решетки. Кристаллы бывают молекулярные, ионные, ковалентные и металлические.

Молекулярные кристаллы связаны лишь слабыми межмолекулярными силами Ван-дер-Ваальса. Они образуются при замерзании некоторых полимеров, воды, инертных газов. Все остальные типы кристаллов связаны значительно более прочными межатомными связями.

В ионных кристаллах атомы перераспределяют свои валентные электроны, образуя прочные ионные связи, в которых общая электронная пара переходит от металла к неметаллу. Такие кристаллы у поваренной соли.

В ковалентных кристаллах атомы попарно обобщают свои валентные электроны. Такие кристаллы очень прочны, тверды и часто прозрачны: алмаз, кремний, германий.

В металлических кристаллах обобщенные валентные электроны образуют электронный газ, придающий металлам ряд специфических свойств: хорошую пластичность, высокую тепло- и электропроводность, большой коэффициент отражения электромагнитных волн, способность к электронной эмиссии (при нагреве металлы испускают электроны).

Металлические структуры бывают гомогенные (однофазные) и гетерогенные (многофазные).

Гомогенные структуры у чистых металлов, твердых растворов и химических соединений; они отличаются хорошей коррозионной стойкостью и повышенной пластичностью. Гетерогенные структуры у большинства конструктивных сплавов, они значительно прочнее и тверже.

Лекция 5. Методы исследования материалов

Состав материалов исследуют химическими и физическими методами. Физические свойства изучают термическим и dilatометрическим анализом. Механические свойства определяют испытаниями на прочность, выносливость и твердость. Структуры металлов и сплавов исследуют фрактографией, металлографией и рентгенографией.

Химический анализ бывает качественный и количественный. Качественным анализом исследуют наличие в материале разных химических элементов, а количественным анализом определяют их содержание.

Спектральный анализ — физический метод определения химического состава, основанный на изучении атомарных линейчатых спектров различных веществ. Качественный состав материала определяют по наличию линий, соответствующих определенным атомам, а количественный состав — по интенсивности этих линий.

Термический анализ основан на построении кривой охлаждения (зависимости температуры остывающего образца от времени). Затем по кривой охлаждения определяют температуры фазовых превращений первого рода. Горизонтальные участки этой кривой соответствуют изотермическим фазовым превращениям. Например, кривая охлаждения железа имеет два таких участка, что соответствует изотермическим фазовым превращениям при 911 °С и 1392 °С.

Dilatометрический анализ основан на построении dilatометрической кривой (зависимости длины образца от его температуры). По этой кривой определяют температуры фазовых превращений первого и второго рода. При полиморфных превращениях тип решетки и длина образца изменяются, что видно на кривой. Например, на dilatометрической кривой железа видно, что образец при нагреве дважды скачкообразно меняет свою длину. Это соответствует полиморфным превращениям, протекающим в железе при температурах 911 °С и 1392 °С.

Испытание на прочность заключается в построении кривой растяжения (зависимости деформации образца от напряжения в нем). По ней определяют механические характеристики материала: пределы упругости и текучести, модуль упругости, временное сопротивление материала.

Испытание на выносливость заключается в построении кривой усталости (зависимости разрушающего напряжения от числа циклов нагружений). По этой кривой затем определяют предел выносливости материала.

Твердость измеряют статическими и динамическими методами.

Статические методы измерения твердости основаны на внедрении в образец индентора (твердого наконечника). Твердость металлов измеряют методами Бринелля (НВ), Роквелла (НР) и Виккерса (НV). Твердость пластмасс измеряют на дюрометрах Шора.

Метод Бринелля заключается во внедрении в образец стального закаленного шарика и измерении диаметра полученного отпечатка. Этот метод применяют для мягких материалов (цветных металлов и незакаленных сталей).

Метод Роквелла заключается во внедрении в образец алмазного конуса

(HRC) или шарика из карбида вольфрама (HRB). Этот метод обычно применяют для твердых закаленных сталей.

Метод Виккерса заключается во внедрении в образец небольшой алмазной пирамидки. Это наиболее универсальный метод: его можно применять для тонких листовых материалов и толстых покрытий.

Микротвердость измеряют на приборах, снабженных измерительным микроскопом. Для испытаний используют маленькую алмазную пирамидку. Возможно измерение твердости отдельных фаз и тонких покрытий.

Динамические методы измерения твердости основаны на измерении высоты отскока падающего бойка (склероскоп Шора, HS) или на регистрации скорости затухания ультразвука в материале. Эти методы не оставляют отпечатков на образце, что важно для дорогих и уникальных изделий.

Фрактография изучает металлические изломы и причины их появления.

Излом бывает хрупким, вязким, смешанным и усталостным.

Хрупкий излом зернистый и блестящий, он развивается стремительно.

Вязкий излом матовый, ему предшествует пластическая деформация металла; он развивается постепенно и не так опасен.

Смешанный излом имеет зоны вязкого и хрупкого разрушения. Так разрушаются металлы вблизи порога хладноломкости.

Усталостный излом вызывают циклические нагрузки; в металле развивается усталостная трещина, уменьшающая рабочее сечение детали.

Металлография изучает металлические структуры при различных увеличениях. Основные металлографические методы исследования материалов — макроанализ и микроанализ.

Макроанализ — исследование структуры с помощью лупы; позволяет определить размер зерен, наличие текстуры, дефекты литья.

Микроанализ — изучение структуры микрошлифа с помощью оптического или электронного микроскопа. Определяет размер, форму и характер взаимного расположения фаз. Микрошлиф — отшлифованный, отполированный и протравленный химическими реактивами образец.

Оптические приборы, используемые в металлографии, имеют разную разрешающую способность (минимальное расстояние между точками, которые еще кажутся раздельными).

Разрешающая способность невооруженного глаза $\approx 0,2$ мм. Сильная ($40\times$) лупа увеличивает разрешение до 5 мкм. Разрешение оптического микроскопа 200 нм, оно ограничено волновой природой света. Разрешение растрового электронного микроскопа около 1 нм, а просвечивающего — до 0,1 нм, но для просвечивания нужна чрезвычайно тонкая фольга, которую трудно изготовить.

Рентгеноструктурный анализ позволяет нам заглянуть в наномир. Дифракционный рентгеновский спектр, получаемый при этом анализе, не является фотографическим изображением объекта, однако он содержит закодированную информацию о тонком строении материи. Рентгеновские методы анализа — экспериментальная база кристаллографии.

Лекция 6. Кристаллизация металлов и сплавов

Металл — поликристаллический материал, состоящий из прочно связанных между собой мелких кристалликов, называемых зернами или кристаллитами. Такая зернистая структура формируется в процессе кристаллизации металла.

Кристаллизация — фазовый переход первого рода, протекающий с выделением тепла. Кристаллизация бывает первичная и вторичная.

Первичная кристаллизация начинается при охлаждении жидкого металла ниже температуры плавления, причем необходимая для начала процесса степень переохлаждения может достигать нескольких десятков градусов. Чистые металлы всегда кристаллизуются изотермически, а сплавы обычно кристаллизуются в интервале температур.

Вторичная кристаллизация протекает при дальнейшем охлаждении твердого раствора и заключается в его распаде на первичные и вторичные зерна. Растворенные атомы при охлаждении выходят из первичных кристаллов, образуя вокруг них мелкодисперсные вторичные фазы. Вторичную кристаллизацию основной фазы называют рекристаллизацией.

Причина такого поведения кроется в переменной растворимости твердых растворов, проявляющейся в уменьшении предельно возможной концентрации растворенных в основной фазе примесей при уменьшении температуры.

Образование зерен начинается с появления в переохлажденном расплаве центров кристаллизации, называемых зародышами зерен. Чем их больше, тем мельче будет зерно и качественнее литой металл.

Размер зерен зависит от степени переохлаждения расплава, скорости роста зародышей и наличия нерастворимых модификаторов, специально вводимых в жидкий металл для управления процессом кристаллизации.

Форма полученных зерен зависит от условий охлаждения металла в литейной форме. При направленном теплоотводе вырастают вытянутые зерна, а при равномерном — симметричные. В зависимости от формы зерна различают игольчатые, пластинчатые, столбчатые, дендритные и другие структуры.

Рост зерен происходит по дендритной схеме: сначала в жидком металле прорастают мощные оси первого порядка, затем от них ответвляются оси второго порядка и т.д. Участки между осями кристаллизуются последними, поэтому они насыщены имеющимися в любом металле разнообразными примесями, вытесненными из ранее образовавшихся кристаллов; так возникает дендритная ликвация.

Ликвация — химическая или структурная неоднородность металла. Различают микроликвацию (неоднородность зерен) и макроликвацию (неоднородность всего слитка).

Макроликвация бывает зональная и гравитационная.

Зональная ликвация возникает из-за разных условий охлаждения в разных зонах слитка; поверхность отливки кристаллизуется раньше, тугоплавкие примеси вытесняются внутрь слитка, из-за чего металл снаружи более чистый.

Гравитационная ликвация возникает из-за разности плотностей жидкой и

твердой фаз; образующиеся кристаллы тонут или всплывают, в результате чего отливка формируется неоднородной. Некоторые металлы (например, Cu и Pb) вообще нельзя нормально сплавить в условиях земного тяготения.

Структура слитка состоит из трех зон: зоны мелких зерен у поверхности, зоны столбчатых кристаллов, вытянутых в направлении теплоотвода к стенкам литейной формы и зоны крупных симметричных зерен в глубине слитка.

Иногда получается транскристаллическая структура, состоящая из одних столбчатых зерен. Транскристаллизация уменьшает прочность сварных швов.

Дефекты слитка — усадочная раковина, пористость, ликвация, текстура.

Усадка связана с уменьшением объема металла при кристаллизации. Усадочная раковина образуется вверху слитка; под раковиной металл рыхлый, пористый; эту часть отливки отрезают и отправляют на переплавку.

Полупроводниковые монокристаллы выращивают в пересыщенной среде тигельными методами Бриджмена, Чохральского, Степанова или методом бестигельной зонной плавки.

Метод Бриджмена заключается в вытягивании тигля с расплавом из печи со скоростью кристаллизации металла. Монокристалл растет из одного центра.

Метод Чохральского основан на использовании монокристаллической заправки, которую вытягивают из расплава. Материал наследует ее структуру.

Метод Степанова является модификацией метода Чохральского, его обычно применяют для выращивания монокристаллов сапфира и кремния.

Бестигельной зонной плавкой получают чистые, но мелкие кристаллы.

Сплав — металлический материал, полученный кристаллизацией раствора. Химические элементы, образующие раствор, называют компонентами сплава. Кристаллизация сплавов протекает в интервале температур; исключение — эвтектические сплавы, которые, подобно чистым металлам, кристаллизуются изотермически. Структура сплава формируется в процессе его охлаждения диффузионными и бездиффузионными фазовыми превращениями.

Диффузионные превращения протекают за счет теплового движения атомов. При быстром охлаждении диффузия завершиться не успевает и формируются прочные метастабильные структуры. При медленном охлаждении диффузия завершается и получают пластичные равновесные структуры.

При бездиффузионных превращениях различные фазы в процессе охлаждения реагируют между собой, образуя новые фазы. В черных металлах встречаются перитектическое, эвтектическое и эвтектоидное превращения.

Перитектическое превращение — совместная кристаллизация твердой и жидкой фаз определенного состава; образуется смесь двух фаз — перитектика.

Эвтектическое превращение — распад жидкого раствора на две твердые фазы. Образуется двухфазная смесь — хрупкая легкоплавкая эвтектика. Сплавы с эвтектикой называют литейными, а сплавы без нее — деформируемыми. Литейные сплавы делят на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические.

Эвтектоидное превращение — распад первичной твердой фазы на две вторичные. Сплавы делят на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные.

Лекция 7. Диаграммы состояния сплавов

На диаграммах состояния изображают равновесные структуры двойной системы компонентов А–В в зависимости от содержания компонентов (горизонтальная ось) и температуры (вертикальная ось). Диаграмма позволяет изучить фазовый состав и структуру сплавов, оценить их свойства, определить температуры фазовых превращений и режимы термической обработки.

При анализе диаграмм используют правило фаз Гиббса, позволяющее определить число степеней свободы термодинамической системы (сплава) в любой точке диаграммы по формуле $C = K - \Phi + 1$, где K – число компонентов в сплаве, Φ – число одновременно сосуществующих в этой точке диаграммы фаз.

Для двойных сплавов ($K = 2$) возможны всего три варианта:

1. $C = 0$ — в этой точке диаграммы одновременно сосуществуют три фазы ($\Phi = 3$), в сплаве идет изотермическое фазовое превращение, сопровождающееся интенсивным тепловыделением;

2. $C = 1$ — в этой точке сосуществуют две фазы ($\Phi = 2$), в сплаве идет фазовое превращение, сопровождающееся выделением тепла, он медленно остывает;

3. $C = 2$ — в этой точке всего одна фаза ($\Phi = 1$), превращений и тепловыделения нет, сплав остывает с максимально возможной для него скоростью.

Диаграммы состояния классифицируют по взаимной растворимости компонентов сплава, которая может быть неограниченной или ограниченной.

Неограниченно растворимые между собой компоненты имеют одинаковую кристаллическую решетку и способны образовывать твердые растворы любой концентрации. Такие сплавы гомогенны: Au–Ag–Cu, W–Mo...

Диаграмма с неограниченно растворимыми компонентами состоит из двух линий — ликвидус и солидус. Выше линии ликвидус есть только жидкая фаза ($\Phi = 1$ и $C = 2$), а ниже линии солидус — только твердая ($\Phi = 1$ и $C = 2$). Между этими линиями существуют две фазы: жидкая и твердая ($\Phi = 2$ и $C = 1$).

Сплавы с ограниченно растворимыми компонентами могут быть, в зависимости от состава, гомогенными или гетерогенными. Важным примером такой диаграммы является диаграмма состояния сплавов железа с углеродом (ДЖУ), содержащая все равновесные структуры сталей и чугунов.

Компоненты этой диаграммы — железо и углерод.

Железо — пластичный металл с температурой плавления 1539 °С. Оно существует в виде двух полиморфных модификаций — альфа и гамма.

Альфа-железо имеет ОЦК решетку и существует при температурах ниже 911 °С и выше 1392 °С. Высокотемпературную модификацию альфа-железа иногда называют дельта-железом.

Гамма-железо имеет ГЦК решетку и существует в интервале температур 911–1392 °С. Оно плотнее альфа-железа и может растворить больше углерода.

Углерод существует в виде природных и синтетических форм.

Природные модификации углерода — графит и алмаз.

Графит — стабильная модификация с гексагональной решеткой. Он мягок, электропроводен, химически стоек, сгорает на воздухе при 700 °С.

Алмаз тверд и хрупок, метастабилен, теплопроводен, химически стоек, на воздухе сгорает при 870 °С. Синтетические алмазы получают из графита.

Фазы на ДЖУ — жидкий раствор, два твердых раствора (феррит и аустенит), химическое соединение (цементит) и углерод в форме графита.

Феррит — твердый раствор внедрения углерода в альфа-железе. Его высокотемпературную модификацию иногда называют дельта-ферритом.

Аустенит — твердый раствор внедрения углерода в гамма-железе; он плотнее, прочнее и тверже феррита.

Цементит — твердый и хрупкий карбид железа Fe_3C ; содержит 6,67 % С. В сплавах встречается в виде первичных, вторичных и третичных кристаллов.

Фазовые смеси на ДЖУ — перлит и ледебурит. Это самостоятельные элементы микроструктуры.

Перлит — эвтектоидная смесь феррита и цементита, содержащая 0,8 % С. Перлит бывает пластинчатый и зернистый. Пластинчатый перлит прочнее, а зернистый технологичнее: он лучше режется и сильнее закаляется. Получают зернистый перлит сфероидизирующим отжигом.

Ледебурит — хрупкая легкоплавкая эвтектика, содержащая 4,3 % С. Различают высоко- и низкотемпературный ледебурит. Высокотемпературный ледебурит существует при температурах (727–1147) °С и состоит из аустенита с цементитом. Низкотемпературный ледебурит существует при температурах ниже 727 °С и состоит из перлита с цементитом.

Горизонтальные линии на ДЖУ соответствуют изотермическим фазовым превращениям:

НВ, 1499 °С – перитектическое превращение феррита и жидкой фазы в аустенит;

EF, 1147 °С – эвтектическое превращение жидкой фазы в ледебурит;

PSK, 727 °С – эвтектоидное превращение аустенита в перлит;

МО, 768 °С – точка Кюри: магнитное превращение; ниже этой температуры железо и его сплавы ферромагнитны, а выше — парамагнитны.

Сплавы железа с углеродом — техническое железо, сталь и чугун.

Техническое железо содержит менее 0,02 % углерода. Этот мягкий и непрочный сплав как конструкционный материал не используют.

Сталь — деформируемый сплав, содержащий 0,02–2,14 % углерода.

Сталь бывает доэвтектоидная (менее 0,8 % углерода), эвтектоидная (0,8 % углерода) и заэвтектоидная (содержит более 0,8 % углерода).

Из недорогих ферритно-перлитных доэвтектоидных сталей делают детали машин, фермы мостов, рельсы, трубопроводы и др. металлоемкие конструкции.

Из эвтектоидных и заэвтектоидных сталей делают подшипники, инструмент и другие твердые износостойкие изделия.

Чугун — литейный сплав, содержащий 2,14–6,67 % углерода.

Чугун бывает доэвтектический (менее 4,3 % углерода), эвтектический (содержит 4,3 % углерода) и заэвтектический (содержит более 4,3 % С).

Из доэвтектических чугунов отливают крупные фасонные заготовки: станины станков, кузнечно-прессовое оборудование, коленчатые валы. Заэвтектические чугуны практического интереса не представляют.

Лекция 8. Деформация металлов

Деформация бывает абсолютная и относительная, пластическая и упругая, горячая и холодная. Ее вызывают как внешние нагрузки, так и внутренние напряжения, остающиеся после разнообразных технологических воздействий (пластическая деформация, термическая обработка, сварка).

Абсолютная деформация — изменение размеров образца при нагружении. Характеристикой материала не является, так как зависит от длины образца.

Относительная деформация — отношение абсолютной деформации к исходному размеру образца. Максимально возможная для материала относительная деформация характеризует его пластичность; для краткости ее часто и называют пластичностью.

Упругая деформация материала исчезает после снятия вызвавшей ее нагрузки, а пластическая деформация остается навсегда.

Горячую деформацию проводят выше температуры рекристаллизации металла для изменения его формы. Структуру и свойства деформированного металла она изменяет незначительно.

Температура рекристаллизации металлов технической чистоты составляет около 40 % от абсолютной температуры плавления. Например, для алюминия, меди и железа она равна 100 °С, 210 °С и 450 °С соответственно. У таких легкоплавких металлов, как олово и свинец, температура рекристаллизации меньше 20 °С, для них любая деформация — горячая. Температура рекристаллизации очень чистых металлов ниже указанных значений, а температура рекристаллизации сплавов — выше.

Холодную деформацию проводят ниже температуры рекристаллизации металла. При этом металл переходит в метастабильное (наклепанное) состояние, в нем формируется текстура и его свойства сильно изменяются.

Текстура деформации — преимущественная ориентация зерен в определенных плоскостях или направлениях. Например, при осадке металла на прессе зерна ориентируются в плоскостях, перпендикулярных направлению осадки, а при радиальном обжатии изделия (волочение, экструзия) зерна ориентируются вдоль его оси.

Наклепом называют изменение свойств при холодной пластической деформации металла. Наклеп бывает фазовый и деформационный.

Фазовый наклеп вызывают внутренние напряжения и деформации, остающиеся после теплового воздействия на сплав из-за разного расширения его фаз. Фазовым наклепом упрочняют железоникелевые и другие сплавы.

Деформационный наклеп бывает объемный и поверхностный.

Объемный наклеп увеличивает прочность и твердость металла, но уменьшает его пластичность и ударную вязкость. Объемный наклеп появляется при глубокой деформации металла (ковка, прокатка).

Поверхностный наклеп увеличивает твердость, износостойкость и выносливость металла, а прочность почти не изменяет, так как охватывает лишь тонкий слой. Операцию по созданию наклепа называют нагартовкой. Для поверхностной нагартовки часто используют дробеструйную обработку или обкатку

детали роликами. Отбивка косы — тоже нагартовка.

Дробеструйная обработка — поверхностная нагартовка металла быстро летящей металлической или керамической дробью.

Обкатка детали профилированными или гладкими роликами позволяет получить износостойкую нагартованную поверхность с регулярным рельефом. Так обрабатывают рукоятки маховиков и другие быстро стирающиеся детали.

Возникающий при технологических воздействиях наклеп может значительно осложнить механическую обработку изделия. Например, при резании пластичных металлов появляющийся наклеп затрудняет процесс снятия стружки. Наклепанный режущим инструментом металл начинает крошиться, а режущий инструмент быстро приходит в негодность.

Устраняют наклеп рекристаллизационным отжигом, для чего металл нагревают приблизительно на 100°C выше температуры рекристаллизации. Сначала в деформированном металле протекают процессы возврата, а затем начинается рекристаллизация основной фазы.

Возврат частично восстанавливает равновесную структуру металла. Первую стадию возврата называют отдыхом, а вторую — полигонизацией.

Отдых уменьшает концентрацию дефектов в кристаллах. Микроструктура и фазовый состав металла при этом не изменяются.

Полигонизация — образование субзерен, почти лишенных дислокаций. Это нежелательный процесс, затрудняющий последующую рекристаллизацию. Полигонизация часто встречается в сплавах алюминия, железа и молибдена.

Рекристаллизацией называют процесс зарождения и роста в деформированной металлической структуре новых равновесных зерен. У рекристаллизации три фазы: первичная, собирательная и вторичная.

Первичная рекристаллизация приводит к полному исчезновению деформированных зерен; она снимает наклеп и устраняет текстуру.

Собирательная рекристаллизация начинается при дальнейшем повышении температуры металла и заключается в равномерном росте новых зерен. Обычно этого не требуется.

Вторичная рекристаллизация сильно перегретого металла заключается в аномальном росте отдельных зерен за счет соседей. Это нежелательный процесс, приводящий к ненадежной разнотекстурированной структуре.

Условия для успешной рекристаллизации:

- 1) степень деформации металла должна быть больше критической величины, лежащей обычно в пределах 2–8 % (для Fe и Cu — 5 %);
- 2) в кристаллах не образовалось полигонов;
- 3) металл нагрет на 100°C выше температуры рекристаллизации;
- 4) металл склонен к рекристаллизации: иногда она идет тяжело.

Размер зерен уменьшается с ростом степени деформации и увеличивается с ростом температуры. Это позволяет управлять размером получаемого зерна.

Диаграмма рекристаллизации показывает зависимость величины нового зерна от степени деформации металла и температуры нагрева.

Лекция 9. Термическая обработка металлов

Термообработке подвергают отливки, полуфабрикаты, сварные швы, детали, инструменты. Основные виды — отжиг, закалка, отпуск и старение.

Отжиг — медленное охлаждение горячего металла. Приближает структуру к равновесной, уменьшает твердость и прочность, увеличивает пластичность и вязкость, снимает внутренние напряжения. Бывает I и II рода.

Отжиг I рода не связан с фазовыми превращениями. Он бывает диффузионный, рекристаллизационный и низкий. Диффузионный отжиг — длительная выдержка металла при высокой температуре для устранения ликвации. Низкий отжиг — небольшой нагрев для снятия напряжений.

Отжиг II рода основан на фазовых превращениях; он бывает полный и неполный. При полном отжиге сплав гомогенизируют и медленно охлаждают. При неполном отжиге гомогенизация частичная, металл нагревают слабее.

Закалка — быстрое охлаждение металла. Дает прочную и твердую структуру, но уменьшает пластичность сплава. Она бывает полная и неполная, с мартенситным превращением и без него, объемная и поверхностная.

При полной закалке сплав полностью гомогенизируют. При неполной закалке сплав нагревают слабее, гомогенизация структуры частичная.

Закалка с мартенситным превращением дает твердую, прочную и хрупкую структуру — мартенсит. Хрупкость уменьшают отпуском сплава.

Закалка без мартенситного превращения дает пересыщенный твердый раствор. Увеличение прочности происходит при старении этого раствора.

Поверхностная закалка увеличивает твердость, износостойкость и выносливость металла. Применяют индукционный или лазерный нагрев.

Отпуск — небольшой нагрев закаленного сплава. Дает нужное сочетание механических свойств, стабилизирует структуру, уменьшает хрупкость.

Старение — распад метастабильного раствора на первичные и вторичные фазы. Бывает естественное (без нагрева) и искусственное (с нагревом).

Комбинированные методы упрочнения сочетают термообработку и деформацию. Термомеханическая обработка — горячая деформация металла, совмещенная с закалкой. Увеличивает вязкость и надежность хрупких сталей. Механотермическая обработка сочетает пластическую деформацию металла с отжигом. Несколько циклов волочения с промежуточным отжигом упрочняют пружинную (канатную) проволоку до 3 ГПа!

Термообработка стали заключается в охлаждении аустенита. В зависимости от режима охлаждения протекает диффузионное перлитное, бездиффузионное мартенситное или промежуточное бейнитное превращение.

Перлитное превращение идет при медленном охлаждении (отжиге) стали. Аустенит распадается на ферритно-цементитные смеси разной дисперсности: перлит (грубая смесь), сорбит или троостит (тонкая смесь).

Мартенситное превращение идет при закалке стали. Быстро охлаждаемый аустенит не успевает распасться и превращается в метастабильный мартенсит.

Стальной мартенсит — сильно пересыщенный углеродом феррит.

Бейнитное превращение наиболее полно протекает в изотермических

условиях. Аустенит в горячей соляной ванне превращается в прочный бейнит. В зависимости от температуры образования различают нижний и верхний бейнит. Твердый нижний бейнит формируется при температуре < 400 °С. Верхний бейнит, полученный при температуре > 400 °С, интереса не представляет.

Отжиг стали первого рода — диффузионный (нагрев выше 1000 °С для устранения ликвации), рекристаллизационный (нагрев до 700 °С для устранения наклепа) и низкий отжиг (легкий нагрев для снятия внутренних напряжений).

Отжиг стали второго рода — полный, неполный и изотермический.

Полный отжиг стали заключается в ее нагреве до аустенитного состояния. При неполном отжиге нагревают слабее, аустенизация стали частичная.

При изотермическом отжиге охлаждают с остановкой; это ускоряет отжиг легированных сталей, требующих очень медленного охлаждения.

Нормализация отличается от отжига тем, что сталь охлаждают на воздухе, а не в печи. Она устраняет крупное зерно и цементитную сетку в сталях.

Закалка стали бывает полная и неполная. Большую твердость дает неполная закалка, частично сохраняющая в структуре твердый цементит.

Способ охлаждения при закалке зависит от состава стали.

Непрерывное охлаждение — самый простой способ закалки, дающий большие закалочные напряжения, приводящие к короблению стали.

Закалка в двух средах и ступенчатая закалка дают меньшие напряжения. Изотермическая закалка в расплавах солей дает прочный бейнит.

Закалка в заневоленном состоянии предотвращает изгиб плоских деталей из высокоуглеродистых сталей, не требующих быстрого охлаждения. Ножовочные полотна закаляют зажатými между медными пластинами.

Охлаждение жидким азотом устраняет нестабильный остаточный аустенит. Так обрабатывают прецизионные изделия (мерительный инструмент).

Закалочные среды — электролиты, вода, минеральное масло и воздух.

В воде калят низкоуглеродистые стали. В масле — высокоуглеродистые и легированные. На воздухе закаляют мартенситные (самокалящиеся) стали.

Отпуск стали бывает низкий, средний и высокий.

Низкий отпуск (150 – 250 °С, HRC 58–63) — для инструментальных сталей.

Средний отпуск (350 – 500 °С, HRC 40–50) — для рессорно-пружинных.

Высокий отпуск (500 – 700 °С, HRC 25–30) дает хорошее сочетание прочности и надежности. Закалку с высоким отпуском называют улучшением.

Химико-термической обработкой получают диффузионный слой.

Цементация (насыщение С) увеличивает твердость и износостойкость металла. Карбюризатор: древесный уголь, метан, керосин. После цементации проводят неполную закалку и низкий отпуск, а затем деталь шлифуют.

Азотирование увеличивает износостойкость и выносливость металла. Азотируют сталь, чугун, титан, бериллий. Для насыщения азотом используют аммиак. Сталь закаляют до азотирования, а шлифуют и полируют — после него.

Совместное насыщение С+N — нитроцементация и цианирование. Алитирование (Al) и хромирование улучшают коррозионную стойкость сталей.

Лекция 10. Черные металлы

Железо — пластичный ферромагнитный металл с плотностью 7874 кг/м^3 . В земной коре 5 % железа. Добывают его из гематитовых и магнетитовых руд. У железа 4 стабильных изотопа, из которых 92 % приходится на изотоп ^{56}Fe .

Стали классифицируют по производству, составу, содержанию С, степени легирования и раскисления, качеству, структуре, прочности и назначению.

Производство стали — мартеновское, конвертерное, электротермическое.

По составу стали делят на углеродистые (только Fe и C) и легированные.

По углероду — низко- ($< 0,3 \%$ C), средне- и высокоуглеродистые ($> 0,7 \%$).

По степени легирования стали делят на низколегированные (содержат менее 3 % легирующих элементов), средне- и высоколегированные (более 10 %).

По степени раскисления стали делят на спокойные, полуспокойные и кипящие. Раскисление — удаление кислорода из стали введением Mn, Si, Al.

Стали бывают обычного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные. С ростом качества уменьшается содержание S и P.

По структуре стали делят на перлитные (феррит с цементитом), аустенитные (с ГЦК решеткой), ферритные (ОЦК решетка) и мартенситные.

Стали бывают нормальной прочности ($< 1 \text{ ГПа}$), повышенной прочности и высокопрочные ($> 1,5 \text{ ГПа}$). Прочность некоторых сталей превышает 2 ГПа.

По назначению стали делят на конструкционные, инструментальные, криогенные, жаропрочные, коррозионностойкие, электротехнические и другие.

Конструкционные стали — подшипниковые, рессорно-пружинные...

Примеси — случайные, постоянные (S, P, Mn, Si) и скрытые (O, H, N).

Сера вызывает красноломкость стали (высокая хрупкость при нагреве).

Фосфор вызывает хладноломкость стали (высокая хрупкость на холоде).

Марганец вводят в сталь для раскисления с избытком, чтобы его осталось 0,3–0,7 %; это считают технологической примесью, а не легированием.

Кремний упрочняет сталь. Его также вводят для раскисления с избытком, чтобы осталось свободным около 0,4 %; превышение считается легированием.

Кислород загрязняет сталь оксидами, повышающими ее хрупкость.

Азот вызывает деформационное старение стали (разрывы при штамповке).

Водород увеличивает хрупкость закаленных сталей; он попадает из атмосфер.

Легирующие элементы маркируют заглавными русскими буквами: X —

Cr, H — Ni, Г — Mn, А — Al, С — Si, М — Mo, В — W, Б — Nb, Т — Ti, Ф — V, Д — Cu, Е —

Se, Л — Be, П — P, Ю — Al, Р — B, К — Co, Ц — Zr, Ч — редкоземельный элемент.

В сталях специального назначения обозначения элементов могут отличаться.

Хром улучшает механические свойства, коррозионную стойкость и прокаливаемость стали; это обязательный компонент нержавеющей сталей.

Никель повышает прочность, пластичность, прокаливаемость и коррозионную стойкость, понижает порог хладноломкости; ценный элемент.

Молибден, вольфрам, ванадий и титан — карбидообразователи, увеличивающие прочность, теплостойкость и прокаливаемость стали.

Бор вводят в микродозах ($\sim 0,005\%$) для увеличения прокаливаемости.

Конструкционные стали выплавляют углеродистыми и легированными. Углеродистые стали бывают обыкновенного качества и качественные.

Стали обыкновенного качества маркируют Ст и цифрой (от 0 до 6, марка стали): Ст0, Ст1кп, Ст5пс. Чем выше марка, тем больше в стали углерода.

Качественные стали маркируют числом (С в сотых %): сталь 20 (0,2 % С). Низкоуглеродистые стали — высокопластичные 05–10 и цементируемые 15–25. Среднеуглеродистые стали — недорогие конструкционные стали 30–55. Из высокоуглеродистых сталей 60–80 делают валки, пружины, инструмент.

У легированных сталей выше прокаливаемость, надежность и прочность, но они менее технологичны и часто подвержены отпускной хрупкости.

Маркировка легированной стали начинается с числа (С в сотых долях %). Легирующие элементы маркируют буквами, а их содержание — цифрой. Буква в конце — качество: А — высококачественная, Ш — особовысококачественная сталь. Высококачественная сталь 20ХНА содержит 0,2 % С и около 1 % Cr и Ni.

Легированные стали нормальной и повышенной прочности бывают цементируемые (0,1–0,3 % С) и улучшаемые (0,3–0,5 % С). Из цементируемых сталей (12Х2Н4А, 15Х, 25ХГМ) делают износостойкие детали: зубчатые колеса, кулачки. Из улучшаемых сталей (50Х, 40ХНМА) делают валы и штоки.

Мартенситно-старяющиеся стали — железоникелевые сплавы (до 25 % Ni). После закалки на воздухе и старения они прочны и упруги; 03Н12К15М10.

Аустенитные стали (25Н25М4Г) сочетают высокую прочность с хорошей пластичностью. Из них делают проволоку для тросов, броневого листа.

Маркировка спец. сталей начинается с буквы: Э — электротехническая, У — инструментальная, А — автоматная, Ш — подшипниковая, Р — быстрорежущая.

Автоматные стали хорошо режутся; они легированы S, P, Ca, Se, Pb; А20.

Износостойкая подшипниковая сталь ШХ15 содержит 1 % С и 1,5 % Cr.

Рессорно-пружинные стали бывают углеродистые (60, 70Г) и легированные (55С2); из них делают силовые пружины. ТО — закалка и средний отпуск.

Коррозионностойкие и жаростойкие стали (12Х13, 12Х18Н9) легируют Cr, Al, Ni и Si. Жаропрочные стали (15К) хорошо сопротивляются ползучести.

Чугуны, кроме Fe и С, содержат случайные и постоянные (Si, Mn, P, S) примеси. Углерод может быть связан (цементит) или свободен (графит).

Классифицируют чугуны по металлической структуре (ферритные и перлитные), форме углерода (белые, серые, ковкие, высокопрочные) и назначению (пердельные, литейные, износостойкие, антифрикционные).

Белый чугун не имеет в структуре графита, весь углерод в нем химически связан и находится в цементите. Он тверд и хрупок, применяется редко.

В сером чугуне графит пластинчатый. Он хорошо льется, из него делают большие отливки: станины станков, блоки цилиндров. Из прочных перлитных чугунов СЧ30 (30 кГ/мм²) и СЧ45 отливают зубчатые колеса и другие детали.

В ковком чугуне графит хлопьевидный или вермикулярный. Получают его отжигом белого чугуна. КЧ 35-10 (35 кГ/мм², пластичность 10 %).

Из высокопрочных чугунов со сферическим графитом делают прокатные валки и коленчатые валы. Получают их отжигом. ВЧ 120-2 (120 кГ/мм² и 2 %).

Лекция 11. Медь и никель

Медь — красноватый пластичный металл с ГЦК решеткой. В земной коре меди около 0,005 %; добывают ее из сульфидных (медный колчедан) и оксидных (малахит) руд. Это первый металл, освоенный древними людьми.

Плотность меди $8,9 \text{ т/м}^3$, температура плавления $1083 \text{ }^\circ\text{C}$, у нее высокая тепло- и электропроводность. В атмосфере медь пассивируется и сохраняет стойкость при нагреве до $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Прочность отожженной меди 220 МПа, пластичность 50 %; тянутая медь вдвое прочнее, но она хрупкая. Медь очень технологична: ее прокатывают, протягивают, паяют, сваривают, полируют. Чистая медь плохо льется и тяжело режется из-за высокой вязкости.

Из мягкой меди (ММ) делают обмоточные провода, а из твердой (МТ) — контактные. Кровли и фасады из меди служат 150 лет. Прокаткой получают трубы и теплообменники. Из Cu делают бактерицидные поверхности (перила) в учреждениях здравоохранения. Чистая анодная медь М00 содержит 99,99% Cu.

Медные сплавы имеют хорошие литейные, антикоррозионные и упругие свойства. По составу их разделяют на латуни, бронзы и ювелирные сплавы.

Латуни — прочные и пластичные сплавы меди с цинком. Они бывают простые и легированные, деформируемые и литейные (с эвтектикой).

Простые латуни делят на томпаки (до 10 % Zn), полутомпаки (10–20 % Zn) и пластичные патронные латуни ($\approx 30 \text{ } \%$ Zn). Латунь Л96 содержит 96 % Cu.

Бронзы — сплавы меди с любыми элементами, кроме Zn и Ni.

Оловянная бронза упруга, устойчива к коррозии, имеет хорошие антифрикционные и литейные свойства. Оловянную бронзу, сильно ($\approx 10 \text{ } \%$) легированную цинком, называют адмиралтейской, она устойчива в морской воде и широко используется в судостроении.

Бериллиевая бронза очень прочна ($\approx 1200 \text{ МПа}$) и чрезвычайно упруга, это основной пружинный сплав приборостроения.

Алюминиевую бронзу используют для имитации золота в бижутерии.

Ювелирные сплавы системы Au–Ag–Cu прочнее и дешевле чистого золота. Они гомогенны при любом соотношении компонентов, которые неограниченно растворимы между собой. Медь позволяет избавиться от излишне белого цвета, присущего низкопробным золотым сплавам.

Никель — твердый и пластичный серебристый металл. Его содержание в земной коре около 0,01 %, извлекают никель из медно-никелевых руд. Никель слабый аллерген: у 12 % людей он вызывает контактный дерматит. Плотность никеля $8,9 \text{ т/м}^3$, температура плавления $1455 \text{ }^\circ\text{C}$. Он ферромагнитен и входит в состав многих магнитных сплавов. После пассивации никель устойчив на воздухе, в пресной и морской воде.

Из никеля делают ювелирные изделия, защитные покрытия, биопротезы. Он обладает ярко выраженным магнитострикционным эффектом (сильно меняет объем при намагничивании). Никель незаменим в ультразвуковых генераторах и аккумуляторах электроэнергии. У никеля чрезвычайно много сплавов. Наиболее популярны сплавы никеля с медью, железом и хромом.

Медно-никелевые сплавы гомогенны при любом соотношении компонентов (медь и никель неограниченно растворимы между собой). По назначению их делят на электротехнические, конструкционные и ювелирные.

Электротехнические сплавы — копель Cu–Ni–Fe, константан Cu–Ni–Mn и другие. Имеют большое сопротивление и используются в электроприборах.

Конструкционные сплавы — нейзильбер, мельхиор, монель-металл, куниаль.

Нейзильбер — прочный и коррозионностойкий сплав Cu–Ni–Zn. Из него делают пружины реле, медицинский инструмент, посуду, медали и монеты.

Мельхиор — пластичный и коррозионностойкий серебристый сплав, содержащий около 1 % Mn. Из него делают надежные вентили для мощных гидросетей, медицинский инструмент, медали и монеты. Красивым мельхиором заменяют столовое серебро.

Монель-металл содержит 70 % Ni, 30 % Cu; он относительно дешев, так как требует минимальной переработки медно-никелевых руд. Коррозионная стойкость и хорошие механические свойства сделали этот сплав основным металлом химического машиностроения.

Куниаль — прочный и коррозионностойкий сплав Cu–Ni–Al. Из него делают пружины, детали криогенной техники, гребные винты судов.

Ювелирные медно-никелевые сплавы имеют хорошие литейные свойства. Это легированные кремнистые и бериллиевые бронзы, мельхиор, нейзильбер.

Железо-никелевые сплавы упругие и вязкие, из них делают пружины и броню, используют в электротехнике. Наибольшее применение из этих сплавов находят элинвар, инвар, ковар, платинит и пермаллой.

Элинвар содержит 55 % Fe и 45 % Ni. Его упругость сравнительно мало зависит от температуры (обычно модуль упругости сильно падает при нагреве).

Инвар содержит 64 % Fe и 36 % Ni. У него очень малое тепловое расширение, что позволяет использовать этот сплав в прецизионных приборах.

Ковар содержит 70 % Fe, 29 % Ni и 1 % Co. Коэффициент теплового расширения у этого сплава такой же, как у дорогого вольфрама, что позволяет иногда заменять его в электровакуумных изделиях.

Платинит содержит 51 % Fe и 49 % Ni. Он имеет коэффициент теплового расширения такой же, как и очень дорогая платина, что позволяет иногда заменять платину в электровакуумной технике.

Пермаллой содержит 20–50 % Fe и 50–80 % Ni. Этот магнитомягкий сплав с очень малой коэрцитивной силой и низкими потерями на перемагничивание широко используют в электротехнике, телефонии, радиотехнике и электронике.

Хромо-никелевые сплавы — нихром, инконель и другие.

Нихром содержит 60–80 % Ni и 15–30 % Cr. Из него делают нагреватели. Сплав, содержащий 80 % Ni и 20 % Cr, устойчив к коррозии до 1100 °C.

Инконель — жаропрочный хромо-никелевый сплав, легированный титаном. Это один из основных металлов ракетной техники, из него делают детали газотурбинных двигателей, работающие в экстремальных условиях.

Хромоникелевая сталь хорошо сопротивляется коррозии; но это сплав Fe.

Лекция 12. Легкие металлы

Li (0,5 т/м³); Mg (1,7 т/м³); Be (1,9 т/м³); Al (2,7 т/м³) и Ti (4,5 т/м³).

Литий вдвое легче воды и в пять раз легче алюминия. Это щелочной металл, на воздухе разлагается. Жидкий литий применяют как теплоноситель в ядерных реакторах, с его помощью получают тритий для термоядерных реакций. Как конструкционный металл литий не используют из-за огромной химической активности и плохих механических свойств. Однако он все чаще входит в состав антифрикционных и смазывающих материалов, а также очень легких и прочных сплавов нового поколения.

Смазки с литиевым мылом (гидридом лития) сохраняют свои свойства в широком диапазоне температур, что важно для высотной авиации и для работы деталей в полярных районах. Некоторые соединения лития активно разлагают углекислоту и применяются для очистки воздуха в подводных лодках.

Оксид лития Li₂O входит в состав стекол, пропускающих ультрафиолет. Гидроокись лития LiOH входит в состав электролита щелочных литиевых аккумуляторов; она повышает емкость, расширяет диапазон рабочих температур и вдвое увеличивает срок службы. Соли лития используют в пиротехнике, в сварочных флюсах, в химической промышленности и медицине.

Литий повышает прочность и коррозионную стойкость сплавов алюминия и цинка. Сплав Al-Mg-Li применяют в конструкциях летательных аппаратов, а из сплава Al-Cu-Li делают емкости для сжиженных газов. Очень перспективны сверхлегкие сплавы лития с бериллием.

Магния в земной коре 2 %, его добывают из доломитовых и магнезитовых руд, из морской воды. Магний плавится при 650 °С, воспламеняется при 550 °С, горит ярким пламенем, порошок пирофорен. На воздухе пассивируется и теряет активность. Прочность литого магния всего 120 МПа, это не конструкционный металл. Виброустойчив и обладает хорошей демпфирующей способностью. Он легко режется, при литье нужна защита от воспламенения, а при шлифовании — отсос взрывоопасной пыли. Mg незаменим в производстве зажигательных бомб, ракет, трассирующих пуль. В металлургии используют для раскисления, восстановления и легирования сплавов. Магний Mg96 содержит 99,96 % Mg.

Прочность сплавов магния с алюминием, цинком и марганцем 400 МПа при плотности менее 2 т/м³. По удельной вибрационной прочности они в 100 раз превосходят дуралюмины. Сплавы магния отлично режутся и шлифуются, но плохо льются. Слабо поглощают нейтроны и находят применение в атомной технике. Наиболее прочны сплавы Mg-Al-Zn-Cd-Ag (сплав МА10 – 430 МПа). Из литейных сплавов Mg-Al-Zn делают детали авиадвигателей и автомобилей, корпуса ракет. Термообработка магниевых сплавов — отжиг, закалка на воздухе с последующим старением (200 °С, 20 часов), термомеханическая обработка.

Применение магниевых сплавов — авиационная, реактивная и атомная техника, детали моторов, баки для бензина и масла, корпуса приборов и вагонов, колеса, насосы, отбойные молотки, пневмобуры, фото и киноаппараты, бинокли...

Бериллий — легкий и твердый пассивирующийся металл. Минерал берилл — драгоценный камень: аквамарин — голубой, изумруд — зеленый, гелиодор — желтый. У бериллия высокая электро- и теплопроводность, очень большая теплоемкость и скорость распространения звука. Он токсичен при переработке, поражает легкие, вызывая бериллиоз.

Прочность литого бериллия 700 МПа, прочность проволоки — 1300 МПа; удельная прочность 37 км, модуль упругости 310 ГПа; у бериллия рекордно высокая (16 км) удельная жесткость (у стали 2,6 км), стойкость к резонансным колебаниям, хорошая демпфирующая способность и отличная выносливость.

Бериллий — лучший материал для легких, прочных и жестких конструкций. Из него делают шпангоуты и элероны самолетов, тепловую защиту ракет, мощные тормозные системы, детали точных приборов, окна рентгеновских трубок (он слабо поглощает рентгеновские лучи). В атомных реакторах его используют как конструкционный материал и как замедлитель нейтронов. Бериллий — ценный легирующий элемент во многих сплавах. Легированные бериллием жаропрочные стальные пружины работают даже при температуре красного каления.

Сплав бериллия с алюминием (24 %), имеет высокую (620 МПа) прочность, низкую (3 %) пластичность и огромный (260 ГПа) модуль упругости.

Из химических соединений бериллия интерес представляют лишь бериллиды — твердые, хрупкие и жаропрочные интерметаллидные соединения. Из них делают мелкие износостойкие детали для гироскопов и навигационных систем. Интерметаллид — химическое соединение нескольких металлов.

Алюминий — легкий и пластичный серебристый металл с ГЦК решеткой, третий по распространенности (после кислорода и кремния) элемент в земной коре. Добывают алюминий из минералов (бокситы, нефелины, глиноземы).

Свойства алюминия — низкая температура плавления (660 °С) и малая (120 МПа) прочность, высокая (50 %) пластичность, теплопроводность и электропроводность; алюминий очень хорошо отражает свет, на воздухе пассивируется. Упрочняют алюминий нагартовкой, сваривают трением. Алюминий плохо режется и тяжело паяется, при литье дает большую усадку.

Из алюминия особой чистоты А999 делают провода, а из алюминия высокой чистоты А95 — электротехнические изделия. Из алюминия технической чистоты А8 делают рамы, двери, трубы, цистерны, фольгу, посуду, отражатели.

Алюминиевые сплавы имеют прочность до 700 МПа, удельную прочность 23 км при плотности менее 2,8 т/м³. Алюминиевые сплавы бывают литейные, деформируемые и спеченные.

Литейные сплавы — Al–Si (силумин), Al–Cu, Al–Mg. Силумины обладают хорошей жидкотекучестью, трещиностойкостью и герметичностью; из них отливают фасонные детали: корпуса компрессоров, головки цилиндров...

Деформируемые сплавы — дуралюмины, ковочные и высокопрочные сплавы. Среди них есть сплавы упрочняемые и неупрочняемые термически.

Дуралюмины — прочные и пластичные сплавы системы Al–Cu–Mg. Их применяют в авиации, строительстве и автомобилестроении. Из сплава Д1 делают лопасти самолетных винтов, из сплава Д18 — заклепки. Дуралюмины за-

каляют от температуры 500 °С в теплой воде, а затем подвергают старению.

Ковочные сплавы от дуралюминов отличаются лишь повышенным содержанием кремния. Из ковочного сплава марки АК8 делают лопасти вертолетных винтов.

Высокопрочные алюминиевые сплавы — Al–Zn–Mg–Cu (В96: 700 МПа: обшивка самолетов) и сплавы Al–Mg–Si (авиали: авиационный алюминий).

Спеченные алюминиевые сплавы получают из метастабильных гранул порошковой металлургией; прочность некоторых из них достигает 800 МПа.

Титан — прочный (600 МПа) и пластичный (25 %) тугоплавкий (1688 °С) металл с большой (30 км) удельной прочностью, хорошей коррозионной стойкостью и отличной хладостойкостью. В земной коре его около 0,6 %; добывают из минерала рутила и других руд. Титан плохо держит статические нагрузки и склонен к ползучести даже при комнатной температуре; для жестких конструкций он не годится. Обрабатывают титан давлением и сваркой, упрочняют нагартовкой.

Титан незаменим в авиа-, ракето- и судостроении. В металлургии это важный легирующий элемент. В химической промышленности из него делают реакторы и трубопроводы. В электронике титан используют как геттерный материал, повышающий вакуум (при нагреве хорошо поглощает газы). Биосовместимость титана позволяет делать из него остеопротезы. Покрывают из оксида, карбида и нитрида титана красивые (золотая краска), очень твердые и износостойкие (инструмент).

Сплавы титана с алюминием и никелем дешевле, пластичнее и технологичнее бериллиевых, они превосходят сплавы алюминия и магния по удельной прочности, коррозионной стойкости и жаропрочности. У них небольшая плотность и очень высокая (до 1800 МПа) прочность. Термическая обработка сплавов титана — отжиг, закалка со старением, химико-термическая обработка: азотирование, силицирование и термоводородная обработка.

Из титановых сплавов делают обшивку и шасси самолетов, детали реактивных и корпуса ракетных двигателей, обшивку и гребные винты судов. Из сплавов ВТ6 и ВТ14 делают надежные биопротезы. В криогенной технике из титановых сплавов делают баллоны для сжатых и сжиженных газов. Сплавы титана применяют при изготовлении велосипедов и альпинистского снаряжения, авиационной брони и бронежилетов. Некоторые титановые сплавы, подобно сплаву Оландера, обладают памятью формы и аномально высокой упругостью.

Нитинол — прочный сплав никеля и титана с памятью формы. Способен запомнить две разных формы — низкотемпературную и высокотемпературную. Переход через критическую точку (температуру термоупругого мартенситного превращения) приводит к изменению формы изделия. Этот эффект используют в космонавтике для разворачивания антенн и солнечных батарей на орбите, в медицине при проведении малоинвазивных операций, в машиностроении для изготовления самозаклепывающихся соединений и многих других областях.

Лекция 13. Благородные и тугоплавкие металлы

Благородными называют металлы с большим положительным электрохимическим потенциалом, делающим их устойчивыми в агрессивных средах. Благородны золото, серебро и все платиноиды: платина, палладий, рутений, иридий, осмий и родий.

Золото – плотный ($19,3 \text{ т/м}^3$) желтый металл с температурой плавления 1064°C . В природе оно находится только в самородном состоянии. Золото очень устойчиво в щелочах и кислотах: оно растворяется лишь смесью соляной и азотной кислот (т.н. царской водкой). Золото вступает в химическую реакцию со ртутью, образуя легкоплавкую амальгаму. У золота высокая пластичность, тепло- и электропроводность. Из сплавов золота делают эрозионностойкие электрические контакты и химическую аппаратуру. Содержание золота в сплаве обозначают государственным клеймом (сплав 585 пробы содержит 58,5 % Au). Золото является важным элементом мировой финансовой системы, его мировые банковские запасы составляют около 32 000 тонн. Ориентировочная цена золота — около 40 \$ за 1 грамм (возможны сильные колебания биржевых котировок).

Серебро — пластичный белый металл с плотностью $10,5 \text{ т/м}^3$. На воздухе серебро не окисляется, имеет высокую электро- и теплопроводность, очень хорошо отражает свет. Из него делают зеркала, электрические контакты, припой, монеты, фотоматериалы, посуду и ювелирные изделия. Серебро обладает бактерицидными свойствами. Цена — около 0,5 \$ за 1 грамм.

Платина — плотный ($21,45 \text{ т/м}^3$) и тугоплавкий (1769°C) белый металл. Платина очень инертна: реагирует она лишь с горячей царской водкой. Из платины делают химическую посуду и электрические контакты, ювелирные и медицинские изделия. Примерная цена — около 30 \$ за 1 грамм.

Палладий — самый легкий (12 т/м^3) и самый легкоплавкий платиноид. Катализатор многих реакций органического синтеза. Палладий сильно поглощает водород и используется для его очистки. Сплавы Pd–Pt–Au называют «белым золотом». Ориентировочная цена — около 25 \$ за 1 грамм.

Рутений — редкий тугоплавкий (2250°C) металл. Он тоже сильно адсорбирует водород и используется для его очистки и извлечения из газовых смесей. Примерная цена — около 2 \$ за 1 грамм.

Иридий — самый плотный ($22,65 \text{ т/м}^3$), самый жесткий (520 ГПа) и очень тугоплавкий (2466°C) металл. В земной коре его меньше, чем золота и платины: ежегодно иридия добывают около 3 тонн. Из него делают химическую посуду, покрытия, термопары, износостойкие наконечники золотых перьев. Примерная цена — около 25 \$ за 1 грамм.

Осмий — очень плотный ($22,61 \text{ т/м}^3$), очень твердый (7 баллов по Моосу) и очень тугоплавкий (3033°C) серебристый металл. С кислотами и щелочами не взаимодействует, лишь медленно растворяется в царской водке. Незаменимый компонент сверхтвердых износостойких сплавов и покрытий. Сплав Pt (90 %) с Os (10 %) применяют в хирургических имплантатах (в кардиостимуляторах). Ориентировочная цена осмия — около 15 \$ за 1 грамм.

Родий — очень редкий серебристый тугоплавкий (1960 °С) металл. Родий инертнее платины: устойчив во всех кислотах, щелочах и даже галогенах. Извлекают его из самородной платины. Из родия делают зеркала для мощных лазерных систем. Его сплавляют с платиной, получая драгоценный сплав — платинородий (используют в термopарах). Цена — около 25 \$ за 1 грамм.

Тугоплавкие металлы по температуре плавления превосходят железо. Это Ti, Cr, Zr, V, Hf, Nb, Mo, Ta, Re, W, все платиноиды и торий.

Хром — твердый металл с плотностью 7,2 т/м³. Незаменимый компонент нержавеющей и жаростойких сталей, сплавов и покрытий. Цена: 100 \$ за 1 кг.

Цирконий — пластичный серый металл с плотностью 6,5 т/м³. Из него делают хирургические инструменты, протезы костей, посуду. Из твердой циркониевой керамики делают зубные протезы и ножи (из оксидов белые, из карбидов — черные). Целебные свойства циркониевых браслетов наука не подтвердила. Цена: 150 \$ за 1 кг.

Ванадий — пластичный металл с плотностью 6,1 т/м³. Устойчив в морской воде, многих кислотах и щелочах. Полезный легирующий элемент.

Гафний — твердый инертный металл с плотностью 13,3 т/м³. Компонент жаропрочных сплавов для ракетной техники и авиации. Сплав карбида гафния (20 %) и карбида тантала (80 %) — самый тугоплавкий (4200 °С) из всех сплавов.

У ниобия высокая (9,25 К) температура перехода в сверхпроводящее состояние. Ниобиевые сплавы применяют в космической, атомной и сверхпроводниковой технике.

Молибден — тугоплавкий (2600 °С) металл с плотностью 10,2 т/м³ и малым коэффициентом теплового расширения. Из него делают нити накаливания и катоды приборов. Молибден — ценный легирующий элемент. Из радиоактивного изотопа ⁹⁹Mo (цена 46 000 000 \$ за 1 грамм) получают технеций, незаменимый в ранней диагностике онкологических заболеваний.

Тантал — твердый тугоплавкий (3000 °С) металл с плотностью 16,7 т/м³. Очень инертен: поддается лишь смеси плавиковой и азотной кислот. Отличная биосовместимость позволяет делать из тантала остеопротезы. Жаропрочный сплав Ta–W работает до 3300 °С. Карбид тантала применяют при производстве инструментальных сплавов. В ювелирном деле танталом заменяют платину.

Рений — плотный (21 т/м³) тугоплавкий (3200 °С) металл. При 2000 °С это самый прочный из металлов. Жаропрочные сплавы Re–Mo–W–Ni используют в авиации, космической и атомной технике. Рений имеет стратегическое значение: он незаменим при производстве реактивных и ракетных двигателей.

Вольфрам — самый тугоплавкий (3400 °С) металл, плотный (19,3 т/м³), твердый и коррозионностойкий. Важный компонент инструментальных сталей и сплавов. Из него делают нити накаливания и нагревательные элементы, хирургические инструменты, оболочки торпед и снарядов, танковую броню, детали самолетов и двигателей, контейнеры для радиоактивных веществ.

Торий — слаборадиоактивный металл, период полураспада ²³²Th около 14 млрд лет. Ториевая энергетика, возможно, заменит урановую. Запасы тория в земной коре в 4 раза превышают запасы урана; им легируют магниевые сплавы.

Лекция 14. Неметаллические материалы

Органические материалы — полимеры, каучук, резина, древесина...

Полимеры бывают природного и синтетического происхождения.

Природные смолы — шеллак, канифоль и янтарь. Шеллак — клейкий продукт жизнедеятельности тропических насекомых; выпускают его в виде раствора для электроизоляционных и клеящих лаков. Канифоль — хрупкое аморфное вещество, продукт переработки хвойной смолы; используют для пропитки специальной бумаги и картона, как флюс для пайки. Янтарь — окаменевшая растительная смола; ювелирный камень, диэлектрик.

Синтетические полимеры бывают термопластичные и термореактивные.

Молекулы термопластов не связаны в поперечном направлении. Термопласты непрочные и быстро стареют на солнце. Полиэтилен, оргстекло...

Полиэтилен $(-CH_2-)_n$ морозоустойчив, при нагреве размягчается, быстро стареет, нерастворим в слабых электролитах. Стабилизаторы (сажа) замедляют старение. Пленка, тара, трубы, изоляция. Полиэтилен низкого давления имеет высокую плотность, а полиэтилен высокого давления — низкую.

Органическим стеклом называют прозрачные полимерные материалы: поливиниламид, полиметилметакрилат (плексиглас), полистирол, поликарбонат. Их используют в бытовой и осветительной технике, торговом оборудовании, архитектуре и медицине (контактные линзы, искусственные хрусталики).

Макромолекулы реактопластов связаны в поперечном направлении. Такая сетчатая структура формируется при введении в полимер реагента-отвердителя. Реактопласты инертнее, прочнее и долговечнее термопластов. Их основа — эпоксидная, полиуретановая или другая смола. Реактопласты упрочняют порошком и волокном, получая пластмассы: карболит, фенопласт, аминопласт.

Пластическая масса — многокомпонентный полимерный материал. Содержит полимер, наполнитель, стабилизатор, пластификатор и отвердитель. Пластмассы классифицируют по полимеру на полиуретановые, полиамидные, эпоксидные, стирольные... К ним относят асболокниты, стекловолокниты, углеволокниты, текстолиты, гетинаксы и другие композиционные материалы.

Каучук — натуральный или синтетический эластомер (упругий полимер). Вулканизацией каучука (нагревом с введением серы) получают резину.

Резина содержит каучук, пластификатор, наполнитель, вулканизатор, краситель и антиоксидант. Упругая деформация мягкой резины (3 % серы) около 500 %. Сильно вулканизированную (30 %) жесткую резину называют эбонитом. Резина стареет под действием тепла, ультрафиолета и озона.

Промышленную древесину получают из твердых сортов натуральной древесины (березы, бука). Их модифицируют (пропитывают солями и смолами), а затем уплотняют, получая твердый лигностон (каменное дерево). Он в 3 раза плотнее и в 8 раз прочнее натуральной древесины. Из лигностона делают части текстильных машин, вкладыши подшипников скольжения, зубчатые колеса...

Неорганические материалы инертные, хрупкие, слабые на растяжение и

прочные на сжатие; графит, слюда, стекло, керамика, минералы, ситаллы.

Графит легкий, мягкий, хрупкий, жаропрочный, электропроводный и инертный материал. Он нужен в авиации и космонавтике, ядерных реакторах и электротехнике, в композиционных и антифрикционных материалах. Различают природный и искусственный графит. Искусственный графит — технический и пиролитический (получают из газов, он плотнее).

Слюда — водный алюмосиликат со слоистой структурой. Прочна и химически инертна. Слюда используют в электротехнике как диэлектрик.

Стекло — аморфный материал, полученный из расплава минеральной шихты. Стекла бывают галогенидные, халькогенидные, сульфидные, оксидные.

Оксидное стекло — силикатное, германатное, боратное, фосфатное...

Силикатное стекло состоит в основном из оксида кремния SiO_2 . Оно устойчиво во всех кислотах, кроме плавиковой, но щелочи его разлагают. Плотность зависит от состава и лежит в пределах 2–8 т/м³. Стекла прочны на сжатие (2 ГПа) и слабы на растяжение (100 МПа). Их упрочняют закалкой и химической обработкой. Недостаток стекол – хрупкость. Выдающимися представителями силикатных стекол являются кварцевое стекло и хрусталь.

Кварцевое стекло состоит из чистого оксида кремния и прозрачно для ультрафиолета. У него высокая (> 1000 °С) огнеупорность и малое термическое расширение. Из кварцевого стекла делают лампы для соляриев и дезинфекции, смотровые окна, химическую посуду, детали точной механики, оптическое волокно, огнеупорные материалы и высокотемпературные изоляторы.

Хрусталь — мягкое и тяжелое свинцовое стекло. Хрустальная посуда красива из-за высокой дисперсии и сильного преломления световых лучей.

Твердые износостойкие стекла — Gorilla Glass и сапфировое стекло.

Твердость Gorilla Glass ок. 6 баллов по Моосу, получают ее химической обработкой и закалкой. Большинство металлов мягче, но песок его царапает.

Сапфировое стекло (корунд Al_2O_3) твердостью (9 баллов по Моосу) уступает только алмазу и эльбору, его трудно поцарапать. Однако оно дорогое, хрупкое, сравнительно толстое и тяжелое, освоено часовой промышленностью.

Керамика — прочный и хрупкий искусственный камень, изготовленный обжигом глиняных или оксидных порошков. Она очень жаропрочна (300 МПа при 1200 °С), химически инертна и почти не стареет. Строительная (плитка, фарфор, фаянс), оптическая, электрическая, магнитная и техническая.

Электрическая керамика — пьезоэлектрическая, диэлектрическая, сверхпроводящая. Электротехнический фарфор — хороший диэлектрик, его используют при изготовлении изоляторов на линиях электропередач.

Техническая керамика — силикатная, бескислородная и оксидная.

Бескислородная керамика при нагреве окисляется и требует защиты. Оксидная керамика не окисляется, ее прочность на сжатие до 5 ГПа.

Ситаллы — легкие стеклокристаллические материалы, содержащие аморфную и кристаллическую фазы. Прочны на сжатие, очень тверды (7 баллов по Моосу), инертны и термостойки (1000 °С). Ситаллами заменяют драгоценные камни в точечных опорах, выдерживающих огромные давления острой цапфы. Есть ситаллы прозрачные, магнитные, полупроводниковые и другие.

Лекция 15. Технические жидкости и газы

Технические жидкости — смазочные материалы, рабочие и технологические среды, топливо.

Смазочные материалы уменьшают трение и износ деталей. Они бывают газообразными (азот), твёрдыми (графит) и жидкими (масло).

По химическому составу основы жидкие смазки делят на минеральные (углеводородные), синтетические (силиконовые) и органические (растительные масла: касторовое, пальмовое...).

По назначению масло бывает моторное (для двигателей внутреннего сгорания), трансмиссионное (для механических и гидродинамических передач, с противозадирными присадками), промышленное (для разных механизмов) и электропроводящее (для электрических контактов).

Синтетическая силиконовая смазка используется для смазывания пластмассовых и резиновых деталей. Она, в отличие от углеводородов, не разрыхляет и не смягчает резину. Ее применяют для смазки замков, петель и малонагруженных редукторов (например, в принтерах).

Пластичные смазки хорошо удерживаются в негерметичных узлах трения. Их делят по составу на кальциевые (солидолы), углеводородные, бариевые, натриевые и по назначению на антифрикционные, консервационные и герметизирующие.

Рабочие среды — гидравлические, тормозные, амортизационные, вакуумные и другие масла с различными полезными присадками (антикоррозионными, противозадирными).

Гидравлические жидкости готовят на основе очищенных нефтяных масел. Они обладают заданной вязкостью, хорошими смазывающими свойствами, высокой теплопроводностью (для охлаждения горячих деталей), большим модулем упругости и малым тепловым расширением.

Тормозные жидкости готовят на касторовом масле. Они выполняют функции гидравлического тела и смазочной среды для поршня в тормозном цилиндре. Работают при высоких давлениях и обладают большой вязкостью.

Амортизационные среды готовят на основе нефтяных масел. Они гасят колебания автомобилей, тракторов, самолетов, артиллерийских орудий.

Технологические среды — разделительные составы (уменьшают адгезию и схватывание), закалочные среды (вода, масло), смазочно-охлаждающие жидкости, хладоносители и теплоносители.

Смазочно-охлаждающие жидкости используют при механической обработке металлов. Они сохраняют от быстрого износа инструмент, улучшают качество обработанной поверхности, увеличивают производительность труда. Смазочно-охлаждающие жидкости обычно содержат антикоррозионные, противоизносные, противозадирные и другие присадки.

Жидкое топливо — нефтепродукты: бензин, дизельное топливо, керосин и мазут. Это также компоненты разнообразных растворяющих, моющих, охлаждающих и других составов.

Технические газы — воздух, азот, аммиак, аргон, ацетилен, кислород, ге-

лий, водород, метан, пропан, бутан и газовые смеси: сварочные, медицинские.

Воздух содержит 78 % азота, 21 % кислорода, 1 % аргона и 0,03 % углекислого газа (эти газы и получают криогенным разделением воздуха). Также в воздухе всегда есть водяной пар. Плотность воздуха 1,2 кг/м³ при 20 °С, 1,0 кг/м³ при 80 °С и всего 0,24 кг/м³ при 1200 °С. Такая сильная зависимость плотности воздуха от температуры приводит к конвективным движениям, определяющим многие природные явления и широко используемым в технике. Воздух — рабочая среда в многочисленных пневматических устройствах, окислитель в двигателях внутреннего сгорания.

Азот используют в газообразном (> -196 °С), сжиженном (< -196 °С) и твердом (< -210 °С) состояниях. ¾ получаемого азота уходит на производство аммиака. Азот применяют для создания защитных атмосфер, испытаний трубопроводов под давлением, синтеза различных соединений, накачки шин летательных аппаратов, в огнетушителях, как легирующий элемент в сплавах.

Кислород используют как окислитель при сварке металлов, в металлургии стали, в ракетном топливе (сжиженный), в медицине и других областях.

Аргон применяют в лампах накаливания, стеклопакетах, огнетушителях, лазерах и плазмотронах, используют как защитную атмосферу при сварке.

Углекислый газ при атмосферном давлении имеет только две фазы — твердую (похожий на снег сухой лед, используемый для промышленного охлаждения продуктов питания) и газообразную; сублимация (возгонка) происходит при температуре -78 °С. При повышенном давлении углекислота переходит в жидкую фазу, что используют для ее хранения в баллонах. Каждый из нас за сутки выделяет около 1 кг углекислоты. Ее применяют в пищевой промышленности, системах пожаротушения, как защитную среду при сварке, в пневматическом оружии. Углекислый газ нетоксичен, он тяжелее воздуха и может вытеснять его из шахт и колодцев, его относят к удушающим газам.

Аммиак (нитрид водорода NH₃) используют при производстве удобрений, взрывчатки, полимеров, азотной кислоты, соды. Раствор аммиака в воде называют нашатырным спиртом.

Ацетилен — бесцветный газ C₂H₂. Ацетилен-кислородная смесь при сварке дает температуру более 3000 °С. Ацетилен используют для производства этилового спирта, взрывчатки, каучука, пластмасс, технического углерода.

Водород — лучшая восстановительная атмосфера. В смеси с воздухом он образует гремучую смесь, но чистый водород не взрывается. Перед подачей водорода в печь необходима ее продувка азотом (для вытеснения воздуха). Водород используют в качестве ракетного топлива.

Метан CH₄ и пропан C₃H₈ — топливо и сырье для органического синтеза.

Азотно-водородные смеси используют как защитные восстановительные атмосферы, они дешевле чистого водорода. Смеси не взрываются, если водорода в них менее 10 %. Азотно-водородные смеси получают непосредственным смешением газов или термической диссоциацией аммиака. Диссоциированный аммиак содержит 75 % водорода и 25 % азота.

Лекция 16. Материалы с особыми свойствами

Упругие, коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные, хладостойкие, радиоактивные материалы и наноматериалы.

Упругие материалы применяют для изготовления рессор, пружин и мембран. Упругие свойства материала определяются его пределом упругости, модулем упругости и величиной возможной упругой деформации.

Упругие сплавы — рессорно-пружинные и мартенситно-стареющие стали, бериллиевые бронзы, железоникелевые сплавы, сверхупругие материалы.

Рессорно-пружинные стали бывают углеродистые (70Г) и легированные (55С2). Высокую упругость у этих сталей получают закалкой на мартенсит с последующим средним отпуском на троостит.

У мартенситно-стареющих сталей высокий (1500 МПа) предел упругости и низкий порог хладноломкости. Они лучше рессорно-пружинных сталей.

Бериллиевые бронзы после термомеханической обработки имеют предел упругости около 1000 МПа. Из них делают чувствительные пружины приборов.

Сверхупругость и память формы связаны с наличием в сплаве обратимого мартенситного превращения. Сверхупругие сплавы — сплав Оландера (Au–Cd), нитинол (Ni–Ti), Ti–Co, Ti–Fe, Mn–Cu.

Малое тепловое изменение упругости у железоникелевых элинварных сплавов. Все сплавы теряют упругость при нагреве, но элинвары более стойки.

Коррозия бывает химическая и электрохимическая. Химическую вызывают газы и нефтепродукты, а электрохимическую — электролиты.

Коррозионная стойкость металла зависит от его электрохимического потенциала. Наибольшая устойчивость у благородных металлов. Скорость атмосферной коррозии, мкм/год: Fe – 20; Cu – 1,0; Ag – 0,04; Au – 0,0.

Коррозионностойкие стали устойчивы на воздухе, в пресной и морской воде, в слабых электролитах. Хромистые (15Х28) и хромоникелевые (12Х18Н9).

Медь и ее сплавы хорошо сопротивляются атмосферной и морской коррозии. Сильно легированные цинком адмиралтейские бронзы широко применяют в судостроении.

Инертность пассивирующихся металлов связана с образованием окисной пленки. На воздухе пассивируются Ti, Al, Ni, Cr и многие другие металлы.

Титан сохраняет пассивность в горячей атмосфере, в кислотах и щелочах, в пресной и морской воде.

Алюминий устойчив в кислотах, но чувствителен к щелочам и подвержен контактной коррозии: он быстро разрушается в контакте с никелем и медью. Электрики знают: нельзя соединять медные и алюминиевые провода.

Жаростойкие стали противостоят химической коррозии (не покрываются окалиной). Жаростойкость стали, содержащей Cr (25 %) и Al (5 %) — 1300°C.

Жаропрочные материалы хорошо сопротивляются ползучести. Они бывают металлические (стали, сплавы Ni и Co), неметаллические и композиционные. Жаропрочные стали (например, котельная сталь 15К) способны держать небольшие нагрузки до температуры 800 °С.

Жаропрочные никелевые суперсплавы работают в реактивных двигателях при температуре 1100 °С тысячи часов. По составу это легированные инконели.

Кобальтовые сплавы превосходят по температуре плавления сплавы никеля, но по жаропрочности и другим механическим свойствам уступают им.

Жаропрочные неметаллические материалы — керамика и графит.

Керамика при температуре 1200 °С имеет прочность 300 МПа; при напряжениях до 100 МПа у нее вообще нет ползучести. Оксидная керамика не окисляется при нагреве и не требует никакой защиты.

Хладостойкие материалы работают при криогенных температурах (ниже -183 °С). На таком морозе из сплавов железа сохраняют небольшую пластичность лишь высоколегированные аустенитные стали. При температуре кипения гелия (-256 °С) работают Al, Cu, Ti и их сплавы.

Радиоактивные материалы используют в энергетике и медицине.

Сейчас АЭС дают около 15 % всей электроэнергии, которую получают за счет цепной реакции деления ядер урана или плутония. Месторождений урана на Земле немного, и те уже порядком истощились. В перспективе возможен переход на торий, запасы которого в 4 раза больше, чем урана.

Радиоактивные изотопы технеция, золота и йода используют при диагностике и лечении онкологии.

Наноматериалы состоят из мелких (< 100 нм) частиц или очень тонких волокон и пленок. Бывают естественного и искусственного происхождения.

Естественные наноматериалы — пористые кремний и оксид алюминия. Они обладают очень развитой внутренней поверхностью и используются в оптической электронике, при производстве тонких фильтров и мембран.

Искусственные наноструктуры — углеродные (фуллерены) и кремниевые.

Фуллерены — большие симметричные молекулы углерода, состоящие из 60 и более атомов. Развернутые фуллерены называют графеном, а свернутые — углеродными нанотрубками.

Графен — двумерная модификация графита, тонкий атомарный слой из гексагональных углеродных ячеек. Обладает уникальными механическими, электрическими и оптическими свойствами. Оптическая прозрачность делает его перспективным для производства солнечных батарей и чипов оптической электроники. Графен уже начали использовать в самых разных областях.

Углеродные нанотрубки представляют собой цилиндрически свернутый графен диаметром до 100 нм и длиной до нескольких сантиметров. Они бывают одностенные и многостенные. Нанотрубки обладают огромной (около 50 ГПа) прочностью, высокой тепло- и электропроводностью. Из них уже делают очень прочные нити, легкие композиты, провода, топливные элементы, светодиоды, жидкокристаллические панели. Теоретически нанотрубка может держать нагрузку в 1 тонну на мм², но сплетенные из них нити не так прочны. При вдыхании углеродные нанотрубки поражают легкие, нужна защита.

Кремниевые наноструктуры начали изучать сравнительно недавно. В 2012 году был получен силицен (двумерная модификация кремния, по структуре похожая на графен). Этот материал пока плохо изучен.

Лекция 17. Износостойкие материалы

Износостойкие — триботехнические и инструментальные материалы.

Триботехнические материалы — антифрикционные и фрикционные.

Антифрикционные материалы имеют малый коэффициент трения. Они бывают металлические (сплавы), неметаллические и композиционные.

Антифрикционные сплавы — баббиты, медные сплавы и чугуны.

Баббит ($f \approx 0,1$) — мягкий тяжелый сплав на оловянной или свинцовой основе. Из него делают износостойкие покрытия и подшипники скольжения, работающие на больших скоростях и нагрузках. Баббит марки Б83 содержит 83 % Sn, 11 % Sb и 6 % Cu.

Антифрикционные бронзы и латуни ($f \approx 0,15$) прочнее и легче баббитов, но и трение у них больше.

Антифрикционные чугуны ($f \approx 0,2$) бывают серые АЧС, ковкие АЧК и высокопрочные АЧВ.

Антифрикционные пластмассы — фторопласт, полиамид, капрон... У некоторых фторопластов коэффициент трения по стали всего 0,05. Из них делают износостойкие покрытия (например, у направляющих станков).

Антифрикционные минералы бывают естественного (агат) и искусственного (рубин, корунд) происхождения. У этих камней малый коэффициент трения и очень высокая твердость. Из них делают точечные (каменные) опоры для часов, тахометров и гироскопов.

Антифрикционные композиционные материалы — бронзографиты, железграфиты, металлофторопласты.

Фрикционные материалы имеют большой и стабильный коэффициент трения. Они незаменимы в тормозных устройствах и механизмах сцепления. Работают при высоких температурах и давлениях. Это асбофрикционные композиты (ретинакс), псевдосплавы железа и меди, чистый бериллий.

Ретинакс ($f \approx 0,40$) содержит 25 % фенолформальдегидной смолы, 35 % барита и 40 % асбеста. Его коэффициент трения очень стабилен. Ретинакс используют в тормозных системах самолетов и большегрузных автомобилей.

Инструментальные материалы отличаются высокой твердостью и теплостойкостью (хорошо сохраняют твердость при нагреве). Инструменты делают из специальных сталей, твердых сплавов и сверхтвердых материалов.

Инструментальные стали делят на углеродистые, низколегированные и быстрорежущие. Из них делают режущий, мерительный и штамповый инструмент.

Углеродистые инструментальные стали имеют эвтектоидный или заэвтектоидный состав. После неполной закалки и низкого отпуска они приобретают твердость HRC 62–64. Основной недостаток углеродистых сталей — низкая (200 °С) теплостойкость, не позволяющая резать металл на больших скоростях. Из них делают инструмент для ручных работ по металлу и для обработки древесины. Маркируют буквой У, а углерод указывают в десятых долях %. Высококачественная сталь У13А содержит 1,3 % С, сталь У8 — 0,8 % С.

Низколегированные инструментальные стали легированы Cr, Mn, Si, W.

Их маркировка начинается с числа (С в десятых долях %; если $C > 1$ %, то числа нет): 9ХС, ХВГ. После неполной закалки в масле и низкого отпуска твердость алмазных сталей ХВ4 и ХВ5 достигает рекордно высоких значений HRC 67–69. Однако теплостойкость у этих сталей тоже низкая (260 °С).

Быстрорежущие стали легированы сильными карбидообразователями (W, Mo, V, Cr), образующими с углеродом очень твердые и тугоплавкие карбиды. Теплостойкость быстрорежущих сталей превышает 600 °С. Эти стали относят к ледебуритному классу, они, подобно чугунам, содержат в структуре эвтектику. Маркируют буквой Р (рапид) и числом (W в %): сталь P18 содержит 18 % W, до 2 % V и 4 % Cr; сталь P6M5 содержит 6 % W, 5 % Mo, до 2 % V и 4 % Cr. Из быстрорежущих сталей делают инструмент для металлорежущих станков.

Термообработка стали P18 — закалка в масле от очень высокой (1280 °С) температуры и высокий отпуск (550 °С, 1 час). Отпуск повторяют 3–5 раз для устранения нестабильного остаточного аустенита. Твердость HRC 63–65.

Твердые сплавы состоят из твердых карбидов тугоплавких металлов (WC, TiC, TaC) и пластичной кобальтовой связки. Из них делают пластинки для инструментов, режущих сталь на больших скоростях. У этих карбидных сплавов огромная твердость (HRC 74–76) и высокая (1000 °С) теплостойкость. По составу твердые сплавы делят на вольфрамовые, титановольфрамовые и титанотанталовольфрамовые.

Вольфрамовые сплавы состоят из карбида вольфрама WC и кобальтовой связки. Их маркируют буквами ВК и числом (содержание Со в %). Сплавами ВК3–ВК8 режут чугун, цветные металлы, фарфор, керамику; из сплавов ВК10 и ВК15 делают волоочильные и буровые инструменты; из сплавов ВК20 и ВК25 — штампы и износостойкие детали машин. Спеченный сплав «победит» состоит из карбида вольфрама (90 %) и кобальта (10 %), имеет твердость HRA 80...90.

Титановольфрамовые сплавы состоят из карбидов TiC+WC на кобальтовой связке. Маркируют их буквой Т и числом (TiC в %): сплав Т30К4 содержит 30 % TiC и 4 % Со. Их применяют для скоростного резания стали.

Титанотанталовольфрамовые сплавы состоят из карбидов TiC+TaC+WC и кобальтовой связки. Маркируют буквами ТТ и числом (TiC+TaC в %): твердый сплав ТТ8К6 содержит 8 % TiC+TaC и 6 % Со. Применяют для тяжелых режимов резания (для обработки стальных отливок и поковок в заготовительных цехах).

Сверхтвердые материалы — электрокорунд (Al_2O_3), оксид циркония, карбиды кремния и бора, синтетический алмаз и кубический нитрид бора.

Технический алмаз получают из графита. Это самый твердый (10 000 НВ) и очень теплопроводный материал. Однако применение алмазного инструмента ограничено теплостойкостью (800 °С), высокой хрупкостью и адгезией к железу: сталь и чугун алмазом не режут, так как инструмент быстро выходит из строя.

Кубический нитрид бора (КНБ) — синтетический материал, выпускаемый под названиями эльбор и боразон. КНБ имеет близкую к алмазу твердость (около 9 000 НВ), но превосходит его по химической инертности (в частности, нет сродства к железу) и теплостойкости (1200 °С).

Лекция 18. Композиционные материалы

Композиты состоят из пластичной матрицы и прочной арматуры. Идея взята у природы: так устроены стебли растений и кости животных.

Матрица защищает арматуру и обеспечивает эффективную ее работу, распределяя нагрузку в материале. Ее также называют связкой или основой.

Арматура — волокна, монокристаллы и углеродные нанотрубки.

Волокна — неорганические и органические, непрерывные и дискретные. Они могут быть ориентированы упорядоченно или располагаться хаотично.

Неорганические волокна — металлические, стеклянные, углеродные, борные, асбестовые, оксидные, карбидные. Прочность лучших достигает 5 ГПа.

Металлические волокна — Al, Ti, Be, Ni, W и сплавы (сталь, нихром).

Стеклянные волокна имеют необычные для стекла свойства: они очень прочные (до 4 ГПа), не бьются, легко изгибаются и позволяют изготовить ткань. Стекловолокно выпускают непрерывным и штапельным (коротким).

Прочность лучших углеродных волокон тоже 4 ГПа при плотности 2 т/м^3 . Их теплостойкость в бескислородной атмосфере $2000 \text{ }^\circ\text{C}$, а на воздухе — $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Органические волокна: полиэфирные (лавсан), полиамидные (капрон, нейлон) и арамидные (кевлар, тварон). Прочность лучших арамидных волокон 3,5 ГПа; из них делают тросы, бронежилеты и огнезащитную одежду (арселон).

Дискретные волокна — ветвящиеся нитевидные монокристаллы («усы»). Их длина до 1 см при толщине менее 50 мкм. Для армирования композитов используют «усы» оксидов Al, Ti, Be и карбидов B, Si. Карбид кремния SiC обладает огромной механической (30 ГПа) и удельной (1000 км) прочностью.

Классифицируют композиты по виду арматуры и по материалу матрицы.

Арматура — дисперсная, волокнистая, слоистая, объемная, эвтектическая.

Дисперсноупрочненные композиты армированы частицами (порошком). Волокнистые композиты армированы непрерывным или дискретным волокном. Слоистые композиты армированы тканью (текстолиты), специальной бумагой (гетинаксы), сетками (железобетон), древесным шпоном (фанера).

Эвтектические композиты армированы кристаллами, специально выращенными внутри сплава направленным эвтектическим превращением. У них нет проблемы совместимости фаз, так как арматура образуется внутри материала естественным образом, а не вводится искусственным путем.

Матрица бывает полимерная, металлическая, керамическая и углеродная.

Полимерные композиты — графитопласты, саженаполненные каучуки (шинные протекторы), фено- и аминопласты (абразивный инструмент). Пористые, жидкофазные, дисперсноупрочненные, волокнистые и слоистые.

Пористые пластмассы — поропласты (с сообщающимися порами) и пенопласты (с закрытыми порами). Их используют для тепло- и звукоизоляции.

Жидкофазные композиты содержат в порах жидкость: антисептики, ингибиторы коррозии. Это лекарственные таблетки, ионообменные смолы и др.

Порошками карбоната кальция и каолина наполняют электроизоляцию,

плитки и трубы. Тальк в полипропилене увеличивает модуль упругости и теплостойкость. Сажа замедляет старение резины и полиэтилена.

Волокнистые композиты — стекло- и углепластики, органоволокниты.

Стеклопластик армирован стеклотканью или стекловолокном. У него малая (около 2 т/м^3) плотность и высокая (2 ГПа) прочность. Он не горит, устойчив к коррозии, по удельной прочности превосходит сталь и лишен недостатков, присущих термопластам. Используют в судо- и машиностроении, авиации, строительстве, в товарах спортивного назначения (лыжи, удилища).

Углепластик — эпоксидная смола, армированная углеродным волокном. Его прочность около 2 ГПа при плотности всего $1,5 \text{ т/м}^3$. Углепластик легкий, плохо переносит удары, электропроводный и дорогой. Применяют в авиации (вертолетные винты), судо- и автомобилестроении, в спорттоварах.

Асбобластик армирован асбестовым волокном, его теплостойкость до 400°C . Из него делают тормозные колодки, коллекторы электромашин. Из паронита (асбобластика на каучуковой основе) делают прокладки для герметизации неподвижных гидравлических соединений.

Органопласты — легкие ($1,1\text{--}1,4$) т/м^3 прочные композиты, армированные органическими волокнами. Из них делают парашюты, паруса, баллоны, тросы, бронежилеты. Арамидные органопласты обладают высокой вибростойкостью и усталостной прочностью, они держат нагрузки при температурах до 200°C .

Слоистые пластики — текстолиты, гетинаксы, дублированные пластики...

Текстолит — слоистый пластик на тканевой основе, пропитанный связующим. Из него делают подшипники скольжения, зубчатые колеса, шкивы, печатные платы. Стеклотекстолит широко используют в судостроении.

Гетинакс — сульфатно-целлюлозная бумага, пропитанная смолой. Его используют в электротехнике для изготовления плат и перегородок.

Дублированные пластики содержат ткань или резину; дуплен, линолеум...

Металлические композиты прочны, жестки и негорючи. Легкие металлы (Al, Mg, Ti) упрочняют неметаллическими и металлическими наполнителями.

Дисперсноупрочненные алюминиевые композиты армированы порошком оксида алюминия; их прочность достигает 450 МПа.

Из эвтектических алюминиевых композитов делают электроконтакты.

Бериллиевые композиты используют в ракетостроении.

Магниевые композиты незаменимы в авиации и ядерной технике.

Из жаропрочных никелевых композитов делают лопатки турбин реактивных двигателей, трубы для агрессивных сред и др. изделия, работающие в экстремальных условиях. Они конкурируют с никелевыми суперсплавами.

Псевдосплавы — композиты, полученные порошковой металлургией. W-Cu и W-Ag — электроконтакты; Fe-Cu и Fe-Mn-Cu — антифрикционные.

Керамические композиты жаропрочны, тверды и инертны. Их называют металлокерамикой или керметами. Из твердых керметов делают инструменты и зубные протезы. Из композита C-Cu делают щетки электрических машин.

Углеродистый графит состоит из углеродной матрицы, упрочненной углеродным волокном. Из него делают высокотемпературные узлы ракет, тормозные колодки тяжелых самолетов и космических шаттлов.

Лекция 19. Электротехнические материалы

У проводников удельное сопротивление менее $10 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Проводники I рода имеют электронную проводимость, это металлы и графит. Проводники II рода имеют ионную проводимость, это электролиты; ток в них сопровождается переносом вещества, что используют в гальванике. Проводники делят на две группы: металлы с малым и сплавы с большим удельным сопротивлением.

Малое удельное сопротивление при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ у серебра ($0,016 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$), меди ($0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$), золота ($0,024 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) и алюминия ($0,028 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$).

Криопроводники приобретают высокую проводимость при глубоком охлаждении. Из них делают кабели, охлаждаемые жидким водородом ($-253 \text{ }^\circ\text{C}$), неоном ($-246 \text{ }^\circ\text{C}$) и азотом ($-196 \text{ }^\circ\text{C}$). Криопроводники – очень чистые Al, Cu, Be.

Сверхпроводники теряют сопротивление при критических значениях температуры и напряженности магнитного поля. Температура перехода: Al–1 К, Sn–4 К, Pb–7 К, Nb–9 К. У высокотемпературных сверхпроводников переход происходит выше температуры кипения кислорода (90 К).

Сплавы с большим (более $0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) удельным сопротивлением нужны в измерительных и нагревательных приборах. Манганин, константан, фехраль.

Манганин содержит 85 % Cu, 12 % Mn и 3 % Ni. Удельное сопротивление ($0,4 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) манганина очень стабильно. Из него делают точные резисторы.

Константан содержит 59 % Cu, 1 % Mn и 40 % Ni. Удельное сопротивление ($0,5 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) слабо зависит от температуры. Это прочный и пластичный сплав.

Фехрали — прочные железные сплавы, содержащие до 25 % Cr и 7 % Al. У них очень большое ($1,4 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) удельное сопротивление, рабочая температура достигает $1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Из фехралей делают нагреватели, реостаты и др. изделия.

Сплавы для термопар — алюмель (Al–Ni), хромель (Cr–Ni), копель (Cu–Mn–Ni), платинородий (Pt–Rh).

Контактные материалы обладают высокой эрозионной стойкостью. Это сплавы тугоплавких и благородных металлов, металлокерамика (Cu–C, Ag–C), уголь электротехнический.

Удельное сопротивление диэлектриков $> 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Диэлектрики бывают полярные и неполярные, пассивные и активные. Все они сильно поляризуются в электрическом поле. Поляризация — смещение зарядов в атомах и молекулах.

Диэлектрические свойства — сквозная и поверхностная проводимость, электрическая прочность, диэлектрическая проницаемость, потери мощности.

Сквозная проводимость связана с наличием свободных зарядов, перемещение которых вызывает сквозной ток утечки и нагрев диэлектрика.

Поверхностная проводимость связана с наличием загрязнений и влаги на поверхности, она может значительно превышать сквозную проводимость.

Электрическая прочность — напряженность электрического поля, пробивающая диэлектрический материал. Пробой бывает сквозной, тепловой, поверхностный, электрический и электрохимический.

Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз поляризация ослабляет поле (взаимодействие зарядов в вакууме сильнее, чем в материале).

Потери мощности связаны с поляризацией диэлектрика и токами утечки.

У полярных диэлектриков поляризация ионная (слюда, керамика). Это материалы с большой (до 200) диэлектрической проницаемостью.

У неполярных диэлектриков поляризация электронная (алмаз, парафин, полиэтилен). У них диэлектрическая проницаемость невелика (менее 6).

Пассивные диэлектрики — полимеры, резина, стекло, слюда, древесина.

Свойства активных диэлектриков зависят от внешних воздействий; сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, электреты...

У сегнетоэлектриков (ферроэлектриков) спонтанная поляризация и очень большая диэлектрическая проницаемость: сегнетова соль, керамика BaTiO_3 ...

Свойства пьезоэлектрика зависят от механических напряжений. Микрофоны, детонаторы, датчики давлений, зажигалки. Кварц, керамика...

Электреты долго сохраняют остаточную поляризацию и создают вокруг электрическое поле. Микрофоны, телефоны, дозиметры... Лавсан, фторопласт.

Сопротивление полупроводников уменьшается с ростом температуры. Полупроводниковые элементы используют зависимость сопротивления от разных воздействий: температуры (терморезистор), механических напряжений (тензорезистор), освещения (фоторезистор), напряженности поля (варистор).

Полупроводники бывают простые и сложные, собственные и примесные, электронные и дырочные, узкозонные и широкозонные.

Ширина запрещенной зоны — энергия перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости. Металлы остаются проводниками при любой температуре, так как электронный газ у них образуется без затрат энергии. Материалы с шириной запрещенной зоны $< 0,1$ эВ называют полуметаллами. У полупроводников ширина запрещенной зоны $0,1-6$ эВ, а у диэлектриков > 6 эВ.

Простой полупроводник — чистый химический элемент: Si, Ge, Se...

Кремния в земной коре 30 %. У него ГЦК решетка, плотность $2,33$ т/м³, температура плавления 1414 °С. Из кремния делают транзисторы, интегральные схемы, диоды, солнечные батареи, зеркала для лазеров. Кремний — основа современной электроники. Токсичен при обработке, поражает легкие (силикоз).

Германия в земной коре 0,001 %. Из него делают транзисторы, фотодиоды, тензодатчики. Германий прозрачен для инфракрасных лучей и незаменим в инфракрасной оптике. У него очень высокий (ок. 4) коэффициент преломления.

Селен увеличивает проводимость на свету, из него делают фотоэлементы экспонометров и солнечных батарей, светочувствительные барабаны ксероксов и принтеров. Селеновые выпрямители преобразовывают огромные мощности.

Сложные полупроводники — химические соединения: SiC, GaAs, InSb...

Карбид кремния прочен, тверд, хрупок, теплопроводен, инертен. Это один из самых тугоплавких и широкозонных полупроводников. Из него делают мощные светодиоды и транзисторы. Рабочая температура до 700 °С!

Арсенид галлия из-за высокой подвижности электронов работает на высоких частотах. Светодиоды, интегральные схемы, солнечные батареи.

У антимонида индия тоже очень подвижные электроны. Детекторы ин-

фракрасного излучения для тепловизоров и приборов ночного видения.

Собственный полупроводник сам себя обеспечивает электронами проводимости. Содержание примесей мало, а концентрации дырок и свободных электронов равны. При низких температурах вырождается в диэлектрик.

Примесный полупроводник получает электроны проводимости от легирующих примесей. Большинство полупроводников — примесные. Примеси: доноры (отдают электроны) и акцепторы (забирают электроны).

Технология производства полупроводников включает три этапа: выращивание монокристалла, его глубокую очистку и микролегирование.

Магнитные материалы используют в электротехнике и радиотехнике.

Магнитные свойства — намагниченность, магнитная восприимчивость, коэрцитивная сила, потери энергии на перемагничивание, рабочие частоты...

По магнитной восприимчивости материалы делят на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.

У диамагнетика малая отрицательная магнитная восприимчивость, он слабо выталкивается из магнитного поля. Диамагнитны Si, P, Zn, Cu, Au, Ag.

У парамагнетика небольшая положительная магнитная восприимчивость, он слабо притягивается магнитным полем. Парамагнитны Al, Pt и др. металлы.

Ферромагнетик имеет большую восприимчивость и сильно притягивается полем. Ферромагнитны Fe, Ni, Co и некоторые редкоземельные металлы. При нагреве выше точки Кюри ферромагнетик превращается в парамагнетик.

У антиферромагнетика небольшая магнитная восприимчивость: Cr, Mn...

Ферримагнетик имеет большую восприимчивость. Ферримагнетизмом обладают оксидные соединения — ферриты, применяемые в радиотехнике.

Коэрцитивная сила — напряженность внешнего магнитного поля, размагничивающая намагниченный до насыщения материал. По величине коэрцитивной силы материалы делят на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие материалы — ферромагнетики с малой коэрцитивной силой и малыми потерями энергии на перемагничивание. Из них делают сердечники катушек электромагнитов и пластины электромашин. Очень чистое железо, электротехническая сталь, пермаллои, альсиферы, некоторые ферриты.

Пермаллой — Fe–Ni сплав. Коэрцитивная сила 16 А/м, частоты до 25 кГц.

Альсифер — хрупкий сплав Fe–Al–Si. Малая (2 А/м) коэрцитивная сила.

Ферриты — твердая и хрупкая оксидная керамика с большим удельным сопротивлением (магнитный диэлектрик). Из магнитомягких ферритов делают антенны, сердечники контуров, покрытия магнитных пленок и жестких дисков.

Магнитотвердые материалы — ферромагнетики с большой коэрцитивной силой. Специальные стали, литые и порошковые сплавы, магнитотвердые ферриты и сплавы редкоземельных металлов. Из них делают сильные магниты.

Магнитотвердая сталь легирована W, Mo, Cr и Co. Коэрцитивная сила стали около 13 кА/м. Из сталей EX3 и EX5K5 делают постоянные магниты.

Коэрцитивная сила высокочастотных ферритов 120–240 кА/м.

Редкоземельные магниты из сплавов Nd–Fe–B применяют в жестких дисках, наушниках, металлодетекторах. У них огромная (до 800 кА/м) коэрцитивная сила. Неодимовым магнитом можно вытащить груз до 500 кг.

Лекция 20. Защита металлов от коррозии

Коррозионные процессы бывают химические и электрохимические. Химическую коррозию вызывают горячие газы и неэлектролиты (например, нефтепродукты), а электрохимическую — электролиты, к которым относят растворы солей, кислот и щелочей.

Методы защиты от коррозии — антикоррозийное легирование, использование защитных покрытий и сред, катодная защита металлических конструкций, покраска и лакировка.

Легирование стали хромом (до 30 %), алюминием (до 5 %) и кремнием (3 %) — универсальная защита от всех видов коррозии. Коррозионностойкие стали устойчивы на воздухе, в пресной и морской воде, в слабых электролитах.

Защитные покрытия наносят диффузионной химико-термической обработкой, осаждением, напылением и покраской. Покрытия могут быть металлические, неметаллические и композиционные.

Диффузионные покрытия получают химико-термической обработкой. Металлы насыщают углеродом, азотом, алюминием, хромом...

Осажденные металлические покрытия бывают катодные и анодные.

Катодные покрытия формируют из металла более электроположительного по отношению к защищаемому. Луженые стали, покрытые свинцом или оловом, устойчивы на воздухе и в воде.

Анодные покрытия получают из металла более электроотрицательного по отношению к защищаемому. Анодирование сталей цинком или кадмием защищает их от атмосферной и морской коррозии.

При анодировании алюминия деталь погружают в серную кислоту и соединяют с анодом, выделяющийся кислород окисляет металл, образуя на его поверхности защитную пленку.

Гальванические покрытия представляют собой тонкий (1–300 мкм) слой металла, нанесенный электролитическим осаждением (гальваностегией). Гальванические покрытия получают хромированием, никелированием, цинкованием, меднением, золочением, серебрением...

Гальваническим хромированием защищают сталь, чугун, медь. Хромовые покрытия твердые, износостойкие, коррозионностойкие и красивые.

Гальваническим никелированием защищают металлы и неметаллы. Декоративные никелевые покрытия износостойкие и коррозионностойкие.

Гальваническое золочение позволяет придать изделию шикарный вид без больших затрат: очень тонкий защитный слой содержит мало золота.

Неметаллические покрытия бывают оксидные, эмалевые, лакокрасочные, полимерные и керамические. Они не так прочны, как металлические, и со временем могут отслаиваться.

Оксидные покрытия наносят химическим, электрохимическим, термическим и плазменным методами. Они выполняют как защитные, так и декоративные функции.

Химическое оксидирование заключается в обработке металла сильным окислителем. Полученная на поверхности детали оксидная пленка надежно за-

щищает ее от дальнейшего окисления.

Термическое оксидирование ведут в горячей атмосфере водяного пара или чистого кислорода. Термическое оксидирование черных металлов называют воронением.

Воронение заключается в получении тонкой и плотной оксидной пленки. Для блеска и улучшения защитных свойств эту пленку часто пропитывают маслом. Сейчас воронение применяют в основном как декоративную обработку.

Основные методы напыления защитных покрытий — газопламенный, плазменный и лазерный.

При газопламенном напылении металлическую проволоку распыляют ацетилен-кислородной горелкой, капли металла попадают на деталь и образуют на ее поверхности защитное покрытие.

При плазменном напылении покрытий нужное вещество переносят на поверхность детали струей низкотемпературной плазмы, получаемой в плазмотроне. Плазма расплавляет любые материалы.

Лакокрасочные покрытия выполняют защитные и декоративные функции.

Лак — раствор смолы (полимера) в спирте, масле или скипидаре.

Масляная краска — растительное масло, загущенное пигментом.

Эмаль — суспензия пигментов и наполнителей в специальном лаке.

Компоненты лакокрасочных композиций — пленкообразователи, растворители, разбавители, пластификаторы, сиккативы, отвердители, антиоксиданты, красители, пигменты и наполнители.

Пленкообразователи — масла и полимерные смолы.

Растворители — ацетон, бензин, скипидар, уайт-спирит.

Разбавители высыхают раньше растворителей; бензол...

Пластификаторы улучшают пластичность композиции; касторовое масло.

Сиккативы ускоряют высыхание состава; соли свинца или цинка.

Антиоксиданты замедляют старение покрытия.

Наполнители уменьшают стоимость и улучшают механические свойства покрытия; тальк, мел и другие порошки.

Лакокрасочное покрытие четырехслойное: грунт, шпатлевка, краска, лак.

Грунтовка — смесь специального лака с пигментами. Это подстилающий слой, обеспечивающий хорошее сцепление покрытия с поверхностью.

Шпатлевка — промежуточный слой, наносимый на грунт для выравнивания поверхности. Улучшает внешний вид изделия и экономит краску.

Пленка лака защищает покрытие и выполняет декоративные функции.

Катодная защита металлоконструкций заключается в наложении небольшого отрицательного потенциала, получаемого от станции катодной защиты. Так защищают трубопроводы, кабели, арматуру, корпуса судов.

Защитные атмосферы используют при литье, термической обработке и сварке металлов. Атмосфера может быть нейтральной или восстановительной.

Нейтральная атмосфера лишена кислорода: азот, аргон, вакуум...

Восстановительная атмосфера — водород и азотно-водородные смеси.

Лекция 21. Наноматериалы

Нанонаука изучает мир атомов и молекул. Это нижняя граница пространства, где действуют законы классической физики. За ней начинается квантовый мир, который мы, как существа другой реальности, не в состоянии даже представить. Там все другое: математика, физика, логика, здравый смысл.

Материя и энергия содержат темную и обычную составляющие. Темная часть проявляет себя косвенно. Чтобы объяснить ускоренное разбегание галактик, приходится допускать, что темная часть превосходит светлую.

Обычная материя тоже представлена в двух формах: с положительными протонами и отрицательными электронами, и с противоположными зарядами частиц (антиматерия). При контакте материи и антиматерии происходит аннигиляция вещества с огромным выбросом энергии ($e = mc^2$). В наблюдаемой Вселенной имеет место необъяснимый дефицит антиматерии. Материю делят на поле и вещество; в квантовом мире такое разделение теряет смысл.

Вещество состоит из атомов. Они практически вечны и до того, как попасть к нам, побывали в составе многих звезд. Атомы не изнашиваются, в них нет трения и рассеяния энергии, это квантовые объекты, не подчиняющиеся законам классической физики. Представить атом нельзя: в нашем мире нет аналогов. Хотя планетарная модель атома и далека от реальности, но плотное ядро у него есть, и оно очень мало. Электроны находятся на дискретных орбитах, но не вращаются на них подобно планетам. Они вообще не имеют границ и проявляют себя как частицы и как волны. Электроны перемещаются между орбитами, но в пространстве между ними при этом не появляются!

Атомы водорода, содержащие один протон, появились вскоре после Большого взрыва (14 млрд лет назад). Затем из них в результате термоядерной реакции образовались атомы гелия, содержащие два протона. Более тяжелые атомы появились при взрывах сверхновых звезд. Существует более сотни разных атомов; они могут соединяться друг с другом, образуя молекулы и кристаллы. Без такой самоорганизации эволюция материи была бы невозможна. Одинаковые атомы могут создавать разные молекулы, образуя аллотропные модификации элемента. У кислорода их две, у фосфора — 11, у S и C — много.

Аллотропия — способность одинаковых атомов образовывать разные молекулы и кристаллы. В первом случае говорят об аллотропии состава: кислород может существовать в виде молекул O_2 или O_3 . Во втором случае говорят об аллотропии формы: углерод существует в виде алмаза, графита и других кристаллических форм. Аллотропию формы называют полиморфизмом.

Полиморфизм — способность одинаковых атомов при разных внешних условиях образовывать кристаллы с разной кристаллической решеткой.

Атомы состоят из компактного ядра и электронной оболочки. Число протонов в ядре определяет принадлежность атома к какому-либо химическому элементу (водород, гелий, литий), а число нейтронов определяет изотоп атома.

Протоны могут существовать очень долго, а свободные нейтроны живут лишь около 15 минут и распадаются, если не успевают соединиться с протоном.

Микромиром называют диапазон размеров от 1 мм до 1 мкм, он виден в

оптический микроскоп и хорошо изучен. Многие микроструктуры вам знакомы.

Наномир — диапазон размеров от 1 мкм до 1 нм. Он изучен хуже, так как виден лишь в электронный микроскоп. Размер атома водорода около 0,1 нм; размер больших белковых молекул и толщина диэлектрического слоя в новых микросхемах около 10 нм; средний пробег молекулы газа между соударениями при н.у. 100 нм; размер бактерии 500 нм; толщина волоса около 80 000 нм.

Нанотехнологии требуют приборов для наблюдения за нанообъектами и устройств для манипуляций с ними. Непосредственное перемещение атомов и молекул физическими методами — сложнейшая техническая задача.

Используют приборы с разной разрешающей способностью: оптические микроскопы (200 нм), электронные микроскопы: сканирующие (5 нм) и просвечивающие (1 нм); зондовые (0,2 нм). Рентгеноструктурный анализ определяет положение атома в решетке с точностью до 0,1 нм.

Сканирующий туннельный микроскоп создан в 1981 году компанией IBM. Он позволяет перемещать отдельные атомы посредством электричества, подающегося на образец через нанозонд (очень острую иглу).

Атомно-силовой микроскоп, изобретенный в 1986 году, фиксирует малые отклонения зонда, вызванные взаимодействием атомов иглы и образца. На расстояниях до 0,1 нм атомы отталкиваются, а на больших — притягиваются.

В 1959 г. нобелевский лауреат Ричард Фейнман указал на потрясающие возможности наномира и предложил собирать новые материалы перемещением атомов. Расчеты показывают, что для последовательной сборки атом за атомом даже 1 мл воды требуется столько же операций, сколько и для вычерпывания океана чайной ложкой. Нужны другие подходы, основанные, подобно химии, на параллельных процессах. Идеи Фейнмана подтверждает т.н. закон Мура.

Согласно Закону Мура число транзисторов на кристалле интегральной схемы удваивается каждые 2 года. Эта закономерность уже 50 лет подтверждает огромную емкость наномира. Однако сейчас предел плотности почти достигнут.

Принципиальные отличия наноструктур связаны с квантовыми эффектами и с наличием разветвленной фазовой поверхности, радикально изменяющей свойства материала и, прежде всего, его химическую активность.

Живая материя очень эффективно использует свое пространство. Геном человека записан так компактно, что помещается внутри каждой клетки. Четыре нуклеотида в разных сочетаниях содержат план строения и функционирования всего организма. Клетка человека содержит 46 молекул ДНК, причем в каждой из них находится около 160 млн пар нуклеотидов. Весь этот колоссальный объем информации сохраняется и копируется почти без ошибок. Это гораздо более надежная система хранения информации, чем в наших компьютерах.

Наночастицы иногда образуются самостоятельно. Например, атомы и молекулы при определенных условиях сами собираются в наноструктуры под действием химических реакций. Однако сложные структуры так получить пока не удается; самосборка интегральных схем произвела бы революцию в электро-

нике!

Самосборка белковых молекул — одно из чудес наномира, скрывающее тайну зарождения жизни. Белки состоят из тысяч аминокислот, расположенных в строго определенном порядке. Совершенно невероятно, чтобы такие сложные молекулы появились случайно, в результате хаотического перемещения атомов.

Развитие нанотехнологий началось в 1985 году с открытия новых форм углерода — фуллеренов, сферические молекулы C_{60} которых состоят из 60 атомов; затем обнаружили существование еще больших молекул C_{70} и C_{80} .

В 1991 году с помощью электронного микроскопа были найдены многослойные углеродные нанотрубки, а в 1993 году — однослойные.

Нанотрубки содержат до миллионов атомов углерода. Теоретически из них можно создать волокна, которые в 20 раз прочнее и в 5 раз легче стали. Если из этих волокон изготовить легкий трос, то появится возможность приступить к реализации грандиозного проекта по созданию орбитального лифта. Он свяжет космическую станцию, находящуюся на геостационарной орбите (неподвижно над экватором на высоте 36 000 км) и земную поверхность.

Естественные наноматериалы — пористые кремний и оксид алюминия — обладают огромной внутренней фазовой поверхностью. Их используют в оптической электронике, при изготовлении очень тонких фильтров и мембран.

Искусственные наноматериалы — углерод, кремний, фосфор и германий.

Углеродные наноструктуры — плоские развернутые фуллерены называют графеном, а свернутые — углеродными нанотрубками.

Графен представляет собой атомарный слой из гексагональных углеродных ячеек. Это двумерная кристаллическая модификация графита с уникальными электрическими, тепловыми, оптическими и механическими свойствами. В графене высокая скорость движения электронов, что делает перспективным его использование в нанoeлектронике; однако приходится учитывать отсутствие запрещенной зоны и связанные с этим токи утечки в быстрых графеновых транзисторах. Полная оптическая прозрачность позволяет делать из него светодиоды, солнечные батареи и чипы оптической электроники.

Углеродные нанотрубки — свернутый графен диаметром до 100 нм. Обладают огромной (50 ГПа) прочностью, электро- и теплопроводностью. Из них делают нити, композиты, провода, топливные элементы, светодиоды. Нанотрубки применяют в литий-ионных аккумуляторах и легких углепластиках.

Кремниевые наноструктуры обнаружены в 2010 г. Интерес представляет полученный в 2012 году силицен — двумерная модификация кремния.

Применение наноматериалов — непромокаемые грязеотталкивающие ткани из гидрофобных нановолокон, стеклоочистители с наночастицами диоксида титана, антикоррозионная и антибактериальная защита, покрытия, компоненты для транзисторов, антибликовые экраны, эффективные солнечные батареи, биологически совместимые имплантаты, нанопленки и наносенсоры...

Нанопленки хорошо отражают электромагнитные волны оптического, ультрафиолетового и даже рентгеновского диапазона. Рентгеновские зеркала уже применяют в рентгенографии. Кремниевые нанопленки прозрачны.

Медицинские нанотехнологии доставляют медикаменты в недоступные

для традиционных методов места с помощью полых микрокапсул.

Биологические наносенсоры определяют низкие концентрации различных веществ. Сенсоры глюкозы помогают диагностировать сахарный диабет в самой начальной стадии, когда еще удается предотвратить развитие болезни.

Наномедицина диагностирует и лечит болезни на молекулярном уровне. Врачи вводят больным наночастицы с золотым покрытием, оседающие в опухолях. Затем лазером золото нагревают и избирательно выжигают только раковые клетки (традиционная химиотерапия уничтожает все быстрорастущие клетки, например, волосы; она наносит большой ущерб организму).

Белковая инженерия — наука создания и изменения белков. Сейчас активно исследуют процессы по созданию искусственных белков, избирательно атакующих опасные вирусы.

Агенты визуализации позволяют наблюдать за процессами в различных органах человека. Радиоактивный изотоп бария ^{37}Ba применяют для диагностики рака, а изотоп таллия ^{201}Tl — для диагностики состояния сердечно-сосудистой системы. Молекулярные зонды фиксируют самое начало заболевания, когда еще нет симптомов.

Квантовые точки представляют собой полупроводниковые наночастицы, способные захватывать электроны. Их размер должен быть настолько мал, чтобы проявление квантовых эффектов было существенным. Другими словами, это полупроводник, свойства которого зависят от размера. Так, в зависимости от размера квантовые точки испускают свет разного цвета. Их используют как биологические маркеры для обнаружения раковых опухолей с помощью флуоресцентной спектроскопии. Они могут служить в качестве кубитов квантового компьютера. Квантовые точки позволили создать голубые лазеры, еще недавно считавшиеся невозможными. Дисплеи на квантовых точках имеют хорошую цветопередачу и контрастность. Недавно появились эффективные солнечные батареи на квантовых точках.

Наноконпозиты — новые материалы, армированные наночастицами. Сверхтвердые керамические наноконпозиты, армированные наночастицами силикатной глины, используют в автомобилестроении (ступени, панели).

Обычная керамика твердая и хрупкая, ее очень трудно обрабатывать. Уменьшение зерна снижает хрупкость и упрощает обработку. Пластическая деформация нанокристаллической керамики на основе двуокиси циркония достигает невероятных 300 %!

Нанокристаллические нитрид кремния Si_3N_4 и карбид кремния SiC используют для изготовления высокопрочных пружин и подшипников. У этих материалов отличные физические, химические и механические свойства.

Нанопокрyтия повышают износостойкость и препятствуют коррозии. Уже есть умные покpытия, которые в случае повреждения сами залечиваются. Нанопокpытия для военной техники меняют цвет для маскировки.

Нанотехнологии позволяют создавать мощные катализаторы для химии, нефтеперерабатывающей, автомобильной и пищевой промышленности. Платиновые нанокатализаторы в 20 раз эффективнее литой платины.

Методы получения наноматериалов — коллоидные технологии, конденса-

сация в атмосфере инертного газа, механическое перемалывание, плазменный синтез, электролитическое осаждение, литография...

Литография широко используется при производстве интегральных схем. Она бывает фотографическая, иммерсионная, рентгеновская и печатная.

Фотолитография — техпроцесс репликации чертежа электрической схемы. Сильно уменьшенное изображение схемы проецируют на кремниевую подложку, покрытую светочувствительным слоем, затвердевающим на свету. Маска — пленка, а подложка — фотобумага. Остатки светочувствительного слоя смывают растворителем. Процесс повторяют, пока не будет создана вся схема. Ширина дорожки ограничена длиной световой волны. Современные чипы создают ультрафиолетовым светом с длиной волны 10–15 нм.

При иммерсионной литографии операции выполняются в сверхчистой жидкости, куда погружается оптическая система. Это позволяет улучшить фокусировку и уменьшить толщину дорожек. Рентгеновская литография, использующая более короткие волны, позволила преодолеть рубеж в 10 нм. В этой технологии применяют зеркала с нанопокрытием.

Нанопечатная литография переносит изображение на подложку штамповкой, процесс облучения из технологии исключен. Она позволяет получать 10 нм структуры на больших площадях, недоступных другим методам.

Нанопроводники — нанопровода из углерода, кремния, золота, меди. Диаметр нанопровода из углеродных нанотрубок всего несколько нанометров. Методы очистки, распутывания, выпрямления и сортировки нанотрубок сложнее, чем методы выращивания монокристаллов. Нанопровод называют квантовым проводом, так как на его работу сильно влияют краевые эффекты.

Молекулярная электроника ставит целью создание функциональных элементов (транзисторов, логических элементов) на основе молекул. Если цель будет достигнута, произойдет переход от микроэлектроники к наноэлектронике.

Квантовые коммуникации основаны на квантовом запутывании фотонов. Из фотона с большой энергией получают два менее энергичных запутанных фотона. Измерение характеристик одного из них оказывает влияние на другой, что и позволяет осуществить телепортацию информации или создать квантовые алгоритмы вычислений. Такая передача абсолютно неуязвима для перехвата.

Квантовые вычисления благодаря мощной параллельности могут выполняться в миллионы раз быстрее, чем вычисления в последовательных компьютерах. Эти вычисления используют спин электрона.

Спин элементарной частицы может принимать два значения и переносить один бит информации, который называют кубитом. Методы сохранения и передачи информации на основе спина электрона чрезвычайно сложны, поскольку его значение принципиально неизвестно до измерения. Характер взаимодействия спина со светом зависит от длины волны и ее поляризации.

Спинтроника — создание схем на основе спинов, а не зарядов. Это новый путь развития электроники на основе сверхточных магнитных наноструктур.

Кубиты можно использовать для математических операций сразу с четырьмя разными состояниями, что открывает удивительные перспективы. Однако пока квантовые математические операции чрезвычайно чувствительны к

внешним воздействиям (примерно одна ошибка на каждую 1000 вычислений).

Квантовая телепортация — это передача квантового состояния частицы на расстояние. Для этого используется разнесенная пара сцепленных (запутанных) частиц, описываемых одной и той же волновой функцией. При удалении друг от друга они сохраняют информацию о состоянии своего партнера. Явления квантовой телепортации будут использоваться для построения масштабных сетей.

Создание молекулярной электрической схемы — важнейшая задача нанохимии. Надо подобрать молекулы для элементов схемы, не мешающих квантовым вычислениям. Исследования молекулярной схемы с помощью сканирующего туннельного микроскопа могут разрушить на саму схему.

Начинает развиваться сборка молекулярных наноразмерных схем. Пока химики добились некоторых успехов лишь в синтезе полупроводников.

Устройства хранения информации, созданные на основе нанотехнологий, имеют огромную емкость и быстроедействие. Перспективна оптическая запись в трехмерные кристаллические структуры. Образцом служит природа, создавшая компактную и надежную систему хранения генетической информации.

Разрешение устройств отображения информации определяется размером пикселей (минимальных неделимых квадратных объектов). Размер пикселя светочувствительных матриц сейчас около 1 мкм. Пиксели устройств отображения пока крупнее, но и они постоянно уменьшаются. При изготовлении дисплеев высокого разрешения уже начали использовать нанотехнологии.

Энергия доступна людям разных стран в разной степени. Около 2 млрд человек на планете не имеют доступа к электроэнергии, а еще около 2 млрд используют для ее выработки биомассу. Бедность — это недостаток энергии.

Солнечная энергия в фотоэлементах используется с эффективностью 30 % (один фотон генерирует один электрон), остальная энергия рассеивается в виде тепла. В квантовой точке один фотон генерирует до трех свободных электронов, что может повысить эффективность использования солнечной энергии до 65 %.

Главная проблема водородной энергетики — получение дешевого водорода. Воду надо разложить на водород и кислород экономически целесообразным методом. Разработана технология, в которой водород получают с помощью солнечной энергии в массивах нанотрубок из диоксида титана. Нанотрубки повышают эффективность диссоциации воды и запасают водород.

Передача электроэнергии связана с потерями из-за сопротивления проводов. Использование сверхпроводящих кабелей требует дорогого охлаждения. Сопротивление углеродных нанотрубок в 6 раз меньше, чем у меди. На их основе можно создать прочный квантовый провод, который будет в 10 раз легче медного. Эта технология может конкурировать с использованием криопроводников и высокотемпературных сверхпроводников.

Пористые нанокристаллические материалы способны хранить электрическую энергию с гораздо большей плотностью, поэтому батареи и аккумуляторы на их основе могут работать без подзарядки гораздо дольше.

Лекция 22. Адаптивные материалы

Адаптивные (или умные, интеллектуальные) материалы реагируют на внешние воздействия, адаптируясь к условиям и сохраняя работоспособность (например, залечивая повреждения). Проектируя их, мы подражаем живой материи, восстанавливающейся структурно и функционально. Это сплавы с памятью формы, активные диэлектрики, магнитострикционные материалы...

Память формы — способность сплава запоминать форму, которую он имел при определенных условиях. Если условия восстановить, восстановится и форма изделия. Часто памятью формы называют и сверхупругость. Оба явления связаны с обратимым мартенситным превращением, протекающим в сплаве при определенных условиях. Память формы бывает одно- и двусторонняя.

Односторонняя память — способность сплава запоминать лишь горячую форму. Двусторонняя память — способность запоминать холодную и горячую формы; сплав может циклически изменять форму без внешней силы.

Сверхупругость — восстановление формы при неизменной температуре. Мартенситное превращение в таком материале инициируется не температурой, а механическими напряжениями. Сверхупругие сплавы восстанавливают свою форму после довольно больших (6–7) % деформаций. Это похоже на упругость.

Сплавы с памятью формы используют для преобразования тепловой энергии в механическую. Это нитинолы (Ni–Ti), медные (Cu–Al–Ni, Cu–Zn–Al) и некоторые другие сплавы. Медные сплавы имеют более высокую (до 200 °C) температуру мартенситного превращения. Температура превращения у нитинолов ниже 100 °C, но они прочнее и лучше сопротивляются коррозии.

Нитинол — интерметаллид, содержащий 55 % Ni. Открыт в 1962 году. Прочен, коррозионностоек, полностью восстанавливает деформации величиной до 8 %. Может выполнять функции датчика и исполнительного механизма. Напряжение восстановления достигает 800 МПа. Хорошая биосовместимость и высокая демпфирующая способность. Лишь немного дешевле серебра.

Сплавы с памятью применяют для гашения колебаний, соединения деталей в недоступных местах, контроля форм конструкций, развертывания солнечных батарей и антенн на космической орбите, в медицинских операциях. Иллюзионисты очень любят сплавы с памятью формы, они их «гну́т» взглядом.

В Швейцарии выпускают горные лыжи, в которых интеллектуальный сплав Cu–Zn–Al гасит вибрацию. Эту же идею используют для гашения сейсмических колебаний нитинолом, вводимым в конструкцию зданий.

Композиционные материалы, армированные проволокой с памятью формы, могут изменять свою акустическую прозрачность, затухание и направленность излучаемого звука.

Память формы используют для соединения деталей в недоступных местах: самосрабатывающие муфты для труб, самофиксирующиеся заклепки...

Соединительные нитиноловые втулки применяют в гидравлической системе самолетов. В одном из американских истребителей 300 000 таких соединений и ни разу не поступало сообщений о поломках. Втулку с внутренними выступами помещают в криостат, где при –196 °C выступы развальцовывают.

Втулку надевают на концы труб. При нормальной температуре выступы «вспоминают» исходную форму, выпрямляются и прочно врезаются в поверхности. Получается прочное и надежное соединение. Такие втулки используют в авиационной, космической и автомобильной технике.

В медицине из нитинола делают фильтры для кровеносной системы, искусственные мышцы (приводимые в действие электрическим током), ортопедические имплантаты, проволоку для выравнивания зубов, инструмент.

Активные диэлектрики — пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики и др.

Пьезоэлектрический эффект бывает прямой (поляризация напряженного кристалла) и обратный (деформация пьезокристалла в электрическом поле).

У пьезоэлектриков (кварц, турмалин, топаз) сильная связь между механическими и электрическими характеристиками. Их используют в датчиках деформаций, акселерометрах, трансформаторах, преобразователях. Такие трансформаторы установлены в подсветке ноутбуков. Пьезоэлектрические преобразователи есть в атомно-силовых микроскопах, в кварцевых часах и эхолотах, в устройствах позиционирования. Акустические преобразователи используют в медицине (эхография, ультразвуковая диагностика, хирургия).

Сегнетоэлектрик — активный диэлектрик со спонтанной поляризацией. Нагрев до точки Кюри разрушает домены, после чего материал переходит в параэлектрическое состояние. Специальная керамика, некоторые полимеры...

Магнестрикционные материалы преобразуют магнитные поля в механические напряжения и наоборот. Магнестрикционный эффект в той или иной степени присущ всем ферромагнетикам. Сильная магнестрикция у никеля и некоторых редкоземельных металлов. Магнестрикционные демпферы уменьшают колебания мощных мостовых тросов и гасят вибрацию вертолетных винтов. Индивидуальный контроль лопастей позволил снизить амплитуду колебаний винта на 90 %.

Механострикционные материалы в магнитном поле изменяют не только свой объем, но и другие механические характеристики. Механострикция включает в себя и магнестрикцию; это более широкое понятие.

Адаптивные медицинские материалы увеличивают продолжительность жизни людей с ограниченными возможностями и улучшают ее качество.

Продолжительность жизни за последние 150 лет увеличилась вдвое, удвоилась и доля людей с ограниченными возможностями. Эффективным способом лечения тяжелых заболеваний считается пересадка живых органов, которых не хватает. Нужны трансплантаты из искусственных биоматериалов.

Адаптивные биоматериалы учитывают индивидуальные особенности пациента. В косметической стоматологии используют цветной цемент, не отличающийся по цвету от соседних зубов, а в хирургии — растворимые нити, искусственные хрусталики и силиконовые протезы.

Жидкости с ферромагнитными частицами применяют в подшипниках жестких дисков, динамиках и управляемых оптических системах. Магнитную жидкость с наночастицами оксида железа используют в онкологии: с помощью магнита ее вводят в опухоль, переменным магнитным полем нагревают до нужной температуры и разрушают раковые клетки.

Золотые наночастицы образуют разноцветные кластеры. Это свойство используют при диагностике ВИЧ и в онкологии: опухоль приобретает цвет и становится видна невооруженным глазом. Работают над диагностикой малярии и туберкулеза.

Военные используют адаптивные материалы для защиты и маскировки.

Легкая броня из скрученных полиэтиленовых волокон не протыкается даже шилом. Такой бронежилет удерживает даже пулю со стальным сердечником, выпущенную из автомата АКМ-74.

Сополимер полиуретана толщиной всего 3 см останавливает пулю, летящую со скоростью 350 м/с. Пуля вязнет, не оставив даже следа: материал плавится при ударе и тут же застывает, зарастив повреждения. Прозрачность этого материала позволяет делать из него пуленепробиваемые стекла. Такая защита в 7 раз легче стальной. Работают над созданием полиуретановых бронежилетов и брони для космических аппаратов.

Метаматериалы приобретают удивительные свойства за счет особой структуры, в природе не встречающейся. Некоторые наноструктуры обладают отрицательным коэффициентом преломления световых лучей и направляют их по контуру материала, делая предмет невидимым. Возможна полная маскировка в микроволновом диапазоне и частичная — в видимой области спектра.

Топологические изоляторы обладают уникальными электрическими свойствами. Внутри это полупроводники, а у поверхности — металлы. Они найдут применение в квантовых компьютерах и электронных схемах.

Аномально низкое трение возникает в вакууме при контакте металлов с полиэтиленом или графитом, продуваемом гелием. Коэффициент трения уменьшается в 100 раз (до 0,001). После прекращения обдувки трение быстро восстанавливается до исходного значения. На основе этого явления уже созданы адаптивные твердые смазочные материалы для работы в космических условиях.

Антиблокировочная система торможения автомобиля — пример умной фрикционной системы с обратной связью. Она повышает эффективность торможения, циклически регулируя силу нажатия тормозных колодок на диски колес с целью избежать их проскальзывания по мокрому покрытию. Улучшается управляемость, уменьшается длина тормозного пути и износ шин.

Адаптивная одежда (скафандры) содержит теплозащитные элементы из волокнистых материалов. При колебаниях температуры их объем изменяется за счет тепловой деформации волокон. Это приводит к изменению плотности текстильного материала и улучшению теплозащитных характеристик одежды.

Индикаторы коррозии на основе прозрачного акрилового лака окрашиваются розовым цветом в щелочной среде. Нанесенные на фюзеляж самолета, они позволяют обнаруживать очаги коррозии глубиной менее 15 мкм. Интенсивность окраски «умного» покрытия выше там, где сильнее коррозия.

Сверхпроводники используют для получения очень сильных магнитных полей. Однако увеличение напряженности поля выше критической величины убивает сверхпроводимость точно так же, как и нагрев выше критической температуры. Чтобы этого не происходило, в сверхпроводящих магнитах исполь-

зуют обратную связь, поддерживающую циркуляцию незатухающего тока. Такие соленоиды используют для удержания плазмы в термоядерных реакторах и для выравнивания пиковых мощностей в больших энергосистемах. Применение сверхпроводников в электромашинах позволяет в 5 раз уменьшить их массу при сохранении мощности. Выталкивание сверхпроводников из магнитного поля уже используют в железнодорожном транспорте на «магнитной подушке».

В адаптивных технических системах используют активные диэлектрики. Пьезоэлектрики позволяют создавать устройства точного позиционирования с обратной связью в зондовых микроскопах и других устройствах. В японском метро есть станция с пьезоэлектрическим полом, в котором давление ног используют для выработки электроэнергии для питания турникетов.

Пластики, поглощающие кислород, используют в упаковках для пищи и напитков. В связующее вводят добавки, чувствительные к ультрафиолетовому излучению. Из них делают бутылки и пробки для напитков, пленки для хлеба.

Новые пленки для упаковки мясопродуктов содержат в своем составе консерванты (обычно горчичное или кориандровое масло). Такая упаковка в несколько раз увеличивает допустимые сроки хранения мяса.

Из пластиков с антимикробной активностью делают обшивку судов, покрытия стен и крыш, оболочки котлов, разделочные доски, детские игрушки, сандалии, занавески для ванн, канцелярские принадлежности, мусорные баки. Эти материалы способны сделать нашу жизнь здоровее и даже продлить ее.

Литература

1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. — Москва : Машиностроение, 1990. — 528 с.
2. Материаловедение : учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. — 7-е изд. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — 648 с.
3. Пятов, В. В. Материаловедение : конспект лекций / В. В. Пятов, С. В. Бровка. — Витебск: УО «ВГТУ», 2011. — 48 с.
4. Пятов, В. В. Материаловедение. Основные термины и понятия : пособие для студентов высших технических учебных заведений / В. В. Пятов [и др.]. — Витебск: УО «ВГТУ», 2000. — 106 с.
5. Пятов, В. В. Материаловедение : лабораторный практикум / В. В. Пятов, С. В. Бровка. — Витебск: УО «ВГТУ», 2012. — 73 с.
6. Пятов, В. В. Лабораторный практикум по курсам «Материаловедение», «Материаловедение и обработка материалов» и «Материаловедение и защита от коррозии» / В. В. Пятов, О. Н. Ахтанин. — Витебск: УО «ВГТУ», 2003. — 59 с.

Учебное издание

Пятов Владислав Владимирович

Голубев Алексей Николаевич

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Материаловедение и обработка материалов.
Материаловедение и защита от коррозии.
Конструкционные и электротехнические материалы**

Конспект лекций

Редактор *Н. В. Медведева*

Корректор *Т. А. Осипова*

Компьютерная верстка *Н. Н. Матвеева*

Подписано к печати 09.01.18. Формат 60x90 1/16. Усл. печ. листов 3.69.
Уч.-изд. листов 3.7. Тираж 60 экз. Заказ № 9.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210035, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.