

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

В. В. Пятов, А. Н. Голубев

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Конспект лекций

для студентов специальности 1-43 01 07
«Техническая эксплуатация энергооборудования организаций»

Витебск

2020

УДК 620.22
ББК 30.3
П 99

Рецензенты:

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

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

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО ВГТУ», протокол № 3 от 27.11.2020.

Пятов, В. В.

П99 Конструкционные материалы : конспект лекций / В. В. Пятов,
А. Н. Голубев. – Витебск : УО «ВГТУ», 2020. – 60 с.
ISBN 978-985-481-661-6

Конспект лекций содержит необходимый минимум информации по дисциплине «Конструкционные материалы». Учебное издание облегчает понимание и ускоряет изучение соответствующего курса. Предназначено для студентов специальности 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования предприятий».

УДК 620.22
ББК 30.3

ISBN 978-985-481-661-6

УО «ВГТУ», 2020

Содержание

Введение.....	4
Лекция 1. Исторический обзор.....	5
Лекция 2. Свойства материалов.....	9
Лекция 3. Состояния материалов.....	12
Лекция 4. Состав и структура материала.....	15
Лекция 5. Методы исследования материалов.....	18
Часть II. Основы металловедения.....	20
Лекция 6. Кристаллизация металлов.....	21
Лекция 7. Диаграммы состояния сплавов.....	23
Лекция 8. Деформация и рекристаллизация металлов.....	26
Лекция 9. Термическая обработка металлов.....	29
Часть III. Машиностроительные материалы.....	32
Лекция 10. Черные металлы.....	32
Лекция 11. Тяжелые металлы.....	35
Лекция 12. Легкие металлы.....	38
Лекция 13. Благородные и тугоплавкие металлы.....	41
Лекция 14. Неметаллические материалы.....	44
Лекция 15. Материалы с особыми свойствами.....	48
Лекция 16. Композиционные материалы.....	52
Литература.....	59

Введение

В курсе «Конструкционные материалы» изучают металлические, неметаллические и композиционные материалы, используемые в современном машиностроении, приборостроении и энергетике для изготовления несущих конструкций и деталей машин.

В следующей части будут изучены электротехнические материалы – проводники, полупроводники, диэлектрики и магнитные материалы, используемые для создания элементной базы в приборостроении, энергетике и электронике.

Как известно, 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 волокон, тончайшего электропроводного графена или чрезвычайно прочных углеродных нанотрубок. Или другой пример. Твердая закаленная сталь отличается от мягкой отожженной лишь своей структурой, ведь химический состав материала при термической обработке не изменяется.

Цель изучения материаловедения – 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. Часто критерием выбора выступает себестоимость или долговечность изделия, но возможны и другие (например, экологические или эстетические) со-

ображения. Для решения такой задачи требуются не только хорошие теоретические знания по материаловедению, но и большой практический опыт.

Лекция 1. Исторический обзор

История науки о материалах тесно связана с историей развития общества, основные этапы которой даже называли по освоенным на тот или иной период материалам: каменный век, бронзовый век, железный век, атомный век...

Около 3 000 000 лет назад приматы встали на ноги и освободили руки для работы – сформировался вид людей *Homo erectus*. Примерно 1 000 000 лет назад у них появились примитивные каменные орудия. Около 500 000 лет назад был покорен огонь – материалы начали нагревать, их свойства при этом изменялись.

Приблизительно 200 000 лет назад в Африке сформировался человек современного вида *Homo sapiens*. Около 40 000 лет назад, к концу ледникового периода, эти африканские мигранты начали заселять Европу и вскоре жившие там малочисленные племена неандертальцев куда-то исчезли.

20 000 лет назад появилась керамическая посуда из обожженной глины – первый искусственный материал, полученный человеком. 10 000 лет назад люди начали делать украшения из самородков золота и меди. Это первые освоенные нами металлы, но для изготовления твердых и прочных орудий они не годились.

5 000 лет назад началось освоение бронзы, и зародилась металлургия. Это был первый сплав, освоенный человечеством. Бронзовые орудия значительно прочнее и более твердые, чем медные. Длиннейший каменный век близился к завершению.

Около 4 000 лет назад кое-где уже начали ковать самородное железо, но добывать его из руды и плавить тогда еще не умели, открытое пламя не давало нужной температуры. Настоящий прорыв в металлургии железа случился с изобретением кузнечного горна, принудительная прокачка воздуха которым позволила поднять температуру до нужной величины и расплавить этот металл.

Освоение металлов на планете шло очень неравномерно. Некоторые дикие племена до сих пор живут в каменном веке, а другие открыли сталь еще до нашей эры. Так, о существовании булатных сталей с выдающимися боевыми свойствами упоминал наставник Александра Македонского греческий философ Аристотель, умерший в 322 году до нашей эры. Правда, затем, в средние века, секреты производства клинковых булатов были утеряны.

Производство железа в промышленных масштабах стало возможным лишь к XV веку, когда в Европе появились большие доменные печи, в которых из руды выплавляли чугун. Непрерывающиеся феодальные войны требовали много железа, доспехи рыцарей стоили дорого, и профессия кузнеца ценилась высоко. К началу XVIII века половину европейского железа производила Шве-

ция, но лучшим в Европе все же считалось уральское железо с клеймом «Старый соболю».

Переход от эмпирического этапа развития науки о материалах к научному материаловедению стал возможен после изобретения в 1688 году голландцем Левенгуком микроскопа. Анализ микроструктур и в наши дни остается важным методом исследования материалов.

В 1763 году Михаил Васильевич 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 алюминий. Без этого легкого металла не было бы современной авиации.

В 1831 году великий русский металлург Павел Петрович Аносов, исследуя сталь под микроскопом, обнаружил у нее микроструктуру; при сильном увеличении сплав выглядел неоднородным. В 1841 году он издал свою знаменитую книгу «О булатах», в которой раскрыл утерянный в средние века секрет выплавки булатных сталей.

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

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

В 1868 году Дмитрий Константинович Чернов открыл фазовые превращения в стали (точки Чернова); вскоре появилась термообработка сталей.

В 1869 году Дмитрий Иванович Менделеев создал периодическую систему химических элементов, а в 1871 году издал знаменитую книгу «Основы химии».

В 1876 году американец Виллард Гиббс опубликовал основы науки о превращениях энергии – термодинамики. Теоретическое материаловедение получило мощный аналитический инструмент.

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

В 1896 году француз Анри Беккерель открыл радиоактивность. Он заметил, что соли урана засвечивают фотобумагу даже в полной темноте. Супруги Пьер и Мария Кюри начали изучать это явление и обнаружили новые химические 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 простой метод актуален и сейчас.

В 1905 году немец Альберт Эйнштейн в своей специальной теории относительности связал пространство и время в единый четырехмерный континуум. В 1915 году он опубликовал общую теорию относительности, где связал массу с энергией и показал, как они искривляют этот континуум.

В 1908 году британский физик Эрнест Резерфорд открыл процесс деления атома; наступил атомный век, появились новая энергетика и новое оружие.

В 1911 году голландский физик Камерлинг-Оннес, изучая низкие температуры, открыл явление сверхпроводимости. Он заметил, что ртуть при температуре 4,1 К полностью теряет свое электрическое сопротивление. Зародилось новое направление – материаловедение сверхпроводников.

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

В 1913 году датчанин Нильс Бор доработал резерфордовскую планетарную модель атома и связал свойства химических элементов с числом электронов на внешней орбите атома.

В 1918 году поляк Ян Чохральский изобрел простой метод выращивания монокристаллов, используемый ныне при производстве монокристаллического кремния и некоторых других полупроводников.

В 1925 году немцы Вернер Гейзенберг и Эрвин Шредингер опубликовали основы квантовой механики. Теория относительности и квантовая механика показали: законы физики зависят от масштабов исследуемых объектов; с тех пор физики ищут единую теорию.

В 1927 году немец Арнольд Зоммерфельд, первым применив квантовую механику, построил теорию электронного газа в металлах, объясняющую многие их специфические свойства.

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 других областях.

В 1932 году немец Эрнст Август Руска создал электронный микроскоп.

В 1935 году в США был получен нейлон и началось производство полимеров. С тех пор их произвели столько, что появилась экологическая угроза для всей планеты.

В 1942 году под руководством итальянского физика Энрико Ферми в Чикаго был запущен экспериментальный ядерный реактор и уже через три года США взорвали над Японией две боевые атомные бомбы.

В 1948 году был создан первый полупроводниковый транзистор. С тех пор еще не прошло и 80 лет!

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

В 1954 году СССР запустил первую в мире атомную электростанцию, а США спустили на воду атомную подводную лодку и взорвали термоядерную (водородную) бомбу (атолл Бикини).

В 1958 году американец Джек Килби создал первую микросхему. Зарождающейся микроэлектронике потребовался сверхчистый кремний. Эта задача была успешно решена: сейчас в кремниевых монокристаллах примеси можно сосчитать по отдельным атомам. Таких чистых веществ в природе не существует.

В 1959 году американский физик Ричард Фейнман указал на перспективность нанотехнологий. В наном мире много свободного места, надо научиться его использовать – отметил он в своем докладе. Но тогда это было невозможно.

В 1970 году было создано оптическое волокно и начали развиваться глобальные сети. Одну из них затем сделали общедоступной и назвали Internet.

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

В 1985 году было открыто существование углеродных наноструктур – фуллеренов. Затем в 1991 году были получены прочнейшие углеродные нанотрубки.

В 1986 году была обнаружена высокотемпературная сверхпроводимость. Оказывается, 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 1959 году.

Перспективы развития материаловедения – создание новых молекул (нанотехнологии) и нужных атомов (термоядерный синтез).

Сейчас новые молекулы получают химией. Но на этом пути много ограничений. Наноматериалы собирают из атомов и молекул физическими методами по заданной схеме. Пока это в основном углеродные и кремниевые структуры.

Новые атомы создавать мы еще не умеем. Термоядерный синтез позволит получать любые химические элементы прямым слиянием атомных ядер. Кроме того, термоядерная реакция сопровождается мощным тепловыделением, это позволит создать новую энергетику и снизить зависимость от ресурсов планеты. Пока мы можем лишь запустить термоядерную реакцию (взорвать водородную бомбу), но не умеем ее контролировать. Ближайшим к нам термоядерным реактором по-прежнему остается Солнце, в недрах которого атомы водорода превращаются в атомы гелия; на большее нашей звезды не хватает.

За 5 000 лет мы создали безопасную искусственную среду обитания. Но появились и проблемы, связанные с истощением ресурсов, перенаселением планеты и ухудшением экологии.

Нас уже почти 8 млрд, а рост населения все продолжается. Мы ведем себя на планете подобно раковым клеткам, которые, неудержимо размножаясь, убивают хозяина и затем гибнут сами.

Часть I. Общие сведения о материалах

Материаловедение изучает связи между свойствами, состоянием, составом и структурой материалов.

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 свойств со структурой материала. Так, углерод может существовать в виде мягкого графита и 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 волокон, тончайшего графена или прочных углеродных нанотрубок.

Лекция 2. Свойства материалов

Конструктор, проектируя деталь, выбирает материал по его свойствам, которые делят на технологические, физические, химические, механические, экономические и эстетические.

Технологические свойства определяют возможность обработки материала каким-либо методом: литьем, давлением, резанием, сваркой, закалкой. Трудно-обрабатываемые материалы называют нетехнологичными.

Литейные свойства – жидкотекучесть, величина усадки, степень ликвации.

Жидкотекучесть – способность расплавленного металла качественно заполнять литейную форму. Сплавы с хорошей жидкотекучестью (чугуны, латуны, бронзы) называют литейными, из них отливают большие фасонные изделия, такие как станины станков и корпуса приборов. Металлы с плохой жидкотекучестью (стали, чистая медь) позволяют отлить лишь простые по форме заготовки.

Усадкой называют уменьшение объема металла при кристаллизации. Чем меньше усадка, тем лучше литейные свойства. Малая усадка у чугунов и бронз, большая – у сталей и титановых сплавов.

Ликвация – химическая или структурная неоднородность металла. Чем выше ликвация, тем ниже качество литья.

Обработка металлов давлением требует от них высокой пластичности. Чем меньше углерода в стали, тем выше ее пластичность, поэтому для холодной штамповки нужны низкоуглеродистые стали.

Возможность обработки материала резанием сильно зависит от его твердости и вязкости. Трудно резать очень твердые (керамика) и вязкие (чистые медь и алюминий) материалы.

Свариваемость черных металлов ухудшается с ростом содержания углерода: хорошая свариваемость у низкоуглеродистых сталей, плохая – у чугунов.

Реакция на закалку определяется закаливаемостью и прокаливаемостью сплава. Закаливаемость оценивают по увеличению прочности и твердости закаленного металла. Закаливаемость стали растет с увеличением содержания углерода; низкоуглеродистые стали не закаляются вообще.

Прокаливаемостью называют максимально возможную толщину закаленного слоя. Прокаливаемость углеродистых (нелегированных) сталей всего 12 мм.

Физические свойства – плотность, температура плавления, коэффициент трения, электрические, магнитные, оптические и многие другие.

По плотности металлы делят на легкие (Mg: 1,74 т/м³, Be: 1,9 т/м³, Al: 2,7 т/м³, Ti: 4,5 т/м³) и тяжелые (Ir и Os: 22,6 т/м³, Pt и Re: 21 т/м³, Au и W: 19 т/м³).

По температуре плавления металлы делят на легкоплавкие (Hg: -39 °С, Cs и Ga: 30 °С, Sn: 232 °С, Pb: 327 °С) и тугоплавкие (W: 3400 °С, Re: 3200 °С, Os и Ta: 3000 °С).

Реология изучает течение материалов, а трибология – трение и износ. Материалы с большим трением называют фрикционными (Ве), а материалы с малым трением – антифрикционными (бронза, латунь).

Теплотехнические свойства материала – теплопроводность, теплоемкость, коэффициент термического расширения.

Высокая теплопроводность у металлов, низкая – у пористых сред. Обычно материалы при нагревании расширяются, но есть и исключения; сжимаются резина, углепластик, вода в интервале температур 0...4 °С.

По проводимости материалы делят на проводники (Cu, Al), полупроводники (Si, Ge) и диэлектрики (резина). У проводников I рода (металлы) проводимость электронная, а у проводников II рода (электролиты) – ионная.

По магнитным свойствам материалы делят на диамагнетики (Si, Cu, Au), парамагнетики (Al, Pt) и ферромагнетики (Fe, Ni, Co). Ферромагнетики бывают магнитомягкие (из них делают магнитопроводы: чистое Fe) и магнитотвердые (сплавы для постоянных магнитов).

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

Коррозионная стойкость зависит от электрохимического потенциала металла и его склонности к пассивации. Металлы с большим положительным электрохимическим потенциалом называют благородными: это Ag, Au, Pt, Ir, O...

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

Жаростойкостью называют устойчивость металла к окислению при нагреве. У углеродистых сталей она не достигает и 500 °С, а у окалиностойких сталей, сильно легированных Cr и Al – превышает 1000 °С.

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

Прочность – сопротивление материала разрушению. Она бывает статическая, динамическая, удельная и усталостная.

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 ровно 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. Многократно 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. Стандартное базовое число N для черных металлов принимают равным 10^7 циклов, а для цветных металлов – 10^8 циклов.

Жаропрочностью называют сопротивление ползучести: неограниченной деформации горячего металла под нагрузкой. Из-за ползучести приходится ограничивать не только нагрузку, но и время ее воздействия. Критерии жаропрочности – предел ползучести и предел длительной прочности материала. Жаропрочна керамика, некоторые никелевые и кобальтовые сплавы.

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. Очень пластичны золото (65 %) и чистая медь (50 %).

Трещиностойкость – способность металла противостоять растрескиванию.

Порог хладноломкости – температура перехода от вязкого разрушения к хрупкому. Ниже нее металл становится хрупким и ненадежен. У разных сталей

этот порог лежит в пределах $-10 \dots -70$ °С. У некоторых хладостойких металлов (Al, Ti) явного порога нет, их используют в криогенной и авиационной технике.

Долговечность – сопротивление материала постепенному разрушению. Критерии долговечности – предел выносливости металла и износостойкость.

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

Упругость – способность материала восстанавливать форму после разгрузки. Критерии: предел упругости материала и максимально возможная величина упругой деформации.

Предел упругости ($\sigma_{0,002}$) – напряжение, после снятия которого остаточная деформация образца равна 0,002 %.

Жесткость – сопротивление материала упругой деформации. Критерий – модуль упругости (модуль Юнга).

Удельная жесткость – модуль упругости, деленный на удельный вес материала. Чемпион – очень легкий и жесткий бериллий.

Твердость – сопротивление материала внедрению (царапинам). Ее грубо оценивают по шкале Мооса: тальк и графит – 1 балл; Au и Ag – 3 балла; зуб – 3,5 балла; стекло минеральное – 5 баллов; закаленная сталь, W и стекло Gorilla Glass – 6 баллов; Os и кварц (песок) – 7 баллов; оксид циркония ZrO_2 – 8 баллов; сапфир, SiC и WC – 9 баллов; эльбор и алмаз – 10 баллов.

Теплостойкость – способность материала сохранять твердость при нагреве. Важнейшая характеристика инструментальных сталей, ограничивающая допустимую скорость резания. Теплостойкость углеродистых (нелегированных) сталей около 200 °С, а у специально легированных тугоплавкими карбидами быстрорежущих сталей она превышает 600 °С.

Лекция 3. Состояния материалов

Свойства материала зависят от физического состояния, в котором он находится. Состояния делят на термодинамические, агрегатные, кристаллические и аморфные.

Термодинамические состояния различаются величиной потенциала Гиббса $G = H - ST$, где H – энтальпия, S – энтропия, T – температура. Их всего три: равновесное, неравновесное и метастабильное.

В равновесном состоянии потенциал Гиббса минимален, металл мягкий, пластичный, непрочный и вязкий. Получают такое состояние медленным охлаждением (отжигом). Изолированная система всегда стремится к равновесному состоянию. Механическая аналогия – неподвижно висящий маятник: его потенциальная энергия минимальна.

В неравновесном состоянии потенциал Гиббса изменяется, в материале идут превращения, он нестабилен. Такой металл обычно не обрабатывают. Аналогия – свободно движущийся маятник.

В метастабильном состоянии потенциал Гиббса большой и относительно стабильный. Металл прочен и тверд, но хрупок: пластичность и вязкость у него низкие. Получают метастабильное состояние быстрым охлаждением (закалкой) или холодной пластической деформацией (нагартовкой). Аналогия – маятник, медленно движущийся в вязкой среде. Метастабильное состояние сохраняется долго, если деталь не нагревать: закаленный инструмент теряет твердость при слишком горячей заточке. Но при нормальной температуре закаленная деталь отработает свой срок.

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 Бозе-Эйнштейна с очень необычными свойствами (сверхпроводимость, сверхтекучесть и др.). Это состояние было теоретически предсказано в 1925 году и получено в 1995 году.

Твердое состояние равновесно ниже температуры плавления материала. Атомные связи в твердых телах прочные, поэтому они сохраняют свою форму и объем.

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

Плазмой называют ионизированный газ, равновесный при очень высокой температуре. Это основное состояние вещества во Вселенной. Различают низкотемпературную плазму (ниже 1 млн К) и высокотемпературную (≈ 100 млн К). Освоение последней – важный шаг к управляемому термоядерному синтезу и термоядерной энергетике.

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

В кристаллическом состоянии упорядоченные атомы образуют регулярную 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 среды от направления в пространстве. Например, оптическая анизотропия жидких

кристаллов позволяет создавать устройства отображения информации, а магнитная анизотропия некоторых сплавов – делать сильные магниты.

Полиморфизм – способность материала изменять тип кристаллической решетки при изменении внешних условий (в первую очередь температуры и давления). Полиморфные превращения стремятся перестроить решетку таким образом, чтобы материал всегда оставался в равновесном состоянии. Так, у железа две полиморфные модификации: альфа-Fe (равновесно ниже 911 °С и выше 1392 °С) и гамма-Fe (равновесно в интервале температур 911...1392 °С).

Характеристики кристаллической решетки – базис, координационное число, период, компактность упаковки атомов и тип элементарной ячейки.

Базис – число атомов в элементарной ячейке. Координационное число – число ближайших соседей атома в решетке.

Период – расстояние между ближайшими атомными плоскостями; у металлов период лежит в пределах 0,1...0,7 нм. Компактность упаковки – процент заполнения элементарной ячейки атомами.

Элементарная ячейка – минимальная часть кристаллической решетки, дающая представление о ее строении. У металлов обычно ячейки ОЦК, ГЦК и ГП.

ОЦК – объемно-центрированная кубическая ячейка; атомы расположены по вершинам куба и один в его центре. Координационное число 8, компактность упаковки атомов 68 %. ОЦК решетка у альфа-Fe, Cr, W.

ГЦК – гранецентрированная кубическая ячейка; атомы расположены по вершинам куба и в центре его граней; координационное число 12, компактность упаковки атомов 74 %. ГЦК решетка у гамма-Fe, Al, Cu, Ni, Au.

ГП – гексагональная плотноупакованная ячейка; координационное число 12, компактность упаковки атомов 74 %. ГП решетка у Mg, Cd, Zn.

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 кристаллической решетки) и внедренные (межузельные) атомы.

Линейные дефекты решетки называют дислокациями, они появляются в результате неполного сдвига атомных плоскостей при пластической деформации металла. Дислокации бывают краевыми и винтовыми. Их плотность и подвижность сильно влияют на механические свойства материала.

Поверхностные дефекты – отсутствующие атомные плоскости и границы между зернами.

Жидкие кристаллы – упорядоченные молекулярные структуры, находящиеся в промежуточном (мезоморфном) состоянии между обычной жидкостью и кристаллами. Их свойства сильно зависят от внешних воздействий (температуры, электрических и магнитных полей). Различают смектические, нематические и холестерические жидкие кристаллы.

В аморфном состоянии хаотичные атомы решетки не образуют. Такие среды называют стеклами, независимо от их состава и прозрачности. У аморф-

ных тел определенной температуры плавления нет (при нагреве они размягчаются постепенно): ниже температуры стеклования состояние хрупкое, а выше температуры текучести – жидкое; но это очень условно. Стекла бывают минеральные, органические и даже металлические.

Для металлов естественно поликристаллическое состояние: они состоят из мелких кристалликов (зерен). Чтобы получить аморфный металл, расплав надо охладить так быстро, чтобы кристаллы не успели образоваться; для этого расплавленный металл распыляют или закаляют из жидкого состояния. Промышленно получают аморфные гранулы, ленту, фольгу и микропроволоку. Металлическое стекло метастабильно: оно прочное, твердое и коррозионностойкое (нет зерен, по границам которых коррозия проникает вглубь металла). При нагревании начинается процесс кристаллизации и равновесие восстанавливается. Аморфные сплавы применяют в электротехнике и некоторых других областях.

Лекция 4. Состав и структура материала

У материи две формы: дискретная (вещество) и непрерывная (поле). 93 % вещества рассеяно в космическом пространстве в виде атомов водорода и еще 7 % находится в звездах. Наличие состава и структуры у материалов – следствие дискретности вещества, состоящего из прочно связанных частиц: атомов, молекул и кристаллов.

Атомы – квантовые объекты, не подчиняющиеся законам классической физики. Они не изнашиваются, в них нет трения и рассеяния энергии. Атомы состоят из плотного ядра и электронной оболочки. По числу протонов в ядре атом относят к химическому элементу: $1p$ – H, $2p$ – He, $3p$ – Li и т. д. Число нейтронов определяет изотоп атома: $1p$ без нейтронов – обычный водород (протий), $1p$ и $1n$ – тяжелый дейтерий, $1p$ и $2n$ – радиоактивный тритий.

Химические свойства элемента определяются строением электронной оболочки его атома. Если число протонов и электронов разное, то атом приобретает электрический заряд и его называют ионом.

Известно более сотни разных атомов. Они соединяются между собой, образуя молекулы и кристаллы; без такой самоорганизации эволюция материи была бы невозможна. Одинаковые атомы часто способны создавать разные молекулы, образуя аллотропные модификации элемента. У P их 11, у C и S – много. Различают аллотропию состава и аллотропию формы.

Аллотропия состава – способность одинаковых атомов создавать разные молекулы: атомы кислорода образуют молекулы O_2 и O_3 .

Аллотропия формы (полиморфизм) – способность одинаковых атомов создавать разные кристаллы: углерод – это алмаз и графит.

Молекула – минимальная частица, обладающая химическими свойствами вещества. Образующие ее атомы называют компонентами. Молекулы и кри-

сталлы растворов и химических соединений состоят из разных атомов, называемых компонентами раствора или соединения.

Состав материала бывает химический, изотопный и фазовый.

Химический состав бывает качественный и количественный, атомарный и молекулярный. Атомарный состав определить проще, но для органических материалов часто этого недостаточно.

Качественный состав показывает, какие элементы есть в материале: в стали 40Х есть Fe, С и Cr. Количественный состав показывает их содержание: $98,6 \% \text{ Fe} + 0,4 \% \text{ C} + 1 \% \text{ Cr}$.

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).

По изотопному составу углерода определяют возраст древних организмов. У живых он соответствует атмосферному. После смерти обмен веществ прекращается и содержание радиоактивного изотопа начинает уменьшаться с известной скоростью, что позволяет вычислить время смерти.

Фазой называют обособленную однородную область в материале. Она может состоять из химического элемента, химического соединения или раствора. Фаза может быть кристаллическая и аморфная, равновесная и метастабильная, металлическая и неметаллическая, ферро- и парамагнитная. Обычно фазы очень дисперсны и видны лишь в микроскоп.

Кристаллическая фаза – колония одинаковых по составу кристаллов, отделенная от других колоний границей раздела.

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. Примеры: Fe-C, Fe-N, Fe-B.

В растворах замещения растворенные атомы находятся в некоторых узлах кристаллической решетки компонента-растворителя. Такие растворы образуют элементы с одинаковым типом кристаллической решетки и близкими по размерам атомами: Au-Ag, W-Mo.

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

Структура кристаллов определяется типом связей между его атомами. Связи бывают молекулярные, ионные, ковалентные и металлические.

Молекулярные кристаллы связаны лишь слабыми электростатическими силами Ван-дер-Ваальса. Они образуются при замерзании воды, некоторых полимеров и инертных газов. Все другие типы кристаллов связаны более прочными межатомными взаимодействиями.

В ионных кристаллах атомы попарно перераспределяют свои валентные электроны, и общая пара переходит от металла к неметаллу: NaCl, KF, NaF.

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

В металлических кристаллах валентные электроны обобщены и образуют электронный газ, из-за чего у металлов ряд схожих свойств: высокая пластичность, тепло- и электропроводность, характерный металлический блеск и способность к электронной эмиссии: при нагревании металлы испускают электроны.

Микроструктура сплава определяется числом, формой и характером взаимного расположения образующих его фаз. Структуры бывают гомогенные и гетерогенные, равновесные и метастабильные.

Однофазные гомогенные структуры характерны для металлов и твердых растворов, они пластичны и лучше сопротивляются коррозии. Многофазные гетерогенные структуры характерны для сплавов, они прочнее и тверже.

В зависимости от масштаба различают макроструктуру, микроструктуру, наноструктуру и тонкую атомно-кристаллическую структуру. Макроструктуры изучают с помощью лупы, микроструктуры видны в оптический микроскоп, а наноструктуры – в электронный. Атомно-кристаллические структуры прямому наблюдению не поддаются, их изучают рентгеноструктурным анализом.

Лекция 5. Методы исследования материалов

Химический состав изучают химическими и физическими методами.

Химический анализ основан на реакциях, он бывает качественный и количественный. Качественный анализ показывает наличие химических элементов в материале, а количественный – их содержание.

Спектральный анализ – физический метод исследования химического состава, основанный на изучении спектров взаимодействия материи с электромагнитным полем. У каждого химического элемента свой уникальный спектр излучения и поглощения электромагнитных волн. Качественный состав определяют по наличию линий от определенных атомов, а количественный – по их интенсивности на фотографии спектра.

Гравиметрический анализ – метод количественного анализа, основанный на законе сохранения массы веществ при химических превращениях.

Пикнометрическим анализом определяют объем тела по вытесненной им жидкости. Если известна масса тела, можно вычислить плотность материала. Метод особенно хорош для тел сложной формы и порошковых сред.

Температуры фазовых превращений определяют термическим, дилатометрическим и резистометрическим методами.

При термическом анализе строят кривую охлаждения материала – зависимость температуры свободно остывающего образца от времени. Затем по ней определяют температуры фазовых превращений I рода. Горизонтальные участки этой кривой соответствуют изотермическим фазовым превращениям. Так, кривая охлаждения железа имеет два таких участка, соответствующих полиморфным превращениям при температурах 911 °С и при 1392 °С.

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

При резистометрическом анализе строят зависимость электрического сопротивления образца от его температуры. При фазовых превращениях сопротивление материала резко изменяется. Так, на резистометрической кривой железа есть два скачка сопротивления: при температурах 911 °С и 1392 °С.

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

При испытаниях на выносливость строят кривую усталости материала – зависимость разрушающего напряжения от числа циклов нагружения; по ней находят предел выносливости материала.

Твердость материала можно приблизительно оценить по минералогической шкале Мооса. Весь диапазон разбит на 10 частей, для каждой подобран минерал: от мягкого талька до твердого алмаза. Испытание ведут последовательным нанесением царапин: если 5-й камень образец не царапает, а 6-й – царапает, то твердость – 6 баллов. Однако в современной технике применяют более точные методы измерения твердости, которые делят на статические и динамические.

Статические методы измерения твердости основаны на внедрении в образец какого-либо индентора (твердого наконечника). Твердость металлов измеряют методами Бринелля (HB), Роквелла (HR) и Виккерса (HV). 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 даже 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 блестящий и зернистый, он развивается стремительно и часто приводит к авариям: защитные системы не успевают среагировать.

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

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

При усталостном разрушении под действием циклических нагрузок постепенно развивается усталостная трещина. На изломе видна зона ее зарождения, зона распространения и зона долома.

Структуры исследуют металлографией и рентгенографией.

Металлография изучает металлические структуры при различных увеличениях. Металлографические методы исследования – макроанализ и микроанализ.

При макроанализе невооруженным глазом или с помощью лупы оценивают качество литья и выявляют крупные дефекты (текстуру, пористость).

При микроанализе с помощью микроскопа определяют вид текстуры, размер зерна в баллах, форму и характер взаимного расположения фаз в сплаве. Образец для микроанализа – микрошлиф – тщательно шлифуют, полируют и травят реактивами; лишь после этого можно увидеть микроструктуру металла.

Основная оптическая характеристика металлографических приборов – разрешающая способность: минимальное расстояние между точками, которые еще кажутся отдельными.

Разрешение невооруженного глаза около 0,2 мм. Сильная ($40\times$) лупа повышает его до 5 мкм. Разрешение оптического микроскопа принципиально ограничено волновой природой света и не превышает 200 нм (полезное увеличение до $1500\times$). Разрешение растрового электронного микроскопа 1 нм (увеличение $300000\times$), а просвечивающего электронного микроскопа – до 0,2 нм (увеличение $1500000\times$; однако для просвечивания нужна тончайшая фольга).

Рентгеноструктурный анализ основан на дифракции рентгеновских лучей в кристаллической решетке и позволяет определить ее тип, параметры и даже дефекты. Дифракционный линейчатый спектр, получаемый при этом анализе, не является фотографическим изображением исследуемого объекта, как на медицинских рентгеновских снимках. Но он содержит информацию о тонком строении вещества, недоступном прямому наблюдению. Математические методы кристаллографии позволяют эту информацию расшифровать и заглянуть в наномир.

Дефектоскопический анализ – магнитный, ультразвуковой, рентгеновский.

Магнитные дефектоскопы выявляют дефекты лишь в поверхностном слое металла; глубоко магнитное поле не проникает.

При ультразвуковой дефектоскопии регистрируют сигналы, отраженные от внутренних дефектов в материале; таким же образом в медицине находят опухоли, камни и другие нарушения в человеческом организме.

Рентгеновская дефектоскопия выявляет дефекты в металле на глубине до 80 мм. Рентгеновские лучи на шкале электромагнитных волн лежат между ультрафиолетовыми и коротковолновыми гамма-лучами.

Гамма-излучение обнаруживает дефекты в металле на глубине до 300 мм. Его также используют для стерилизации продуктов питания и медицинских изделий, в лучевой терапии (γ -лучи подавляют рост быстрорастущих клеток).

Рентгеновские и γ -лучи могут вызвать лучевую болезнь, нужна защита из плотных металлов: Pb, W.

Часть II. Основы металловедения

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

Лекция 6. Кристаллизация металлов

Кристаллизация – фазовый переход первого рода, протекающий с выделением тепла. Различают первичную и вторичную кристаллизацию.

Первичная кристаллизация чистых металлов протекает изотермически, а сплавы обычно кристаллизуются в интервале температур.

При дальнейшем охлаждении твердого металла может начаться вторичная кристаллизация. Примеси выходят из пересыщенных первичных зерен, образуя вокруг них дисперсные 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.

Первичная кристаллизация начинается с появления в жидком металле зародышей зерен. Чтобы этот процесс пошел, надо переохладить металл ниже температуры плавления; требуемая степень переохладения зависит от чистоты металла и может достигать нескольких десятков градусов. Чем выше плотность зародышей, тем мельче будет зерно и качественнее литой металл.

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

Модификаторы бывают тугоплавкие и поверхностно-активные. Тугоплавкие модификаторы для стали образуют нерастворимые в ней карбиды: это Ti, V, Nb. Тугоплавкие модификаторы для алюминиевых сплавов образуют нерастворимые в алюминии соединения: это Ti и Zr.

Поверхностно-активные модификаторы осаждаются на зародышах, замедляя их рост и тем самым повышая концентрацию и измельчая зерно. Для сталей это бор, для алюминиевых сплавов – Na и K.

Форма зерна зависит от условий охлаждения металла в литейной форме. При направленном теплоотводе растут столбчатые кристаллы, вытянутые к стенкам формы, а при равномерном теплоотводе формируются более симметричные зерна. В зависимости от формы зерна различают игольчатые, пластинчатые, столбчатые и дендритные 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 металле примесями, вытесненными из ранее образовавшихся кристаллов; так возникает дендритная ликвация.

Ликвация – химическая или структурная неоднородность металла. Различают микроликвацию (неоднородность отдельных зерен) и макроликвацию (неоднородность слитка). Макроликвация бывает зональная и гравитационная.

Зональная ликвация связана с разными условиями охлаждения металла в разных зонах слитка. Поверхность отливки, контактирующая с холодной из-

ложницей литейной формы, кристаллизуется раньше и примеси вытесняются внутрь, из-за чего металл снаружи получается чище.

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) из-за этого 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, ликвация, текстура, пористость.

Усадка вызвана уменьшением объема металла при кристаллизации, она ухудшает литейные свойства. Усадка серых чугунов $\approx 1\%$, сталей $\approx 2\%$, а у Ti сплавов достигает 3% . Усадка приводит к большим напряжениям в слитке и к появлению в его верхней части специфического дефекта – усадочной раковины. Эту часть отливки отрезают и отправляют на переплавку.

Текстура формируется в результате неравномерного отвода тепла в литейной форме. При равномерном охлаждении отливки она минимальна.

Сплавы получают кристаллизацией специально приготовленных растворов. Химические элементы, образующие раствор, называют компонентами сплава. Кристаллизация сплавов обычно протекает в интервале температур. Структура сплава формируется в процессе его охлаждения рядом диффузионных и бездиффузионных фазовых превращений.

Диффузионные превращения протекают за счет медленного хаотического теплового перемещения атомов. При быстром охлаждении диффузия часто завершиться не успевает, и тогда формируются прочные и твердые метастабильные структуры. При медленном охлаждении металла диффузия завершается, и тогда получают пластичные равновесные структуры.

При бездиффузионных превращениях остывающие фазы сплава реагируют между собой, образуя новые фазы. В черных металлах встречаются три изотермических превращения: перитектическое, эвтектическое и эвтектоидное.

Перитектическое превращение – совместная кристаллизация твердой и жидкой фаз. Образуется перитектика – структура, в которой одна фаза окружает другую.

Эвтектическое превращение – распад жидкого раствора определенного состава на две твердые фазы. Образуется эвтектика – хрупкая и легкоплавкая смесь сильно разнородных фаз (естественный композит). Сплавы с эвтектикой делят на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические. Наилучшие литейные свойства у кристаллизующихся изотермически, подобно чистым металлам, эвтектических сплавов. Черные металлы, кристаллизующиеся с эвтектическим превращением, называют чугунами.

Эвтектоидное превращение – распад первичной твердой фазы на две вторичные. Образуется эвтектоид – прочная пластинчатая смесь двух фаз опреде-

ленного состава. Сплавы с эвтектоидным превращением делят на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные. В железоуглеродистых сплавах, содержащих менее 0,02 % С, эвтектоидного превращения нет; это техническое железо.

Монокристаллы выращивают в какой-либо пересыщенной среде (раствор, расплав, пар) из одного зародыша тигельными и бестигельными методами.

Тигельные методы кристаллизации – Чохральского, Бриджмена, Степанова, Вернейля и другие.

В методе Чохральского монокристаллическую затравку медленно тянут из расплава и растущий кристалл наследует ее структуру. Так получают монокристаллы кремния, германия и других полупроводников. Недостаток: некоторое загрязнение сверхчистого кристалла кварцевым тиглем.

Метод Бриджмена состоит в вытягивании тигля с расплавом из печи со скоростью роста монокристалла; так получают металлические и полупроводниковые монокристаллы из не слишком тугоплавких материалов.

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

Метод Вернейля – классический синтез ювелирных и технических камней: рутила TiO_2 , корунда Al_2O_3 , сапфира (так называют цветной корунд), рубина (так называют прозрачный корунд).

Методом бестигельной зонной плавки получают очень чистые (нет контакта с кварцевым тиглем), но сравнительно мелкие и относительно дорогие монокристаллы.

Лекция 7. Диаграммы состояния сплавов

На диаграммах состояния изображают равновесные структуры двойной системы компонентов А–В в зависимости от их содержания (горизонтальная ось) и температуры (вертикальная ось). Такие диаграммы позволяют изучать фазовый состав и структуру сплавов, оценивать их свойства, определять 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.

Знание числа C позволяет сделать заключение о состоянии сплава и протекающих в нем процессах; для двойных сплавов ($K = 2$) возможны три варианта:

- $\Phi = 3, C = 0$: в этой точке диаграммы идет изотермическое фазовое превращение, сопровождающееся сильным тепловыделением; материал будет сохранять свое текущее состояние до его полного завершения;

- $\Phi = 2, C = 1$: в этой точке диаграммы идет фазовое превращение с тепловыделением, недостаточным для поддержания в материале постоянной температуры: сплав медленно остывает;

- $\Phi = 1, C = 2$: фазовых превращений нет, сплав быстро остывает.

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

Неограниченно растворимые компоненты имеют близкие размеры атомов, одинаковую кристаллическую решетку и способны образовывать гомогенные твердые растворы любой концентрации: Cu-Ni, Au-Ag, W-Mo.

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

На диаграммах с нерастворимыми компонентами всегда есть эвтектическое превращение с распадом жидкой фазы на две твердые. Ниже линии солидус на таких диаграммах образуется механическая смесь двух фаз, а твердых растворов нет; взаимно нерастворимы Pb-Sb, Sn-Zn.

Сплавы с ограниченно растворимыми компонентами могут быть, в зависимости от состава, гомогенными или гетерогенными. На диаграмме в этом случае тоже есть эвтектическое превращение, но ему подвержены не все сплавы. Важным примером является диаграмма состояния сплавов железа с углеродом, компоненты которой слабо растворимы между собой: при комнатной температуре в железе растворяется не более 0,02 % C. Рассмотрим ее подробнее.

Компоненты этой диаграммы – железо и углерод.

Железо – серый пластичный (50 %) металл с температурой плавления 1539 °С; второй (после алюминия) по распространенности металл в литосфере. С железом связано 95 % металлургического производства. Оно существует в виде двух полиморфных модификаций – альфа и гамма.

Альфа-железо имеет ОЦК решетку, плотность 7,9 т/м³ 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 немного плотнее (около 8,0 т/м³) альфа-железа и может растворить в себе больше углерода.

У углерода тоже две модификации: стабильная (графит) и метастабильная (алмаз). Графит непрочен, мягок, электропроводен, химически стоек, сгорает на воздухе при 700 °С. Алмаз тверд и хрупок, химически стоек, чрезвычайно теплопроводен, сгорает на воздухе при 870 °С. Синтетические алмазы получают из графита при огромном давлении и высокой температуре.

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. При комнатной температуре содержит менее 0,02 % С, а при высокой – до 0,1 % С. Высокотемпературную модификацию иногда называют дельта-ферритом. Это мягкий и пластичный низкоуглеродистый сплав, похожий на чистое железо.

Аустенит – твердый раствор внедрения углерода в гамма-железе, равновесный выше 727 °С. Аустенит плотнее и прочнее феррита. Содержание углерода в аустените максимально (2,14 %) при температуре 1147 °С.

Цементит – метастабильный карбид железа Fe_3C , содержащий 6,67 % С. Он тверд и хрупок, в сплавах встречается в виде первичных, вторичных и третичных кристаллов.

Крупные зерна первичного цементита выпадают из жидкой фазы в чугунах, вторичный цементит выпадает из аустенита в сталях, а очень мелкие зерна третичного цементита образуются при охлаждении феррита и располагаются на границах его зерен.

Фазовые смеси на ДЖУ – перлит и ледебурит – являются самостоятельными элементами микроструктуры.

Перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита, содержащая 0,8 % С. Он бывает пластинчатый и зернистый. Пластинчатый перлит спонтанно образуется при свободном охлаждении стали, он прочнее и тверже. Зернистый перлит получают сфероидизирующим отжигом, он лучше режется и закаляется.

Ледебурит – хрупкая легкоплавкая (1147 °С) эвтектика, содержащая 4,3 % углерода и встречающаяся в чугунах. Названа она по имени немецкого ученого Ледебура. Различают высоко- и низкотемпературный ледебурит. Высокотемпературный ледебурит стабилен выше 727 °С, он состоит из аустенита с цементитом; низкотемпературный ледебурит существует ниже 727 °С, это смесь перлита с цементитом.

Линии на диаграмме соответствуют началу или окончанию фазовых превращений:

- линия ликвидус ABCD – начало кристаллизации: выше нее только жидкая фаза;
- линия солидус ANIECF – конец кристаллизации: ниже нее жидкой фазы нет.

Горизонтальные линии соответствуют изотермическим превращениям:

- NB, 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;
- MO, 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 (содержит 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 другие металлоемкие конструкции.

Из перлитных эвтектоидных и перлитно-цементитных заэвтектоидных сталей делают подшипники, инструмент и другие износостойкие изделия.

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

Из доэвтектических чугунов льют станины станков, корпуса приборов, коленчатые валы, крупные детали кузнечно-прессового оборудования и другие фасонные изделия. Чем ближе их состав к эвтектическому, тем лучше литейные и хуже механические свойства чугуна.

Слишком хрупкие эвтектические и заэвтектические чугуны практического интереса не представляют и промышленно не выплавляются.

Лекция 8. Деформация и рекристаллизация 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 (обработка давлением, термическая обработка, сварка, закалка).

Абсолютная деформация – полное изменение размера образца под действием внешних сил. Характеристикой материала не является, так как зависит от этого размера.

Относительная деформация – отношение абсолютной деформации к размеру образца. Максимально возможная относительная пластическая деформация характеризует пластичность материала, а максимально возможная упругая деформация характеризует его упругие свойства.

Общая деформация складывается из упругой и пластической составляющих. Упругая деформация исчезает при разгрузке, а пластическая – остается.

Горячую деформацию проводят выше температуры рекристаллизации металла для изменения его формы; на структуру и свойства материала она влияет 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 у очень чистых металлов ниже указанных значений, а у сплавов – выше.

Холодную деформацию проводят ниже температуры рекристаллизации металла. При этом кристаллическая решетка запасает часть затраченной на деформацию энергии, и металл переходит в метастабильное наклепанное состояние; в нем формируется текстура деформации и появляется анизотропия свойств.

Текстура деформации – преимущественная ориентация зерен в определенных плоскостях или направлениях. Так, при осадке металла на прессе зерна ориентируются в поперечных к направлению осадки плоскостях, и формируется плоская текстура, а при волочении и экструзии металла зерна вытягиваются в осевом направлении изделия.

Наклепом называют изменение свойств пластически деформированного металла: прочность, твердость и коэрцитивная сила возрастают; а вязкость, пластичность и коррозионная стойкость уменьшаются. Наклеп бывает фазовый и деформационный.

Фазовый наклеп вызывают внутренние напряжения и деформации, остающиеся в металле после тепловых воздействий из-за разного температурного расширения его фаз. Фазовый наклеп используют для упрочнения Fe-Ni и некоторых других сплавов.

Деформационный наклеп может быть объемным и поверхностным.

Объемный наклеп порождает глубокая деформация: волочение, прокатка, осадка, ковка. Он повышает прочность, твердость и хрупкость металла, снижает пластичность и вязкость.

Поверхностный наклеп повышает твердость, износостойкость и выносливость металла, а прочность почти не изменяет, так как охватывает лишь тонкий поверхностный слой. Зато незатронутая деформацией сердцевина сохраняет вязкость и хорошо сопротивляется удару.

Технологическую операцию по созданию наклепа называют нагартовкой. Это единственный способ упрочнения не закаляющихся сплавов. Отбивка косы, применяемая крестьянами для повышения стойкости заточки – тоже нагартовка.

В машиностроении широко применяют поверхностную нагартовку: дробеструйную обработку, центробежно-ударное упрочнение, обкатывание, накатывание, калибрование...

Дробеструйная и пескоструйная обработка повышают твердость и износостойкость металла, очищают его от загрязнений и очагов коррозии. Для обдувки детали стальной или керамической дробью используют специальные дробеметы.

Центробежно-ударное упрочнение осуществляют инструментом с твердыми шариками или роликами. Возможна обработка сложных поверхностей, в том числе и резьбовых.

Накатывание, раскатывание, обкатывание и выглаживание самых разных поверхностей осуществляют каким-либо твердым инструментом: шариком, роликом, твердосплавным индентором. Поверхности вращения калибруют прошивкой или пуансоном.

Неконтролируемый наклеп металла инструментом при механической обработке может сильно затруднять снятие стружки; металл выкрашивается, а инструмент быстро теряет остроту заточки.

Устраняют наклеп рекристаллизационным отжигом, для чего металл нагревают на 100 °С выше температуры рекристаллизации. Сначала в деформированной структуре протекают процессы возврата, а затем начинается рекристаллизация основной фазы.

Возврат частично восстанавливает равновесную структуру металла. Первую его стадию называют отдыхом, а вторую – полигонизацией.

Отдых снижает концентрацию точечных дефектов в кристаллической решетке, но микроструктуру металла не изменяет.

Полигонизация изменяет дислокационную структуру кристаллов: образуются субзерна (полигоны) с низкой плотностью дислокаций. Это нежелательный процесс, затрудняющий начало рекристаллизации. Полигонизация встречается во многих сплавах Al, Fe и Mo.

Иногда целесообразно ограничиться лишь полигонизационным отжигом, не доводя нагрев до рекристаллизации; в этом случае металл частично сохраняет полученную при деформации прочность и твердость, но равновесного состояния не достигает.

Рекристаллизация – зарождение и рост в деформированной металлической структуре новых равновесных зерен. У нее три фазы: первичная, собирательная и вторичная.

Первичная рекристаллизация полностью устраняет текстуру и снимает наклеп; металл возвращается к исходному равновесному состоянию.

Собирательная рекристаллизация начинается при дальнейшем нагреве металла и заключается в равномерном росте новых равновесных зерен. Обычно этого не требуется, но бывают и особые требования.

Вторичная рекристаллизация сильно перегретого металла ведет к аномальному росту отдельных зерен за счет соседей. В результате формируется ненадежная разнотернистая структура; допускать этого не следует.

Чтобы рекристаллизация началась, степень деформации металла должна быть больше некоторой критической величины, обычно лежащей в пределах 2...8 % (для Fe и Cu – 5 %).

Диаграмма рекристаллизации показывает зависимость величины нового зерна от степени деформации металла и температуры его нагрева. В известных пределах можно управлять размером зерна: оно уменьшается с ростом степени деформации металла и увеличивается с ростом температуры нагрева.

Рекристаллизационный отжиг применяют в производстве магнитомягкой текстурированной электротехнической стали.

Лекция 9. Термическая обработка металлов

Термическая обработка – тепловое воздействие на металл с целью изменения его структуры и свойств. Термообработке подвергают полуфабрикаты, отливки, сварные швы, детали машин, инструмент. Основные виды термообработки – отжиг, закалка, отпуск и старение.

Отжиг – медленное охлаждение горячего металла. Он приближает структуру к равновесной, уменьшает твердость и прочность, увеличивает пластичность и вязкость, снимает внутренние напряжения. Отжиг бывает I и II рода.

Отжиг I рода не связан с фазовыми превращениями; это диффузионный, рекристаллизационный и низкий отжиг. 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 полностью гомогенизируют (нагревают до однофазного состояния) и затем медленно охлаждают. При неполном отжиге гомогенизация структуры частичная, металл нагревают слабее.

Закалка – быстрое, со скоростью не ниже критической, охлаждение горячего металла. Дает прочную и твердую метастабильную структуру, но снижает пластичность и вязкость сплава.

Критическая скорость закалки – минимальная скорость охлаждения, при которой пересыщенный твердый раствор еще не распадается на фазы. Медленнее охлаждать нельзя, закалки не будет.

Закалка бывает полная и неполная, с мартенситным превращением и без него, объемная и поверхностная.

При полной закалке сплав греют до гомогенного (однофазного) состояния, а при неполной закалке нагревают слабее, гомогенизация структуры частичная.

Закалка с мартенситным превращением позволяет получить прочную и твердую метастабильную структуру – мартенсит. Закалка без мартенситного превращения дает пересыщенный твердый раствор; упрочнение сплава происходит при последующем старении этого метастабильного раствора.

Объемная закалка увеличивает прочность и твердость всей детали, которую нагревают в печи и затем быстро охлаждают в воде или масле.

Поверхностная закалка повышает твердость, износостойкость и выносливость металла, а прочность почти не изменяет, так как охватывает лишь тонкий поверхностный слой. Поверхность детали нагревают индукцией или лазером.

Отпуск – дозированный нагрев закаленного сплава. Он стабилизирует структуру, снижает хрупкость и повышает надежность металла. Термин «отпуск» используют для сплавов, закаляющихся с мартенситным превращением.

Старение – термическая операция, при которой из пересыщенного твердого раствора, полученного при закалке, выпадают вторичные фазы. Для некоторых сплавов этот процесс сопровождается сильным упрочнением (мартен-

ситно-старяющие стали). Старение бывает естественное (без нагрева) и искусственное (с небольшим нагревом). Естественное старение может протекать несколько дней, а искусственное идет быстрее, но результат будет немного хуже. Термин «старение» применяют для сплавов, закаляющихся без мартенситного превращения.

Комбинированные методы упрочнения сочетают термообработку и пластическую деформацию металла. Обычно это термомеханическая или механотермическая обработка.

Термомеханическая обработка – горячая пластическая деформация металла, совмещенная с закалкой. Ее применяют для увеличения вязкости и надежности хрупких высокопрочных сталей.

Механотермическая обработка сочетает пластическую деформацию металла со смягчающим отжигом. Несколько циклов волочения с промежуточным отжигом упрочняют пружинную (канатную) проволоку до 3...4 ГПа.

Термообработка стали основана на превращениях переохлажденного аустенита. В зависимости от режима охлаждения в стали протекает диффузионное перлитное, бездиффузионное мартенситное или промежуточное бейнитное превращение.

Перлитное превращение протекает 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 на отдельные фазы и превращается в сильно пересыщенный углеродом феррит, который назвали мартенситом.

Бейнитное превращение наиболее полно протекает в изотермических условиях. Аустенит в горячей (≈ 320 °С) соляной ванне медленно превращается в прочный и твердый метастабильный бейнит.

Термообработка стали – отжиг (I и II рода), нормализация, закалка, отпуск.

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 сталь греют слабее, аустенизация структуры частичная.

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

При нормализации сталь охлаждают на воздухе (а не в печи). Нормализация измельчает зерно и устраняет цементитную сетку в заэвтектоидных сталях; такая обработка дешевле отжига.

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 напряжения, приводящие к короблению и даже растрескиванию стали.

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

Закалка в заневоленном состоянии предотвращает изгиб длинных плоских деталей из высокоуглеродистых сталей, не требующих слишком быстрого охлаждения. Например, ножовочные полотна закаляют зажатými между массивными медными пластинами.

Охлаждение стали жидким азотом устраняет нестабильный остаточный аустенит. Холодом обрабатывают мерительный инструмент, прецизионные подшипники и другие точные изделия.

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

В воде закаляют низкоуглеродистые стали, а в масле – высокоуглеродистые и легированные. На воздухе закаляют самокалящиеся стали мартенситного класса с малой критической скоростью закалки.

Отпуск стали бывает низкий, средний и высокий.

Низкий отпуск (150...250 °С, HRC 58–63) назначают для твердых инструментальных и подшипниковых сталей.

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

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

Химико-термическая обработка создает на поверхности диффузионный слой, улучшающий какие-либо свойства металла; это такие процессы, как цементация, азотирование, хромирование.

Цементация (насыщение поверхности углеродом) увеличивает твердость и износостойкость металла. Для цементации нужен карбюризатор: древесный уголь, метан или 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 металла углеродом и азотом часто бывает эффективнее раздельного. Это нитроцементация и цианирование (насыщение из токсичных цианистых солей).

Алитирование (насыщение алюминием) и хромирование сильно повышают коррозионную стойкость и жаростойкость стали. Алитируют клапаны двигателей, лопатки и сопла турбин. Хромируют поршневые кольца, зеркала цилиндра ДВС. Хром тверже (HRC 66–70) закаленной стали.

Силицирование повышает коррозионную стойкость деталей из SiC и Mo (подшипников скольжения и электронагревателей). Пористую силицированную поверхность для снижения трения и износа иногда пропитывают густым минеральным маслом.

Часть III. Машиностроительные материалы

Черные и цветные металлы, инструментальные сплавы, неметаллические и композиционные материалы, технические жидкости и газы...

Лекция 10. Черные металлы

Черные металлы – техническое название железа и его сплавов. Все остальные металлы называют цветными, независимо от их реального цвета: большинство металлов серые.

Железо – пластичный ферромагнитный металл с плотностью 7874 кг/м³ и температурой плавления 1539 °С. В земной коре около 5 % железа. Добывают его из гематитовых и магнетитовых руд. У железа четыре стабильных изотопа, из которых 92 % приходится на изотоп ⁵⁶Fe. Чистое железо в машиностроении не используют, но широко применяют его сплавы – стали и чугуны.

Стали классифицируют по составу, содержанию углерода и легирующих элементов, степени раскисления, качеству, структуре, прочности, способу производства и назначению.

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

По содержанию углерода – низкоуглеродистые (менее 0,3 % C), среднеуглеродистые и высокоуглеродистые (более 0,7 % C).

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 жидкой стали введением в нее раскислителей (Mn, Si, Al), отбирающих кислород у железа.

Стали бывают обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные. С ростом качества уменьшается содержание самых вредных примесей – S и P.

По структуре стали делят на перлитные (феррит с цементитом), аустенитные (с ГЦК решеткой), ферритные (с ОЦК решеткой) бейнитные и мартенситные (самокалящиеся: закаляются на воздухе).

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

Производство стали – мартеновское, конвертерное и электротермическое.

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

Конструкционные стали – подшипниковые, рессорно-пружинные.

Примеси в стали делят на случайные (попадают из скрапа и руд отдельных месторождений), постоянные (S, P, Mn, Si) и скрытые (газы: O, H, N).

Сера вызывает красноломкость стали (высокую хрупкость при нагреве), а фосфор – хладноломкость (повышенную хрупкость на холоде).

Марганец вводят для раскисления с избытком, чтобы его осталось 0,3...0,7 %; такое содержание считают технологической примесью.

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; его удаляют при раскислении. Азот вызывает деформационное старение стали, проявляющееся в разрывах при штамповке. Водород увеличивает хрупкость закаленных сталей; он попадает из защитных атмосфер.

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

Стали обыкновенного качества маркируют буквами Ст и цифрой (от 0 до 6, марка стали): Ст0, Ст1кп, Ст5пс. Чем выше марка, тем больше в стали углерода. Из прочных сортов Ст5 и Ст6 делают железнодорожные рельсы и колеса.

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

Достоинства легированных сталей проявляются лишь после термообработки: у них выше прочность, прокаливаемость и надежность, но они менее технологичны и часто подвержены отпускной хрупкости.

Легированные элементы маркируют заглавными русскими буквами: Х – Cr, Н – 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, жаростойкость и прокаливаемость стали; это обязательный компонент коррозионно-стойких и окислостойких сталей.

Никель повышает прочность, пластичность, прокаливаемость и коррозионную стойкость, понижает порог хладноломкости; это очень полезный легирующий элемент.

Молибден, вольфрам, ванадий и титан – карбидообразователи, увеличивающие прочность, теплостойкость и прокаливаемость стали. Однако избыток карбидов вреден.

Бор вводят в микродозах (~ 0,005 %) для увеличения прокаливаемости.

Свинец, кальций и селен улучшают обрабатываемость стали резанием, ими легируют автоматные стали.

Маркировка легированной стали начинается с числа, это углерод в сотых долях %. Легированные элементы маркируют буквами, а их содержание – цифрой после буквы. Буквой в конце обозначают качество стали: А – высококачественная сталь, Ш – особовысококачественная сталь. Пример: сталь 20ХНА – высококачественная, содержит 0,2 % С и примерно по 1 % Cr и Ni.

Легированные стали нормальной и повышенной прочности делят на цементуемые (0,1...0,3 % С) и улучшаемые (0,3...0,5 % С). Из цементуемых сталей (12Х2Н4А, 15Х, 25ХГМ) делают зубчатые колеса и кулачки, из улучшаемых (40ХНМА, 50Х) – валы, штоки, шатуны.

Высокопрочные стали делят на три класса: низколегированные, мартенситно-старяющие и аустенитные.

Мартенситно-старяющие стали – Fe-Ni сплавы, содержащие 8...25 % Ni. После закалки от 850 °С на воздухе и старения (500 °С) у них очень высокая прочность и отличная упругость; пример: 03Н12К15М10.

Метастабильные аустенитные стали сочетают высокую прочность с хорошей пластичностью и ударной вязкостью. Из них делают проволоку для тросов, броневой лист; пример: 25Н25М4Г.

Маркировка сталей специального назначения начинается с буквы: Э – электротехническая сталь, А – автоматная сталь, У – углеродистая инструментальная сталь, Ш – подшипниковая сталь, Р – быстрорежущая сталь. Содержание углерода в этих сталях указывают в десятых долях %.

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 могут быть углеродистыми (60, 70Г) и легированными (55С2); из них делают прочные и жесткие силовые пружины (термообработка: 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 на ферритные, ферритно-перлитные и перлитные, по форме углерода на белые, серые, ковкие, высокопрочные и по назначению на передельные, литейные, износостойкие, антифрикционные и чугуны для художественного литья.

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 %).

В высокопрочном чугуне графит сферический: ВЧ 120-2 (прочность 120 кГ/мм², пластичность 2 %). Получают их отжигом. Из таких чугунов отливают водопроводные трубы, коленчатые валы, поршневые кольца, детали кузнечно-прессового оборудования и другие ответственные изделия.

Лекция 11. Тяжелые металлы

Цветные металлы делят на легкие (легче Fe) и тяжелые. Тяжелые металлы: Cu, Ni, Pb, Hg, Co, Cd, все благородные и многие тугоплавкие металлы.

Медь – пластичный (50 %) пассивирующийся металл с плотностью 8,9 т/м³ и температурой плавления 1083 °С. В литосфере около 0,005 % Cu, добывают ее из сульфидных (медный колчедан) и оксидных (малахит) руд. По объему производства у нее III место после Fe и Al; запасов хватит лет на 50.

У меди высокая тепло- и электропроводность, при нагреве на воздухе она устойчива до 200 °С. Прочность мягкой отожженной меди 220 МПа; твердая тянутая медь вдвое прочнее. Медь очень технологична: ее прокатывают, полируют, паяют и сваривают. Чистая медь плохо льется и тяжело режется из-за большой вязкости. Из мягкой меди делают обмоточные провода, а из твердой – контактные. Медные кровли и фасады служат 150 лет. Прокаткой получают медные теплообменники и бесшовные трубы. Медный инструмент не искрит, его используют во взрывоопасных средах. В медучреждениях из меди делают бактерицидные поверхности (столешницы, перила, поручни). Анодная медь М00 содержит 99,99 % Cu. Человеку нужен 1 мг Cu в день, иначе страдают кости. Излишек меди в воде придает ей металлический привкус, это наша защита от передозировки.

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 (≈ 30 % Zn). Латунь Л96 содержит 96 % Cu.

Pb облегчает обрабатываемость латуни резанием. Al, Zn, Si и Ni повышают коррозионную стойкость. Fe, Ni и Mg упрочняют латунь.

Литейная латунь ЛЦ40Мц1,5 содержит 40 % Zn и 1,5 % Mn. Деформируемая латунь ЛАЖ60-1-1 содержит 60 % Cu и по 1 % Al и Fe.

Бронзы – сплавы меди с любыми элементами, кроме Zn и Ni. Из бронзы отлиты такие выдающиеся произведения литейного искусства, как Царь-пушка (1586 г.), Царь-колокол (1730 г.) и Медный всадник (1782 г.).

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

Бериллиевая бронза очень прочна (≈ 1200 МПа) и чрезвычайно упруга, это основной пружинный сплав приборостроения.

Из алюминиевой бронзы делают подшипники самолетов, гребные винты маломерных судов, ее используют для имитации золота в бижутерии.

Ювелирные сплавы по цвету похожи на золотые. Французское золото (58,3 % Cu, 16,7 % Sn, 25 % Zn), абиссинское золото (88 % Cu, 11 % Zn, 1 % Au).

Никель – твердый и пластичный пассивирующийся металл с плотностью 8,9 т/м³ и температурой плавления 1455 °С. Он устойчив на воздухе, в пресной и морской воде. В литосфере около 0,01 % Ni, добывают его из медно-никелевых руд. Никель ферромагнитен и у него ярко выражен магнитострикционный эффект: он сильно изменяет объем при намагничивании, что используют в ультразвуковых генераторах. Из никеля делают защитные покрытия, ювелирные изделия и биопротезы. Много никеля идет на легирование сталей и сплавов, он незаменим в аккумуляторах электроэнергии. Никель – слабый аллерген: у 12 % людей он вызывает контактный дерматит.

Никель образует сплавы почти со всеми металлами. 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 конструкционные, электротехнические и ювелирные.

Конструкционные Cu-Ni сплавы – нейзильбер, мельхиор, монель-металл, куниаль и др.

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 вентили для гидросетей, медицинский инструмент, медали и монеты; им 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.

Электротехнические Cu-Ni сплавы – константан (Cu-Ni-Mn), копель (Cu-Ni-Fe) и другие. Из них делают резисторы, термопары и нагреватели.

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

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 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 °С.

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

Свинец – легкоплавкий (327 °С) тяжелый (11,3 т/м³) пластичный металл. Освоен еще в бронзовом веке. Для получения свинца используют руды, содержащие минерал галенит. Свинец очень мягкий и непрочный (12 МПа), он режется ножом и царапается ногтем. Свинец белый и блестящий, но на воздухе окисляется и тускнеет. Имеет высокую (7,26 К) температуру перехода в сверхпроводящее состояние. Это последний элемент в таблице Менделеева, имеющий стабильные изотопы.

Свинец хорошо поглощает гамма-излучение, его используют для защиты в рентгеновских установках и ядерных реакторах. Из свинца делают дробь для охотничьих ружей. Водопровод в древнем Риме был изготовлен из свинцовых труб, что вряд ли способствовало хорошему здоровью. Из сплавов Sn-Pb делают припой для пайки меди, а из сплавов Pb-Sb – пули, типографские шрифты, оболочки кабелей; из антифрикционных сплавов Sn-Pb-Sb делают подшипники скольжения. Соединения свинца есть в аккумуляторах электроэнергии. Свинцовые белила уже потеряли былую популярность. Из тяжелого хрустального стекла с PbO делают красивую посуду. Это стекло безопасно, если его не нагревать в микроволновке: тогда оно лопнет.

Свинец и его соединения токсичны. Он разрушает кости, концентрируется в печени и почках. При отравлении свинцом болит живот и суставы, начинаются судороги и обмороки. При длительном воздействии свинец вызывает умственную отсталость и заболевания мозга. В России этилированный соединениями свинца высокооктановый бензин запрещен с 2002 года.

Ртуть – самый легкоплавкий (-39 °С) из металлов, единственный жидкий при комнатной температуре. Известно около 20 минералов, содержащих ртуть; это киноварь HgS, каломель Hg₂Cl₂ и другие. Плотность ртути 13,5 т/м³, она электропроводна и диамагнитна. В воде и многих кислотах ртуть не растворяется, она вообще малоактивна химически, но образует со многими металлами жидкие и твердые интерметаллидные соединения (амальгамы). Из ртутно-серебряной амальгамы еще недавно делали зубные пломбы и зеркала.

Ртуть используют как рабочее тело в ртутных термометрах, так как ее коэффициент термического расширения почти не зависит от температуры; для низкотемпературных термометров используют сплав ртути с таллием. Пары ртути светятся в тлеющем разряде, ими заполняют люминесцентные лампы. Кварцевые ртутные лампы без люминофора являются источником жесткого ультрафиолета и используются для обеззараживания помещений. Ртуть используют в контактных термометрах и датчиках положения, в металлургии золота. До середины XX века она применялась в барометрах и манометрах (давление в мм Hg столба).

Пары и многие соединения ртути токсичны, они поражают нервную, пищеварительную и иммунную системы, легкие, почки, печень и глаза. У ртути I класс опасности, это кумулятивный (накапливающийся) яд. Устранением ртутных загрязнений занимается служба демеркуризации, при ее обнаружении надо вызывать МЧС. Одно из тяжелейших загрязнений ртутью случилось в японском городе Минамата в 1956 году. Половина всей атмосферной ртути – результат вулканической деятельности, а вторая половина – нашей.

Кобальт – твердый ферромагнитный металл с плотностью $8,9 \text{ т/м}^3$ и температурой плавления $1493 \text{ }^\circ\text{C}$. Это ценный легирующий элемент в сталях и сплавах. Из кобальтовых сталей делают режущий инструмент: сверла, резцы, фрезы. Соединения кобальта применяют для окраски стекла и керамики.

Кадмий – редкий мягкий металл с плотностью $8,7 \text{ т/м}^3$ и температурой плавления $321 \text{ }^\circ\text{C}$. Его используют для защитных покрытий, электродов, красок, а также для легирования многих сплавов. Это ценный компонент твердых припоев на основе Ag, Cu и Zn. В ювелирном деле кадмий используют для создания красивых легкоплавких сплавов; сплав Cd-Au имеет необычный зеленоватый цвет. Пары и соединения кадмия ядовиты.

Лекция 12. Легкие металлы

Плотность металлов: Li – $0,5 \text{ т/м}^3$; K – $0,9 \text{ т/м}^3$; Na – $0,97 \text{ т/м}^3$; Rb и Ca – $1,5 \text{ т/м}^3$; Mg – $1,7 \text{ т/м}^3$; Be – $1,8 \text{ т/м}^3$; Cs – $1,9 \text{ т/м}^3$; Al – $2,7 \text{ т/м}^3$; Ti – $4,5 \text{ т/м}^3$.

Литий вдвое легче воды, это легкоплавкий ($180 \text{ }^\circ\text{C}$) щелочной металл, на воздухе он разлагается и как конструкционный не используется. Смазки с гидридом лития хорошо работают на морозе. Жидкий литий – теплоноситель в ядерных реакторах. Сплавы Al-Mg-Li и Al-Cu-Li применяют в авиации и криогенной технике. Перспективны сверхлегкие сплавы Be-Li. Некоторые соединения лития разлагают углекислоту и применяются для очистки воздуха в подводных лодках.

Калий тоже быстро окисляется на воздухе. Его контакт с водой ведет к взрыву. Жидкий сплав K-Na используют как теплоноситель в атомных установках. Сплав из 12 % Na, 47 % K и 41 % Cs – самый легкоплавкий ($-78 \text{ }^\circ\text{C}$) из всех

сплавов. Цианид калия применяют в гальванотехнике, добыче золота и при нитроцементации стали; это сильнейший яд.

Натрий – мягкий легкоплавкий (98 °С) щелочной металл, VI по распространенности элемент в земной коре. На воздухе он окисляется и в свободном состоянии не встречается; с водой реагирует бурно. Много натрия в каменной соли и в морской воде. В металлургии его используют как сильный восстановитель. Натрий находит применение в желтых газоразрядных лампах для уличного освещения; они служат 20000 часов. Хлорид натрия незаменим в пищевой промышленности.

Рубидий – легкоплавкий (39 °С) щелочной металл, похожий на калий и цезий. Его используют как катализатор в нефтепереработке, в составе смазок, в электронной и атомной технике, в психиатрии для препаратов, нормализующих настроение. Радиоактивный изотоп ^{86}Rb используют в гамма-дефектоскопии и измерительной технике, при стерилизации лекарств и пищевых продуктов. Сплавы Rb-Cs используют как теплоноситель и рабочую среду в турбинах.

Кальций – мягкий серебристый металл с температурой плавления 839 °С, V элемент в земной коре (после O, Si, Al, Fe). Из-за высокой химической активности в свободном виде не встречается. Много кальция содержится в гранитах, полевых шпатах, известняках, мраморе, меле и других минералах. Соли кальция есть в морской и пресной воде, из-за чего она делается жесткой. Кальций используют как восстановитель и раскислитель в металлургии никеля, меди, хрома и нержавеющей стали, а также при получении РЗЭ. Соединения кальция – известняк, мрамор, гипс (и известь – продукт обжига известняка) применялись в строительстве уже несколько тысячелетий назад.

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. Магний виброустойчив и обладает хорошей демпфирующей способностью. Он легко режется, при литье нужна защита от воспламенения, а при шлифовании – отсос взрывоопасной пыли. Магний незаменим в производстве зажигательных бомб, ракет, трассирующих пуль. В металлургии его используют для раскисления, восстановления и легирования сплавов. Mg96 содержит 99,96 % Mg.

Магниевые сплавы – деформируемые и литейные, упрочняемые и не упрочняемые термически; их делят на сплавы средней прочности, высокопрочные и жаропрочные. У сплавов Mg-Al-Zn-Mn прочность до 400 МПа, свободная длина 24 км при плотности менее 2 т/м³. По удельной вибрационной прочности они в 100 раз превосходят алюминиевые сплавы и в 20 раз – сталь.

Магниевые сплавы хорошо режутся, шлифуются и свариваются, но плохо льются. Термообработка: закалка на воздухе с последующим старением (200 °С). Прочность сплава МА10 около 430 МПа.

Применение магниевых сплавов – авиационная, реактивная и атомная техника, корпуса приборов и вагонов, детали моторов, бензобаки, колеса, цистерны, фотоаппараты, бинокли и другие легкие изделия.

Бериллий получают из руд, содержащих драгоценный минерал берилл: аквамарин – голубой берилл, изумруд – зеленый, гелиодор – желтый. Это прочный (700 МПа), твердый (5,5 баллов), жесткий (310 ГПа), фрикционный ($f=0,4$), металл с большой (37 км) удельной прочностью и огромной (16 км) удельной жесткостью (у стали 27 км и 2,6 км). Бериллий устойчив к резонансу, хороший демпфер.

Бериллий – лучший металл для легких и прочных конструкций. Из него делают элероны самолетов, теплозащиту ракет, надежные тормозные системы. В атомных реакторах его используют как замедлитель нейтронов и как конструкционный металл. Легированные бериллием стальные пружины работают даже при температуре красного каления.

Сплавов у бериллия мало. Сплав Be-Al (24 %) имеет высокую (620 МПа) прочность, низкую (3 %) пластичность и огромный (260 ГПа) модуль упругости.

Из химических соединений бериллия практический интерес представляют бериллиды – твердые, хрупкие и жаропрочные интерметаллидные соединения. Из них делают твердые детали для гироскопов и навигационных систем.

Цезий – мягкий (0,2 балла) легкоплавкий (29 °С: второй после Hg) редкий щелочной металл. Это самый активный из металлов, на воздухе он воспламеняется, его трудно хранить. Получают цезий как побочный продукт в производстве Li; годовая добыча всего ≈ 10 т (а надо 100 т). Цезий используют в электронике (фотоэлементы), ядерной физике (детекторы излучений, часы), энергетике (цезиевая плазма), оптике и медицине. Цена как у золота: 50 \$/грамм.

Алюминий – серебристый металл с температурой плавления 660 °С, прочностью 120 МПа и пластичностью 50 %. Это третий по распространенности (после O и Si) элемент в литосфере. Добывают Al из минералов: бокситов, нефелинов и глиноземов. У Al высокая тепло- и электропроводность, он хорошо отражает свет. Упрочняют Al нагартовкой (200 МПа), сваривают трением. Из-за высокой вязкости Al трудно резать, а из-за склонности к образованию оксидов – тяжело паять. Из Al особой чистоты делают провода, а из Al технической чистоты – рамы, двери, трубы, отражатели, фольгу, посуду.

Маркировка – А: технический Al, Д: дуралюмин, АК: ковочный сплав, АЛ: литейный сплав, В: высокопрочный сплав, АВ: авиаль (авиационный алюминиевый сплав), АМг: Al-Mg, АМц: Al-Mn, АМ: Al-Cu, САС: спеченный Al сплав.

Алюминий сплавляется почти со всеми металлами. Прочность сплавов достигает 700 МПа, свободная длина 23 км, при плотности менее 3 т/м³. Алюминиевые сплавы делят на литейные, деформируемые и спеченные.

Литейные сплавы содержат эвтектику: Al-Si (силумин), Al-Cu, Al-Mg и Al-Mn. Из силуминов льют корпуса компрессоров, головки цилиндров; у них малая усадка, хорошая жидкотекучесть, трещиностойкость и герметичность.

Деформируемые сплавы – дуралюмины, ковочные и высокопрочные.

Прочные и пластичные дуралюмины (Al-Cu-Mg) применяют в автомобилестроении, строительстве и авиации. Из Д1 делают лопасти самолетных винтов, из Д18 – заклепки. ТО: закалка от 500 °С в теплой воде со старением.

Ковочные алюминиевые сплавы отличаются от дуралюминов повышенным содержанием кремния. Из сплава АК8 делают вертолетные винты.

Высокопрочные сплавы – Al-Zn-Mg-Cu и Al-Mg-Si (авиали). У сплава В96 прочность около 700 МПа, из него делают обшивку самолетов.

Спеченные алюминиевые сплавы получают из метастабильных гранул методами порошковой металлургии, их прочность может достигать 800 МПа.

Титан – тугоплавкий (1688 °С) коррозионноустойчивый металл, в литосфере его около 0,6 % (минерал рутил и другие руды). Прочность титана 600 МПа, пластичность 25 %, свободная длина 30 км. Титан склонен к ползучести даже при комнатной температуре, из-за чего плохо держит статические нагрузки.

Титан незаменим в авиа-, ракето- и судостроении. Из него делают реакторы и трубы, им легируют сплавы. При нагреве Ti сильно поглощает газы, в электронике его используют для изготовления повышающих вакуум геттеров.

Золотистые покрытия из нитрида и оксида Ti твердые и красивые, их используют в инструментальной промышленности и в стоматологии. Такими красками покрывают купола храмов, они практичнее сусального золота.

Сплавы титана с алюминием и никелем намного прочнее (до 1800 МПа) и пластичнее бериллиевых. Они превосходят алюминиевые и магниевые сплавы по удельной прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости.

Упрочняют титановые сплавы закалкой со старением. Их азотируют для увеличения износостойкости, силицируют для улучшения жаростойкости и подвергают термоводородной обработке для повышения прочности.

Из титановых сплавов делают обшивку и шасси самолетов, детали реактивных и корпуса ракетных двигателей, обшивку и гребные винты судов, баллоны для сжиженных газов, велосипеды, броню, протезы суставов.

Сплавы Ni-Ti (нитинолы) обладают памятью формы. Их используют в космической технике для разворачивания антенн и солнечных батарей на орбите, в медицинских операциях, для изготовления самозаклепывающихся в недоступных местах соединений и самосрабатывающих муфт.

Лекция 13. Благородные и тугоплавкие металлы

У благородных металлов большой положительный электрохимический потенциал, делающий их устойчивыми в агрессивных средах. Это Au, Ag и платиноиды: Pt, Pd, Ru, Ir, Os и Rh. Все эти металлы относят к драгоценным.

Золото – плотный (19,3 т/м³), мягкий (2,5 балла), пластичный (65 %) желтый металл с температурой плавления 1064 °С. На воздухе золото не окисляется даже при нагреве. Растворяется оно лишь в смеси соляной и азотной кислот

(царской водке), а со ртутью образует легкоплавкую амальгаму. Из золотых сплавов делают контакты и припои. Содержание золота в сплаве обозначают государственным клеймом: сплав 585 пробы содержит 58,5 % Au. Сплавы пробы выше 750-й на воздухе не тускнеют, а сплавы пробы ниже 375-ой относят к бижутерии. Золото – важнейший элемент мировой финансовой системы. За все время добыто около 170 000 т (50 % – ювелирные изделия, 20 % – банковские слитки 999 пробы). Цена: ≈ 50 \$/г.

Серебро – пластичный тяжелый ($10,5 \text{ т/м}^3$) металл с температурой плавления $962 \text{ }^\circ\text{C}$ и высокой электропроводностью. Из серебра делают ювелирные изделия, фотоматериалы, зеркала (оно отражает 98 % света), припои, контакты и монеты. Обладает слабыми бактерицидными свойствами. Цена: $\approx 0,5$ \$/г.

Платина – мягкий (3,5 балла), плотный ($21,4 \text{ т/м}^3$), тугоплавкий ($1768 \text{ }^\circ\text{C}$) белый металл. Платина реагирует только с царской водкой и бромом. Из нее делают химическую посуду, медицинские и ювелирные изделия, зеркала для лазеров, нагревательные элементы, катализаторы химических реакций. Из сплавов Pt-Co делают сильные магниты, а из сплавов Pt-Ir – стойкие к электрической эрозии контакты. Цена: ≈ 40 \$/г.

Палладий – редкий белый металл с плотностью 12 т/м^3 и температурой плавления $1554 \text{ }^\circ\text{C}$. Отличный катализатор многих реакций органического синтеза. Палладий сильно поглощает водород и применяется для его очистки. Сплавы Pd-Pt-Au называют «белым золотом». Цена: ≈ 65 \$/г.

Рутений – редкий тугоплавкий ($2330 \text{ }^\circ\text{C}$) металл с плотностью $12,4 \text{ т/м}^3$. Не растворяется даже в царской водке. Сильно адсорбирует водород и используется для его очистки. Рутений применяют для синтеза синильной кислоты из аммиака и метана. Из сплавов Ru-Pt делают отличные контакты. Жаропрочные сплавы Ru незаменимы в аэрокосмической технике. Цена: ≈ 10 \$/г.

Иридий – самый плотный ($22,65 \text{ т/м}^3$) и жесткий (530 ГПа) из металлов, тугоплавкий ($2466 \text{ }^\circ\text{C}$) и твердый (6 баллов). В земле его меньше, чем Au и Pt. Иридий не растворяется даже в царской водке, при нагреве на воздухе устойчив до $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Из него делают химическую посуду, защитные покрытия, наконечники золотых перьев для авторучек, сплавы для термопар. Еще недавно эталон килограмма был сделан из Pt-Ir сплава. Цена: ≈ 35 \$/г.

Осмий – очень плотный ($22,6 \text{ т/м}^3$) и твердый (7 баллов) тугоплавкий ($3033 \text{ }^\circ\text{C}$) металл. С кислотами и щелочами не реагирует, но медленно растворяется в царской водке. Ценный компонент сверхтвердых сплавов. В кардиостимуляторах используют сплав Pt-Os. Пластичность сплава Os-Al достигает 100 %. Os используют как катализатор при синтезе аммиака. Цена: ≈ 15 \$/г.

Родий – редкий (добыча менее 30 т/год) тугоплавкий ($1960 \text{ }^\circ\text{C}$) металл, извлекаемый из самородной Pt. Устойчив во всех кислотах, щелочах и галогенах. Его используют в производстве азотной кислоты и каталитических фильтрах для выхлопных газов автомобилей. Из Rh делают зеркала для мощных лазерных систем. Сплав Pt-Rh используют в термопарах. Цена: ≈ 300 \$/г.

Тугоплавкие металлы, $^\circ\text{C}$ – Ti: 1688, Cr и Zr : 1855, V: 1900, Hf: 2230, Nb: 2470, Mo: 2620, Ta: 3015, Re: 3200, W: 3420 $^\circ\text{C}$, все платиноиды и торий.

Хром – твердый (6 баллов) голубоватый пассивирующийся металл с плотностью $7,2 \text{ т/м}^3$. В земной коре его около 0,01 %. Хром устойчив на воздухе, в пресной и морской воде, в серной и азотной кислотах. Это обязательный компонент коррозионностойких и жаростойких сталей.

Цирконий – пластичный серый металл с плотностью $6,5 \text{ т/м}^3$. Из него делают хирургические инструменты, протезы костей, посуду. Из твердой (8 баллов) циркониевой керамики делают зубные протезы и керамические ножи. Цирконий горит ярко, без дыма и используется в пиротехнике (осветительные ракеты). Целебные свойства циркониевых браслетов медицина не подтвердила.

Ванадий – пластичный металл с плотностью $6,1 \text{ т/м}^3$. Устойчив в воде, во многих кислотах и щелочах. Ценный легирующий элемент в коррозионностойких и инструментальных сталях.

Гафний – твердый серебристый металл с плотностью $13,3 \text{ т/м}^3$. Гидрофобен (не смачивается водой, как и цирконий). Способность гафния к захвату нейтронов используют в атомной технике. Ценный компонент жаропрочных авиационных и космических сплавов. В соплах космических ракет используют карбид гафния HfC – одно из самых тугоплавких ($3960 \text{ }^\circ\text{C}$) соединений. Из карбида и борида гафния делают износостойкие покрытия. Сплав, состоящий из 20 % HfC и 80 % TaC – самый тугоплавкий ($4200 \text{ }^\circ\text{C}$) из всех сплавов. Сплав Ti-Hf применяют в судовых двигателях. Никель, легированный гафнием, очень прочен. Много гафния уходит на производство спецстекло и оптического волокна.

Ниобий – серый металл с плотностью $8,6 \text{ т/м}^3$ и рекордно высокой ($9,25 \text{ К}$) для чистых металлов температурой перехода в сверхпроводящее состояние. Сплавы ниобия используют в космической и атомной технике. Алюминий, легированный ниобием, не растворяется в щелочах.

Молибден – серый металл с плотностью $10,2 \text{ т/м}^3$ и малым тепловым расширением. Из него делают нити накаливания, катоды, нагреватели, молибденовой проволокой режут металл на электроэрозионных станках. Из монокристаллического молибдена делают зеркала для лазерной техники. Из радиоактивного изотопа ^{99}Mo (цена 46 млн $\$/\text{г}$) получают технеций, незаменимый в онкологии. Молибденовая пыль вызывает легочные заболевания.

Тантал – твердый, пластичный (60 %) и плотный ($16,7 \text{ т/м}^3$) металл. Очень инертен: поддается лишь смеси плавиковой и азотной кислот. Биосовместимость тантала позволяет делать отличные остеопротезы (пластины для черепных проломов). Жаропрочный сплав Ta-W работает до температуры $3300 \text{ }^\circ\text{C}$. Карбид тантала TaC применяют в производстве инструментальных твердых сплавов. В ювелирном деле танталом заменяют платину. В электронике из него делают повышающие вакуум геттеры.

Рений – редкий, очень плотный (21 т/м^3) и твердый металл; при температуре $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ это самый прочный из металлов. Жаропрочные сплавы Re-Mo-W-Ni используют в атомной и космической технике. Рений имеет военно-стратегическое значение, так как незаменим при производстве реактивных и ракетных двигателей. W-Re термопары измеряют температуру до $2200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вольфрам – плотный ($19,3 \text{ т/м}^3$) коррозионностойкий металл. Важнейший компонент инструментальных сталей и сплавов. Из него делают катоды электровакуумных приборов, нагревательные элементы, нити накаливания, электроды, хирургические инструменты, сердечники бронебойных пуль и снарядов, танковую броню, оболочки торпед, контейнеры для радиоактивных веществ. 85 % вольфрама производит Китай.

Торий – тугоплавкий ($1750 \text{ }^\circ\text{C}$) слабо радиоактивный металл. Ториевая энергетика, возможно, придет на смену урановой, запасы которого уже истощаются. В металлургии торий используют как легирующий элемент. Он содержится в некоторых гранитах, делая их слегка радиоактивными и непригодными для жилищного строительства.

Лекция 14. Неметаллические материалы

Органические, стеклянные, керамические, жидкие, газообразные...

Органические материалы – полимеры, пластмасса, резина, древесина...

Полимеры бывают природного и синтетического происхождения.

Природные смолы – шеллак, канифоль и янтарь. Шеллак производят тропические насекомые; выпускают его в виде клеящих, электроизоляционных и декоративных лаков. Канифоль – хрупкое аморфное вещество, получаемое из хвойной смолы. Ее используют для пропитки бумаги и картона, как флюс для пайки меди (но не алюминия). Янтарь – окаменевшая хвойная смола; ювелирный камень, отличный диэлектрик.

Синтетические полимеры бывают термопластичные и термореактивные.

Макромолекулы термопластов слабо связаны между собой в поперечном направлении. Термопластичны полиэтилен, оргстекло и др. линейные полимеры.

Полиэтилен $(-\text{CH}_2-)_n$ морозоустойчив, инертен, при нагреве размягчается, стареет от ультрафиолета. Стабилизаторы (сажа) замедляют старение. Полиэтилен низкого давления имеет высокую плотность, а полиэтилен высокого давления – низкую. Выпускают в виде пленки, тары, труб, изоляции.

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 глазные хрусталики).

Макромолекулы реактопластов прочно связаны в поперечном направлении. Такая сетчатая структура формируется при введении в полимер реагента-отвердителя. Реактопласты инертнее, прочнее и долговечнее термопластов. Их основа – эпоксидная или полиуретановая смола. Реактопласты упрочняют порошками и волокнами, получая разнообразные пластмассы: карболит, фенопласт, аминопласт, гетинакс, текстолит...

Пластмассы содержат полимер, отвердитель, наполнитель, стабилизатор и пластификатор. Их классифицируют по полимеру на полиуретановые, полиамидные, эпоксидные, стирольные...

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

Резина содержит каучук, вулканизатор, краситель и наполнитель. Упругая деформация мягкой (~ 3 % S) резины достигает 500 %. Сильно вулканизованную (~ 30 % S) жесткую резину называют эбонитом. Старение резины ускоряют озон, тепло и ультрафиолет.

Промышленную древесину получают из твердых сортов натуральной древесины (березы, бука). Ее 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, инертный и электропроводный материал. Его используют в ядерных реакторах, авиации и космонавтике, в электротехнических, композиционных и антифрикционных материалах. Графит бывает природный и искусственный.

Слюда – прочный слоистый минерал, расщепляющийся на тонкие гибкие прозрачные пластины. В электротехнике в основном используют флогопит и мусковит как теплостойкий диэлектрик.

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

Оксидные стекла – силикатное, германатное, боратное и фосфатное.

Силикатное стекло состоит в основном из оксида кремния SiO_2 . Оно устойчиво во всех кислотах, кроме плавиковой, но щелочи его разлагают. Плотность стекол колеблется в широком диапазоне 2...8 т/м³, у них высокая (около 2 ГПа) прочность на сжатие, а на растяжение – всего 100 МПа. Упрочняют стекла закалкой и химической обработкой. К силикатным относят легкое кварцевое стекло и тяжелый хрусталь.

Кварцевое стекло состоит из чистого SiO_2 . Оно огнеупорно (рабочая температура более 1000 °С) и прозрачно в широком спектральном диапазоне, частично захватывающем ультрафиолет, у него малое термическое расширение. Из кварцевых стекол делают лампы для соляриев и дезинфекции помещений, окна печей, детали механики, посуду и оптическое волокно.

Хрусталь – мягкое свинцовое стекло. Хрустальная посуда красива из-за высокой дисперсии (рассеяния света) и сильного преломления лучей.

Износостойкие стекла – Gorilla Glass (6 баллов) и сапфировое (9 баллов).

Высокую твердость у Gorilla Glass получают химической обработкой и закалкой. Большинство металлов мягче, но кварцевый песок его царапает.

Сапфировое стекло состоит из лейкосапфира (прозрачного корунда Al_2O_3). По твердости оно уступает лишь алмазу и эльбору, его очень трудно поцарапать. Сапфировое стекло сравнительно дорогое и тяжелое.

У оптических стекол высокая прозрачность. Стекла с большой дисперсией называют кронами, а с малой – флинтами. У легких стекол коэффициент преломления мал (1,4), а у тяжелых стекол – велик (до 2,2).

У монокристаллов кремния огромный коэффициент преломления (до 3,4), но они прозрачны только для инфракрасных лучей, их используют в тепловой оптике.

Керамика – искусственный камень, полученный обжигом чистых глин. Она жаропрочна, инертна и долговечна. Керамика бывает строительная, электрическая, оптическая, магнитная и техническая.

Строительная керамика – кирпич, черепица, плитка, фарфор, фаянс.

Электрическая – пьезоэлектрическая, диэлектрическая, сверхпроводящая. Из электротехнического фарфора делают изоляторы на ЛЭП.

У высокотемпературной сверхпроводящей ртутной керамики температура перехода в сверхпроводящее состояние уже достигла 135 К: ее можно охлаждать сравнительно недорогим жидким азотом.

Техническая керамика – силикатная, оксидная и бескислородная. Оксидная керамика не окисляется при нагреве, ее прочность на сжатие до 5 ГПа. Бескислородную керамику надо защищать от окисления при нагреве.

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.

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

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

По 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 удерживаются в негерметичных узлах трения. Их делят по составу на кальциевые (солидолы), углеводородные, бариевые, натрие-

вые и по назначению на антифрикционные, консервационные и герметизирующие.

Рабочие среды – гидравлические, тормозные, амортизационные и вакуумные масла с различными 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, противозадирные, 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 перевозят специальным транспортом в цветных баллонах: О – голубой, Н – зеленый, Аг – серый, СО₂ и N – черный, пропан-бутан – красный, ацетилен – белый, Не – коричневый.

Воздух содержит 78 % N, 21 % O, 1 % Ar, 0,03 % СО₂ и незначительное количество гелия, неона, криптона и других газов, а также водяной пар. Воздух используют как рабочую среду в пневматических устройствах и как окислитель в ДВС. Азот, кислород и аргон получают криогенным разделением воздуха. Плотность воздуха при 20 °С равна 1,2 кг/м³ и она быстро уменьшается при нагреве, что приводит к вертикальным конвективным движениям, широко используемым в теплотехнике (например, тяга в печных трубах).

Азот используют для создания защитных атмосфер, контроля трубопроводов, накачки самолетных шин, в огнетушителях, для легирования сплавов. Много азота идет на получение аммиака NH₃. Из аммиака делают удобрения, взрывчатку, полимеры и нашатырный спирт.

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

Ацетилен (С₂Н₂) – легкий бесцветный горючий газ. Применяют в производстве каучука, этилового спирта, взрывчатки, пластмасс и технического углерода. Ацетилен-кислородная сварка дает температуру пламени 3000 °С.

Водород – самый распространенный элемент во Вселенной, на его долю приходится 89 % всех атомов (и еще 11 % – He). Это самый легкий ($0,1 \text{ кг/м}^3$) газ и самый лучший восстановитель. В смеси с воздухом образует гремучую смесь, но чистый водород не взрывается. Жидкий водород ($-253 \text{ }^\circ\text{C}$) используют в качестве ракетного топлива. Получают его из природного газа (метана), угля или электролитическим разложением водных растворов.

Гелий – самый инертный химический элемент; получают его из природных газов глубокой заморозкой. Плотность гелия ($0,2 \text{ кг/м}^3$) вдвое выше плотности водорода, и он дороже, но зато безопасен. Гелием наполняют дирижабли, аэростаты, воздушные шары, в пищевой индустрии – это упаковочный газ, в электротехнике – хладагент в сверхпроводящих устройствах, а в металлургии – нейтральная защитная атмосфера. Гелий применяют в дыхательных смесях для глубоководного погружения.

Кислород используют как окислитель при сварке, в металлургии, в ДВС и ракетном топливе (жидкий).

Метан (CH_4) и пропан (C_3H_8) – слаботоксичные газы без цвета и запаха. Взрывоопасны, а метан к тому же обладает легким наркотическим эффектом. Для обнаружения утечек в них добавляют одорант с сильным запахом и используют как сырье для органического синтеза и топливо для автомобилей. Метан в баллоны закачивают в газообразном состоянии при $p = 200 \text{ атм.}$, а пропан – в жидком состоянии при $p = 8 \text{ атм.}$ Из всех видов автомобильного топлива самый высокий (IV) класс пожарной безопасности у метана (у пропан-бутановой смеси – II, а у бензина – III). Но метановых заправок меньше.

У углекислого газа при атмосферном давлении две фазы: твердая (ниже – $78 \text{ }^\circ\text{C}$) и газообразная. Однако при высоком давлении появляется и жидкая фаза, что используют для его хранения в баллонах. Углекислоту применяют в системах пожаротушения, как защиту при сварке, в пневматическом оружии и пищевой промышленности. Углекислый газ нетоксичен, он тяжелее воздуха и вытесняет его из закрытых шахт, его относят к удушающим газам (развлечение с сухим льдом в бассейне погубило в 2020 году трех человек).

Азотно-водородные смеси используют как защитные атмосферы, они дешевле чистого водорода. Смеси не взрываются, если водорода в них менее 10 %. Диссоциированный аммиак содержит 75 % водорода и 25 % азота.

Лекция 15. Материалы с особыми свойствами

Упругие, коррозионностойкие, жаропрочные, хладостойкие и другие.

Сплавы с высокой упругостью – рессорно-пружинные стали, железоникелевые сплавы, бериллиевые бронзы.

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-старееющих железоникелевых сталей высокий предел текучести (1500 МПа) и низкий порог хладноломкости. Они по всем показателям лучше, но дороже рессорно-пружинных сталей.

Бериллиевые бронзы после термомеханической обработки приобретают высокий (1000 МПа) предел текучести. Это пружинные сплавы приборостроения: из них делают точные чувствительные пружины приборов.

Сплавы с памятью формы запоминают формы, которые имели при разных температурах. Если температуру вернуть, вернется и форма. Память формы бывает одно- и двусторонняя. При односторонней сплав помнит только горячую форму, а при двусторонней – горячую и холодную. Это сплав Оландера (Au-Cd), нитинол (Ni-Ti) и медные сплавы: Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al. Их используют в космонавтике, медицине и многих других областях.

Сверхупругость – способность сплава восстанавливать форму при постоянной температуре. Это тоже связано с мартенситным превращением, но вызывается оно не температурой, а напряжениями. Сверхупругие сплавы восстанавливают форму после очень больших (до 8 %) деформаций.

Малое тепловое изменение упругости у железоникелевых элинварных сплавов. Все сплавы в той или иной степени теряют упругость при нагреве, но элинвары более устойчивы.

Коррозионностойкие материалы хорошо противостоят химической и электрохимической коррозии. Химическую коррозию вызывает контакт металла с раскаленными газами и нефтепродуктами, а электрохимическую – с электролитами (солями, щелочами и кислотами). Очень устойчивы благородные и многие тугоплавкие металлы, Al, Cu, Ti. В наших широтах скорость атмосферной коррозии, мкм/год – Fe – 20; Cu – 1; Ag – 0,04; Au – 0.

Коррозионностойкие стали сильно (> 12 %) легированы хромом, они устойчивы в воде и слабых электролитах. Коррозионностойкие стали бывают хромистые (15X28) и хромоникелевые (12X18Н9).

Жаростойкие стали, легированные Cr, Al и Si, не покрываются окалиной даже при сильном нагреве. Так, жаростойкость стали, содержащей 25 % Cr и 5 % Al, достигает 1200 °C.

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.

Жаропрочные материалы хорошо сопротивляются ползучести. Они бывают металлические (стали, сплавы Ni и Co), неметаллические и композитные.

Жаропрочные стали (например, котельная сталь 15К) способны держать небольшие нагрузки до температуры 500 °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 защиты.

Хладостойкие материалы работают при криогенных температурах (ниже температуры кипения кислорода, равной -183 °С). Для них особенно важна хорошая свариваемость. На таком холоде из железных сплавов сохраняют наибольшую пластичность лишь аустенитные стали. При еще более низких температурах используют Al, Cu, Ti и их сплавы.

Радиоактивные материалы используют в науке и технике, энергетике и медицине. У элементов с $Z > 82$ (Pb) все изотопы радиоактивны. Образующиеся при их распаде атомы тоже радиоактивны: так возникает семейство радиоактивных изотопов. Есть три таких семейства: U, Th и актиния. Радиоактивные изотопы любого элемента можно получить искусственно.

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 превосходят урановые.

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

Износостойкие материалы – триботехнические, подшипниковые и инструментальные. Материалы с малым трением называют антифрикционными, а с большим – фрикционными.

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

Подшипники скольжения при скоростях до 5 м/с делают из антифрикционных чугунов ($f \approx 0,2$). При больших скоростях скольжения используют бронзы ($f \approx 0,15$), баббиты ($f \approx 0,1$) и металло-графитовые композиты ($f \approx 0,1$).

Баббит – мягкий, тяжелый и непрочный сплав на оловянной или свинцовой основе. Из него делают антифрикционные покрытия с рабочей температурой до 80 °С. Баббит Б83 содержит 83 % Sn, 11 % Sb и 6 % Cu.

Бронзы и латуни прочнее и легче баббитов, но и трение у них выше.

Антифрикционные чугуны: серые АЧС, ковкие АЧК, высокопрочные АЧВ

Антифрикционные пластмассы – фторопласт-4 ($f \approx 0,05$), полиамид, капрон.

Антифрикционные минералы бывают естественные (агат) и искусственные (рубин, корунд); из этих твердых камней делают миниатюрные подшипни-

ки скольжения – точечные опоры для часов, тахометров и гироскопов. Они выдерживают огромные давления при вращении закаленной стальной цапфы.

Антифрикционные композиты содержат твердую смазывающую фазу (графит, нитрид бора BN, дисульфид молибдена MoS₂). Это бронзографиты, железографиты и 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.

Твердые материалы нужны для изготовления подшипников и инструмента.

Подшипниковые стали – общего назначения (ШХ15), для агрессивных сред (95Х18) и для динамических нагрузок (18ХГТ). У сталей общего назначения после закалки и низкого отпуска HRC 60–64. Прецизионные подшипники дополнительно обрабатывают холодом при температуре -80 °С.

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

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

У углеродистых инструментальных сталей состав эвтектоидный или заэвтектоидный. После неполной закалки и низкого отпуска у них HRC 62–64. Теплостойкость низкая: 200 °С. Из таких сталей делают инструмент для ручных работ по металлу и для обработки древесины. Маркируют буквой У, а углерод указывают в десятых долях %: сталь У13А – 1,3 % С, сталь У8 – 0,8 % С.

Низколегированные инструментальные стали содержат Cr, Mn, Si, W. Их маркировка начинается с числа (углерод в десятых долях %): 9ХС. Если углерода больше 1 %, то числа нет: ХВГ. После закалки в масле и низкого отпуска у алмазной стали ХВ5 (1,4 % С, 1 % Cr и 5 % W) достигается рекордно высокая твердость HRC 65-67. Однако теплостойкость низкая – всего 260 °С.

Быстрорежущие стали легированы сильными карбидообразователями (W, Mo, V, Cr), образующими с железом твердые тугоплавкие карбиды, из-за чего их теплостойкость превышает 600 °С. Из таких сталей делают металлорежущий инструмент для станков. Маркируют их буквой Р (рапид) и числом (% W): Р18 – 18 % W, Р6М5 – 6 % W, 5 % Мо.

Термообработка стали Р18: закалка в масле от высокой (1280 °С) температуры и многократный отпуск (3...5 раз, 1 час, 550 °С) для устранения нестабильного остаточного аустенита; после этого HRC 63–65.

Твердые сплавы состоят из тугоплавких карбидов (WC, TiC, TaC) и пластичной кобальтовой связки. Из них делают пластинки, режущие сталь на больших скоростях. У твердых сплавов HRC 74–76 и теплостойкость 1000 °С.

Они бывают вольфрамовые, титановольфрамовые и титанотанталовольфрамовые. По стойкости они в десятки раз превосходят быстрорежущие стали.

Вольфрамовые твердые сплавы состоят из WC и Co. Сплавами BK3...BK8 (3...8 % Co) режут чугун, цветные металлы, фарфор, керамику. Из сплавов BK10 и BK15 делают волочильный и буровой инструмент, а из сплавов BK20 и BK25 – штампы и износостойкие детали машин. Популярный в народе твердый сплав «Победит» содержит 90 % WC и 10 % Co, им сверлят железобетон.

Титановольфрамовые твердые сплавы состоят из TiC+WC и Co. Их маркируют буквой T и числом (% TiC): T30K4 содержит 30 % TiC и 4 % Co. Их применяют для скоростного резания стали.

Титанотанталовольфрамовые твердые сплавы состоят из TiC+TaC+WC и Co связки. Их маркируют TT и числом (TiC+TaC в %): сплав TT8K6 содержит 8 % TiC+TaC и 6 % Co. Эти твердые сплавы применяют для тяжелых режимов резания (обработки стальных отливок и поковок).

Сверхтвердые материалы – электрокорунд Al_2O_3 , карбид и оксид циркония, карбиды кремния и бора, синтетический алмаз и кубический нитрид бора.

Твердость диоксида циркония ZrO_2 более 8 баллов по Моосу. Из него методами порошковой металлургии делают керамические ножи и отличные зубные протезы (служат более 15 лет).

Твердость карбида кремния SiC (карборунда) 9 баллов по Моосу; в металлообработке и стоматологии его используют как абразивный материал.

Технический алмаз – самый твердый (10 баллов) и теплопроводный из материалов. Но он хрупок, а теплостойкость на воздухе всего 800 °C. У алмаза сильное сродство к железу: резать сталь и чугун им не рекомендуется.

Кубический нитрид бора BN – синтетический материал (в природе такого нет), выпускаемый под названиями эльбор и боразон. Твердость 10 баллов (но меньше, чем у алмаза), теплостойкость 1200 °C, нет сродства к железу: им можно резать закаленную сталь.

Лекция 16. Композиционные материалы

Композиционные материалы состоят из разных по составу и свойствам фаз: пластичной матрицы и прочной арматуры. Идея взята у природы: так устроены легкие и прочные стебли растений и кости животных. Матрица защищает арматуру и распределяет нагрузку в ней. Ее называют связкой или основой, так как она связывает арматуру и придает форму изделию.

Арматура обеспечивает прочность композиту. Ее называют наполнителем или упрочнителем, так как она наполняет и упрочняет матрицу. Хорошей арматурой являются волокна, нитевидные монокристаллы и углеродные нанотрубки.

Неорганические волокна – металлические, стеклянные, углеродные, асбестовые, борные, оксидные, карбидные. Прочность лучших достигает 4 ГПа.

Металлические волокна делают из легких (Al, Mg, Be, Ti) и тугоплавких (W, Mo) металлов или из сплавов (сталь, латунь, нихром). Они прочные, электропроводные, термостойкие, не намокают и не горят. Но металлы окисляются и могут вступать в химические реакции с матрицей.

Стекланные 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).

Углеволокно очень легкое ($\approx 2 \text{ т/м}^3$), прочное (до 3 ГПа), инертное и электропроводное. Его термостойкость в бескислородной атмосфере превышает 2000°C , а на воздухе – всего 350°C .

Дискретные волокна – нитевидные монокристаллы, за ветвистую форму называемые «усами». Их длина может достигать 1 см при толщине менее 50 мкм. Для арматуры используют усы оксидов Al, Ti, Be и карбидов B, Si. Прочность нитевидных монокристаллов карбида кремния около 30 ГПа.

Органические волокна – натуральные: хлопок, лен, шелк и синтетические: полиэфирные (лавсан), полиамидные (капрон, нейлон), арамидные (кевлар, тварон). Прочность арамидных волокон достигает 3 ГПа, они не плавятся и почти не горят, но стареют от ультрафиолета. Из них делают тросы, бронежилеты, огнезащитную одежду (арселон).

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 химической совместимости фаз, так как арматура образуется внутри материала естественным образом, а не вводится искусственно.

Матрица бывает полимерная, металлическая, керамическая и углеродная.

Полимерная матрица может быть из термопластов, реактопластов и эластомеров.

Полимерные композиты – фено- и аминопласты (абразивные круги), антифрикционные графитопласты, саженаполненные каучуки (протекторы шин), стеклопластики и углепластики. Пластики бывают пористые, жидкофазные, дисперсноупрочненные, волокнистые и слоистые.

Пористые пластмассы используют для тепло- и звукоизоляции. Композиты с сообщающимися порами называют поропластами (они впитывают влагу), а с закрытыми порами – пенопластами (они не намокают).

У жидкофазных композитов в порах находится какая-либо полезная жидкость: лекарства, ингибиторы коррозии, антисептики...

Дисперсноупрочненные композиты наполняют порошками каолина и карбоната кальция; так делают плитку, трубы, изоляцию. Тальк повышает жесткость полипропилена. Сажа замедляет старение резины и полиэтилена.

Волокнистые композиты – стеклопластики, углепластики, асбопластики.

Стеклопластик легок (2 т/м^3), прочен (до 2 ГПа), коррозионностоек, не горит, по удельной прочности превосходит сталь. Его используют в судостроении, в строительстве и авиации, в спортивных и бытовых товарах.

Углепластик – эпоксидная смола, армированная углеволокном. Очень легок ($\approx 1,5 \text{ т/м}^3$), прочен (до 2 ГПа), электропроводен и хрупок. Его применяют в авиации (вертолетные винты), судостроении (корпуса малых судов), в спортивных (удилища) и бытовых товарах. Углепластик дороже стеклопластика; особенно дорого жесткое высокомодульное углеволокно.

Прочные, жесткие и теплостойкие ($200 \text{ }^\circ\text{C}$) бороваолокниты находят применение в промышленной и бытовой технике (лопасти вентиляторов).

Асбопластик армирован асбестовым волокном, его теплостойкость достигает $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Из него делают тормозные колодки, коллекторы электромашин. Паронитом (асбопласт на каучуковой основе) герметизируют гидравлические сети.

Органопласты – очень легкие ($< 1,4 \text{ т/м}^3$) и прочные композиты, армированные органическим волокном. Из них делают парашюты, паруса, баллоны для газов, бронежилеты и тросы. Арамидные органопласты обладают высокой вибростойкостью и усталостной прочностью, они работают до $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Слоистые пластики – текстолиты, гетинаксы, дублированные пластики.

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

Гетинакс – сульфатно-целлюлозная бумага, пропитанная смолой. Из него делают электротехнические платы, щиты и перегородки.

Дублированные пластики содержат ткань или резину; дуплен, линолеум.

Композиты на металлической матрице прочные, жесткие, негорючие. Дисперсноупрочненные алюминиевые композиты армированы порошком оксида алюминия; их прочность достигает 450 МПа. Из эвтектических алюминиевых композитов делают скользящие электрические контакты. Прочные и легкие бериллиевые композиты используют в ракетостроении. Легкие магниевые композиты применяют в ядерной технике и авиации. Из никелевых композитов делают лопатки турбин реактивных двигателей, трубопроводы для агрессивных сред.

Псевдосплавами называют порошковые композиты. Из W-Cu и W-Ag делают подвижные контакты. Fe-Cu, Fe-Mn-Cu – антифрикционные материалы.

Керамические композиты инертны, тверды и жаропрочны. Их армируют для уменьшения хрупкости металлическими волокнами и называют керметами.

Из высокотемпературных керметов делают детали турбин, ракет и реактивных двигателей, арматуру печей. Из твердых керметов делают металлорежущие инструменты и зубные протезы. Из фрикционных керметов делают детали тормозных устройств, а из антифрикционных – точечные опоры и щетки электрических машин (C-Cu).

Углеродистый графит состоит из углеродной матрицы, упрочненной углеродным волокном. Из него делают высокотемпературные узлы ракет, тормозные колодки тяжелых самолетов и космических шаттлов. В инертной среде он работает до 3500 °С, но на воздухе сгорает.

Лекция 17. Защита металлов от коррозии

Коррозией называют химическое разрушение металла окружающей средой, а эрозией – физическое разрушение электрической дугой. Потери от коррозии делят на прямые и косвенные. Прямые потери связаны с заменой ржавых конструкций и затратами на их защиту, а косвенные – с авариями и простоями оборудования, утечками в трубопроводах; косвенные потери могут значительно превосходить прямые.

Коррозионные процессы классифицируют по механизму и условиям протекания, характеру разрушения и типу агрессивной среды.

По механизму протекания различают химическую и электрохимическую коррозию. Химическая развивается под воздействием горячих газов и неэлектролитов, к которым относят и все нефтепродукты. Электрохимическую коррозию вызывают электролиты – растворы кислот, солей и щелочей.

По условиям протекания коррозия бывает контактная, щелевая, межкристаллитная, под воздействием механических напряжений, кавитационная и фреттинг-коррозия.

Контактная коррозия приводит к быстрому разрушению разнородных соединений. Некоторые металлы лучше не соединять вовсе (Al-Cu, Al-Ni).

К щелевой коррозии особенно чувствительны пассивирующиеся металлы. С ней борются конструктивными методами: избегают зазоров или хорошо уплотняют их. Щелевой коррозии подвержены резьбовые и шлицевые соединения, посадки с зазором.

Межкристаллитная коррозия избирательно разрушает границы зерен. Это опасный скрытый вид разрушения, приводящий к потере металлом пластичности и прочности. Разновидность: ножевая коррозия, разрушающая сварные швы в хромоникелевых сталях.

Микроскопические перемещения деталей в неподвижном соединении приводят к виду износа, называемому фреттинг-коррозией. Это результат совместного воздействия трения и окисления. Она разрушает заклепочные, резьбовые, шпоночные и шлицевые соединения.

По характеру разрушения коррозия бывает сплошная и локальная. Сплошная покрывает всю поверхность, она может быть равномерной, неравномерной и избирательной. Локальную коррозию разделяют на пятнистую, язвенную, точечную (питтинговую) и сквозную. Питтингу (глубоким точечным язвам) подвержены пассивирующиеся металлы (Ni, Zr, Al) и их сплавы.

По типу среды коррозия бывает газовая, жидкостная, атмосферная, почвенная, морская и биокоррозия. Биокоррозию вызывают продукты жизнедеятельности микроорганизмов (бактерий, грибов), она осложняет другие виды коррозии; это один из главных врагов трубопроводов.

Методы защиты от коррозии – антикоррозийное легирование, защитные покрытия и среды, катодная защита металлоконструкций, покраска, рациональное конструирование.

Коррозионностойкие стали легируют Cr (12...30 %), Al (до 5 %) и Si (3 %). Они устойчивы на воздухе, в воде и некоторых электролитах; 30X13, 08X22H6T.

Покрытия наносят диффузией, осаждением, напылением и покраской.

Диффузионное алитирование защищает сталь от атмосферной и газовой (до 900 °С) коррозии. Алитируют клапаны ДВС, лопатки и сопла турбин.

Диффузионное хромирование стали защищает ее от окисления в пресной и морской воде, повышает окалиностойкость до 800 °С и снижает трение. Хромируют трущиеся детали: цилиндры ДВС, поршневые кольца. Диффузионные слои не разрушаются и не отслаиваются.

Осажденные металлические покрытия бывают катодные и анодные.

Катодные покрытия делают из электроположительных металлов. Луженые Pb и Sn стали устойчивы на воздухе, в воде и слабых электролитах.

Анодные покрытия делают из электроотрицательных металлов. Анодирование стали Zn и Cd защищает их от атмосферной и морской коррозии. При анодировании алюминия деталь погружают в серную кислоту и соединяют с анодом; выделяющийся кислород окисляет металл, образуя 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 защищает ее от дальнейшего окисления.

Термическое оксидирование проводят в атмосфере водяного пара или чистого кислорода; у черных металлов это называют воронением. Цвет пленки зависит от ее толщины и может изменяться от желтого до сине-черного, это цвета побежалости. Для блеска и улучшения защитных свойств пленку часто пропитывают густым маслом. Раньше воронение применяли для защиты, а сейчас это в основном декоративная обработка.

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 (масла, полимеры), растворители (ацетон, бензин, скипидар, уайт-спирит), разбавители (высыхают раньше растворителей: бензол), пластификаторы (касторовое масло), сиккативы (соли Pb и Zn, ускоряют высыхание), отвердители, красители, пигменты, антиоксиданты (замедляют окисление и старение покрытия), наполнители (мел, тальк; снижают стоимость, улучшают свойства).

Лакокрасочное покрытие четырехслойное – грунтовка, шпатлевка, краска и пленка лака. Грунт – подстилающий слой, улучшающий сцепление покрытия с поверхностью. Шпатлевку наносят на грунт для выравнивания поверхности, она улучшает вид и экономит краску. Лак защищает и украшает покрытие.

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

Защитные атмосферы делят на нейтральные (азот, аргон) и восстановительные (водород и азотно-водородные смеси).

Нейтральная атмосфера лишена кислорода: азот, аргон, вакуум.

Восстановительная атмосфера – водород и азотно-водородные смеси.

Чистый водород не взрывается, однако в смеси с воздухом он образует гремучий газ; поэтому перед подачей водорода печь продувают азотом.

Азотно-водородные смеси дешевле и безопаснее чистого водорода. Они не взрываются, если водорода менее 10 %. Получают такие смеси термической диссоциацией аммиака или прямым смешением газов.

Технический вакуум бывает низкий, средний, высокий и сверхвысокий.

Низкий вакуум начинается от 1 мм Hg. Такое разрежение дает производительный форвакуумный насос, поэтому низкий вакуум сравнительно дешев.

Высокий вакуум начинается от давления 10^{-5} мм Hg, а сверхвысокий – от давления 10^{-9} мм Hg. Давление в дальнем космосе падает до невероятно низких величин порядка 10^{-16} мм Hg (1 молекула на 1 см^3), для нас это недостижимо.

Технический вакуум используют для электроизоляции (электровакуумная техника: электронные лампы, кинескопы), для теплоизоляции (термосы и другие устройства), для защиты металлов от окисления (вакуумные печи), а также в вакуумной очистке различных веществ и сублимационной сушке пищевых продуктов (сухофрукты, растворимый кофе).

Витебский государственный технологический университет

Литература

1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : 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. – М. : 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. Материаловедение : конспект лекций / В. В. Пятов, А. Н. Голубев. – Витебск : УО «ВГТУ», 2017. – 58 с.

Учебное издание

Пятов Владислав Владимирович

Голубев Алексей Николаевич

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Конспект лекций

Редактор *Т. А. Осипова*

Корректор *А.В. Пухальская*

Компьютерная верстка *В. В. Пятов*

Подписано к печати 11.12.2020. Формат 60x90^{1/16}. Усл. печ. листов 3,7.

Уч.-изд. листов 4,7. Тираж 55 экз. Заказ № 340.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, 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.