

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Кафедра «Технологии функциональных и конструкционных материалов»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ, ПРАКТИЧЕСКИХ И
САМОСТОЯТЕЛЬНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»
для направления 22.03.01 – «Материаловедение и технологии материалов»
(бакалавриат)**

К.т.н., доцент Елгаев Н.А.

Рассмотрено и одобрено
на заседании кафедры ТФ и КМ
Протокол №1 от 30.08.2019 г.
Зав. кафедрой В.А.Кечин

Владимир 2019

Методические указания к выполнению лабораторных, практических и самостоятельных работ по дисциплине **«Физическое материаловедение»** для студентов очного и заочного обучения направления **22.03.01 – «Материаловедение и технологии материалов»** (бакалавриат), составитель Н.А. ЕЛГАЕВ, Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 2016г. – 40с. рассмотрены и утверждены на заседании кафедры ТФ и КМ «30» августа 2019 г. (протокол № 1) и одобрены для использования в учебном процессе.

Методические указания составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Физическое материаловедение» и рассчитаны на бакалавров, обучающихся по направлению 22.03.01 – «Материаловедение и технологии материалов». Служат руководством к проведению практических работ и направлены на формирование основных профессиональных компетенций, отвечающих требованиям ФГОС ВО по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» к результатам освоения ОПОП ВО.

Табл. 1. Ил.21

© Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.

Общие положения.

Работа №1. Атомы в кристаллической решетке. Топология и определение поверхности Ферми.

Работа №2. Роль размеров атомов при образовании твердых растворов.

Работа №3. Построение диаграмм состояния.

Работа №4. Разрушение материала при усталости.

Работа №5. Зависимость механических свойств материалов от микроструктур.

Работа №6. Влияние примесей на механические свойства.

Работа №7. Зависимость свойств металлов от температуры.

Работа №8 Исследование магнитных свойств.

Литература

ПРЕДИСЛОВИЕ

На современном этапе развития литейно-металлургического комплекса предъявляются постоянно возрастающие требования к уровню профессиональной подготовленности специалистов, работающих в этой сфере. Это связано с интенсификацией и усложнением технологических процессов металлургического производства, что обусловлено ростом требований к качеству производимой продукции.

Для понимания и анализа литейных и металлургических процессов необходимо знание научных основ выбора материала с учетом его состава, структуры, термической обработки и достигаемых при этом эксплуатационных и технологических свойств, необходимых для машиностроения; современных способов производства важнейших металлов, строения и свойств конструкционных материалов, технологических методов формообразования и формоизменения заготовок и деталей.

При составлении пособия внимание было уделено прикладным задачам, представляющим интерес при анализе литейных и металлургических процессов. Пособие включает восемь работ, затрагивающих вопросы научного выбора материала деталей машин, отвечающего эксплуатационным, технологическим и экономическим показателям. При подготовке настоящих методических указаний использован опыт преподавания профильных дисциплин на кафедре «Технологии функциональных и конструкционных материалов» ВлГУ.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Настоящее пособие подготовлено в рамках программы дисциплины «Физическое материаловедение», составленной с учетом требований ФГОС ВО по направлению подготовки 22.03.01 – «Материаловедение и технологии материалов». Учебная дисциплина «Физическое материаловедение» входит в состав профессионального цикла образовательной программы подготовки бакалавров по направлению 22.03.01 – «Материаловедение и технологии материалов» и занимает одно из ведущих мест. Главной целью освоения дисциплины является получение обучающимися знаний о физической сущности явлений, происходящих в материалах при воздействии на них различных факторов в условиях производства и эксплуатации, влияние их на свойства материалов; о корреляционной связи между составом, структурой и свойствами материалов для достижения эксплуатационных и технологических свойств, необходимых для машиностроения; ознакомление студентов с современными и перспективными металлическими и неметаллическими материалами, их свойствами и областью применения.

Общая трудоемкость освоения дисциплины «Физическое материаловедение» составляет 5 зачетных единиц (180 академических часов), из них 1 зачетная единица (36 часов) отводится на практические занятия. Целью практических занятий является закрепление теоретических представлений о свойствах металлов и сплавов, методах их обработки, а также формирование соответствующих общекультурных и профессиональных компетенций. Итоговым результатом изучения дисциплины является формирование общекультурных и профессиональных компетенций, отвечающих требованиям стандарта к результатам освоения основной образовательной программы высшего профессионального образования по направлению 22.03.01 – «Материаловедение и технологии материалов»:

ПК-6 – Способность использовать на практике современные представления и влияния микро- и нано-структуры на свойства материалов, их взаимодействие с окружающей средой, полями, частицами и излучениями.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

Знать: физическую сущность явлений, происходящих в материалах в условиях эксплуатации; их взаимосвязь со свойствами; основные свойства современных

металлических и неметаллических материалов; основные закономерности изменения структуры и свойств металлов и сплавов при различных операциях термической обработки и связь ее с другими видами обработки; основные направления и пути повышения качества и экономии черных и цветных металлов, уменьшения металлоемкости изделий (ПК- 6).

Уметь: оценить поведение материала и причины отказов деталей машин при воздействии на них различных эксплуатационных факторов; в результате анализа условий эксплуатации технически обоснованно выбрать материал, назначать термическую обработку материала в целях получения заданной структуры и свойств, обеспечивающих высокую надежность и долговечность деталей машин; анализировать условия работы конкретных деталей и изделий; выбирать металлические материалы для деталей машин и механизмов; проводить сравнительную оценку металлических материалов по их эксплуатационным и технологическим свойствам и металлургическому качеству; использовать основные положения общего и производственного менеджмента в профессиональной деятельности, владеть навыками анализа технологических процессов как объекта управления, проведения стоимостной оценки производственных ресурсов и подготовки информации по их использованию (ПК- 6).

Владеть: основами методов исследования и диагностики материалов; навыками использования методов моделирования, оценки, прогнозирования и оптимизации технологических процессов и свойств материалов, стандартизации и сертификации материалов и процессов; основами проектирования технологических процессов и технологической документацией, навыками расчета и конструирования изделий машиностроения; навыками использования традиционных и новых технологических процессов, операций, оборудования, нормативных и методических материалов по технологической подготовке производства, качеству изделий и процессов (ПК-6).

Результаты выполненных практических работ оформляются в виде отчетов каждым студентом индивидуально. Рекомендации по содержанию отчета приведены в каждой работе. В общем случае отчет должен содержать цель работы, теоретическую часть, задание, расчетную часть, полученные результаты и выводы по работе. Теоретическая часть включает общее описание материала по рассматриваемой теме, подробное описание методик и алгоритмов, применяемых для решения поставленной в работе задачи. Расчетная часть содержит ход выполнения работы, перечень полученных результатов с необходимыми комментариями и промежуточными выводами, а также таблицы, графики, рисунки и т.д. На основе результатов, полученных в расчетной части, делаются общие выводы по работе. В конце методических указаний приведен перечень пособий и монографий, изучение которых позволит более глубоко усвоить материал.

Практическая работа N 1

Атомы в кристаллической решетке. Топология и определение поверхности Ферми.

Цель работы: ознакомиться с типами кристаллических решеток металлов и сплавов, дефектами кристаллического строения; методами определения поверхности Ферми.

Задания:

1. Подсчитайте координационное число для ОЦК и ГЦК и ГПУ решеток.
2. Определите число атомов, приходящееся на элементарную ГЦК-, ОЦК- и ГПУ ячейки.
3. Определите и схематично изобразите, как направлены вектор скорости и вектор Бюргерса по отношению к линии краевой и винтовой дислокации.
4. Ответить на контрольные вопросы.
5. Составить отчет.

Общие положения

Все металлы и металлические сплавы – тела кристаллические, атомы (ионы) расположены в металле закономерно в отличие от аморфных тел, в которых атомы расположены хаотично.

Металлическое состояние возникает в комплексе атомов, когда при их сближении внешние электроны теряют связь с отдельными атомами, становятся общими, т.е. коллективизируются и свободно перемещаются между положительно заряженными и периодически расположенными ионами. Устойчивость металла определяется электрическим притяжением между положительно заряженными ионами и обобщенными электронами (такое взаимодействие получило название металлической связи). Сила связи в металлах определяется силами отталкивания и силами притяжения между ионами и электронами. Атомы (ионы) располагаются на таком расстоянии друг от друга, чтобы энергия взаимодействия была минимальной (рис. 1)



Рис. 1. Энергетические условия взаимодействия атомов в кристаллической решетке вещества

Величина (a) соответствует расстоянию между атомами в кристаллической решетке, $a(a_0)$ соответствует равновесному расстоянию между атомами. В связи с этим в металле атомы располагаются закономерно, образуя правильную кристаллическую решетку, что соответствует минимальной энергии взаимодействия атомов.

Под атомно-кристаллической структурой понимают взаимное расположение атомов, существующее в кристалле. Атомы в кристалле расположены в определенном порядке, который периодически повторяется в трех измерениях. Для описания атомно-кристаллической структуры пользуются понятием пространственной или кристаллической решетки. Кристаллическая решетка представляет собой воображаемую пространственную сетку, в узле которой располагаются атомы (ионы), образующие металл.

Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла во всем объеме, получил название элементарной кристаллической ячейки (решетки).

Для характеристики элементарной ячейки задают шесть величин: три ребра ячейки a, b, c и три угла между ними α, β, γ . Эти величины называют параметрами кристаллической решетки.

Кристаллические решетки бывают простыми (атомы только в вершинах решетки) и сложными.

Металлы образуют одну из следующих высокосимметричных сложных решеток с плотной упаковкой атомов: кубическую объемноцентрированную (ОЦК), кубическую гранецентрированную (ГЦК) и гексагональную (ГПУ) (рис. 2).

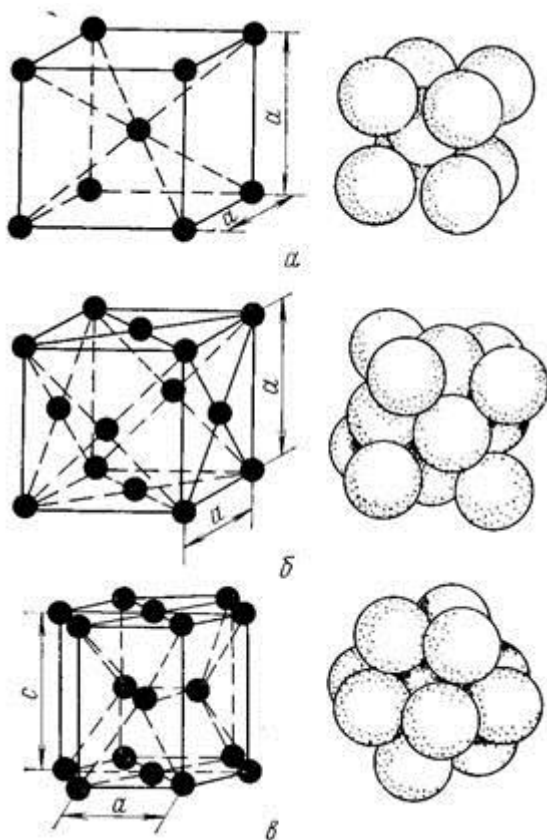


Рис. 2. Кристаллические решетки металлов и схемы упаковки атомов

Расстояние между ближайшими параллельными атомными плоскостями, образующими элементарную ячейку, называют периодом решетки, измеряется в нанометрах ($1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ см} = \text{Å} = 10^{-8}\text{ см}$). Периоды решетки металлов находятся в пределах $0,2 - 0,7\text{ нм}$.

Для ОЦК: a, b, c ; $a = b = c$: Для ГЦК: a, b, c ; $a = b = c$: Для ГПУ: a, c ; $c/a = 1,633$ (к Zn не относится)

Число атомов в каждой элементарной ячейке (плотность упаковки – равняется числу атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку):

$$\text{ОЦК: ПУ (плотнупакованная)} = 8 \cdot \frac{1}{8} + 1 = 2 ;$$

$$\text{ГЦК: ПУ} = 8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} = 4 ;$$

$$\text{ГПУ: ПУ} = 3 + 12 \cdot \frac{1}{6} + 2 \cdot \frac{1}{2} = 6 .$$

Координационное число – под ним понимают число атомов, находящихся на равном и наименьшем расстоянии от данного атома. Чем выше координационное число, тем больше плотность упаковки атомов.

Для характеристики величины атома служит атомный радиус, под которым понимается половина расстояния между ближайшими соседними атомами. Атомный радиус возрастает при уменьшении координационного числа.

Поверхность Ферми не является реальной поверхностью, а лишь наглядной иллюстрацией поведения электронов в металлах. Картины поверхностей Ферми объясняют такие свойства металлов, как блеск, ковкость, электропроводимость и теплопроводность. Собственно металл можно определить как твердое тело, обладающее поверхностью Ферми. Физически поверхность Ферми определяется как поверхность постоянной энергии электронов ϵ_F в импульсном k -пространстве.

Электроны последовательно заполняют состояния со все более высокой скоростью движения. Для описания этого явления оказалось удобным вести рассмотрение не в привычном физическом пространстве координат, а в пространстве скоростей. Координатами этого пространства являются проекции скорости на направления координатных осей. Точка в этом пространстве определяет величину и направление скорости. Граничная скорость называется *скоростью Ферми* – это граница занятых состояний. При абсолютном нуле температуры эта граница очень резкая. Электроны занимают самые нижние уровни энергии. В пространстве скоростей появляется поверхность (в простейшей модели это сфера) Ферми, определяющая границу занятых и незанятых состояний в электронном газе или *энергию Ферми*. Электроны низших состояний не могут изменить свою скорость, так как состояния, лежащие над ними, уже заняты. Подняться на незанятые состояния под воздействием нагрева могут только электроны на поверхности Ферми, количество которых существенно меньше, чем общее число электронов. В этом их отличие от идеального газа, где при нагреве дополнительная энергия поглощается сразу всеми молекулами. Известно, что топология поверхности Ферми (ПФ) является важным фактором в формировании физических свойств металлов и сплавов. При этом легирование и давление существенным образом меняют топологию ПФ, приводя к различного рода особенностям электронной структуры, например

электронным топологическим переходам (ЭТП), что в свою очередь отражается в поведении физических свойств металлов.

Каждый металл характеризуется своей ПФ, причём формы поверхностей разнообразны (рис.3). Для «газа свободных электронов» ПФ- это сфера. Объём, ограниченный ПФ - Ω_F , приходящийся на 1 элементарную ячейку в пространстве квазиимпульсов, определяется концентрацией n электронов проводимости в металле: $2\Omega_F/(2\pi\hbar)^3 = n$. Средние размеры ПФ для хороших металлов \hbar/a , где \hbar - планка постоянная, a - постоянная решётки, обычно $n \approx 1/a^3$.

У большинства металлов, кроме большой ПФ, обнаружены малые полости, объём которых значительно меньше, чем $(2\pi\hbar)^3/n/2$. Эти полости определяют многие квантовые свойства металлов в магнитном поле. У полуметаллов объём ПФ мал по сравнению с размерами элементарной ячейки в пространстве квазиимпульсов. Если занятые электронами состояния находятся внутри ПФ, то она называется электронной, если же внутри ПФ электронные состояния свободны, то такая поверхность называется дырочной. Возможно одновременное существование обеих ПФ. Например, у Bi ПФ состоит из 3 электронных и 1 дырочного эллипсоидов. Встречаются ПФ сложной топологии (с самопересечениями), которые одновременно являются и электронными, и дырочными. Если ПФ непрерывно проходит через всё пространство квазиимпульсов, она называется открытой. Если ПФ распадается на полости, каждая из которых помещается в одной элементарной ячейке пространства квазиимпульсов, она называется замкнутой, например у Li, Au, Si, Ag – открытые ПФ, у $K, Na, Rb, Cs, In, Bi, Sb, Al$ – замкнутые. Иногда ПФ состоит из открытых и замкнутых полостей. Геометрические характеристики ПФ (форма, кривизна, площади сечений и т.п.) связаны с физическими свойствами металлов.

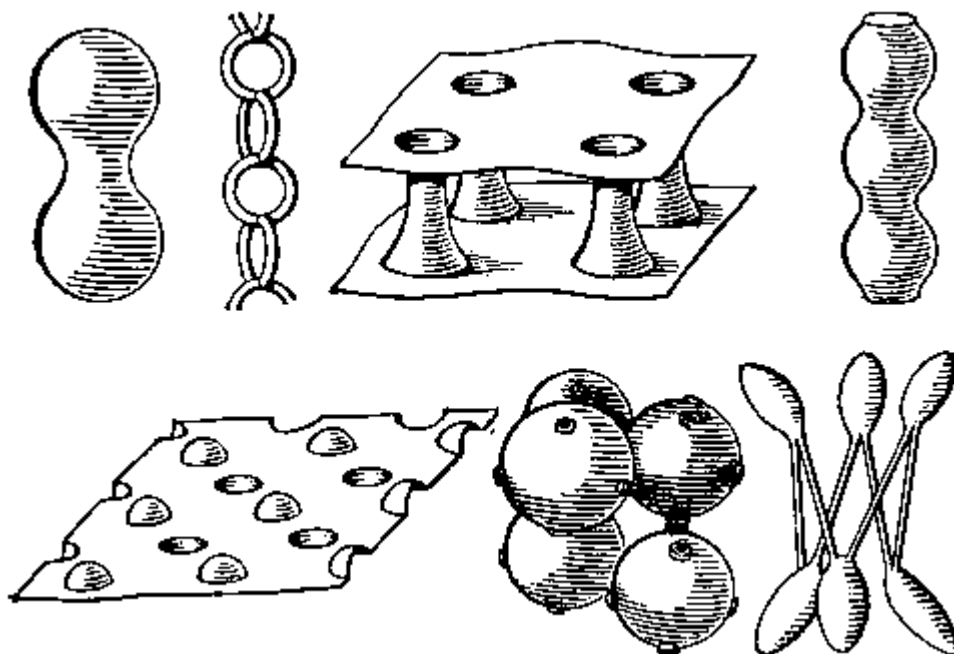


Рис. 3 Различный типы ферми поверхностей.

Изменение топологии может происходить в основном двумя способами: либо в некоторой точке k -пространства при $E = E_{кр}$ - появляется (исчезает) новая полость изоэнергетической поверхности, либо поверхность меняет свою связность: например, открытая поверхность распадается на ряд замкнутых (разрыв перемычек), тороидальная распадается на систему эллипсоидов.

Для того, чтобы «увидеть» поверхность Ферми металла нужно применять специальные методы. Некоторые особенности ферми-поверхности могут быть определены по наблюдению различных эффектов в магнитном поле, с помощью метода фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES).. Кроме того, с развитием численных

методов повышается надёжность и непосредственного расчёта ферми-поверхностей в различных металлах. Ферми поверхность может представлять собой сферомд, эллипсоид, односвязанную или многосвязанную поверхность. *Физические свойства* материалов в значительной степени зависят от топологии поверхности Ферми. Топология ПФ для меди, серебра и золота приблизительно одинаковая и представляет собой гофрированный сфероид **См. рис. 4**

На рис. 4а показан сфероид меди; на рис. 4б изображено соединение двух сфероидов в плоскости гексагональной грани, а на рис. 4в дана общая картина соединения нескольких ферми-сфероидов.

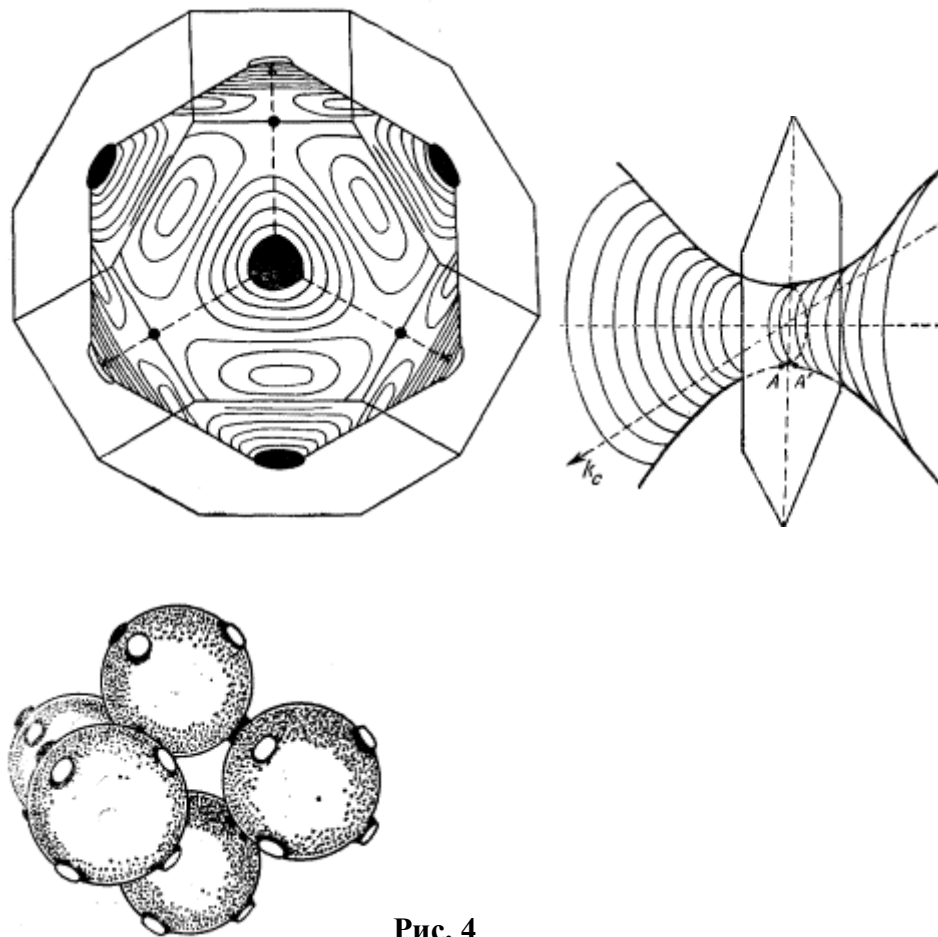


Рис. 4

На **рис. 5** показана многосвязанная ферми-поверхность дырочного типа для кальция (а), магния (б) и цинка (в)

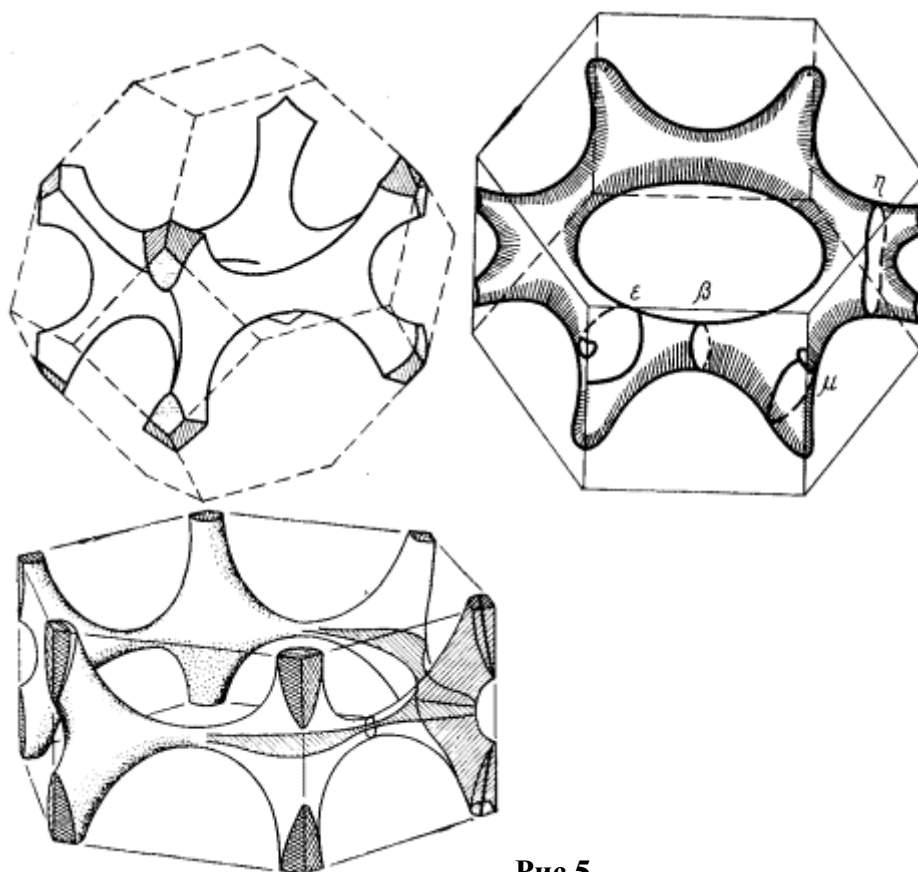
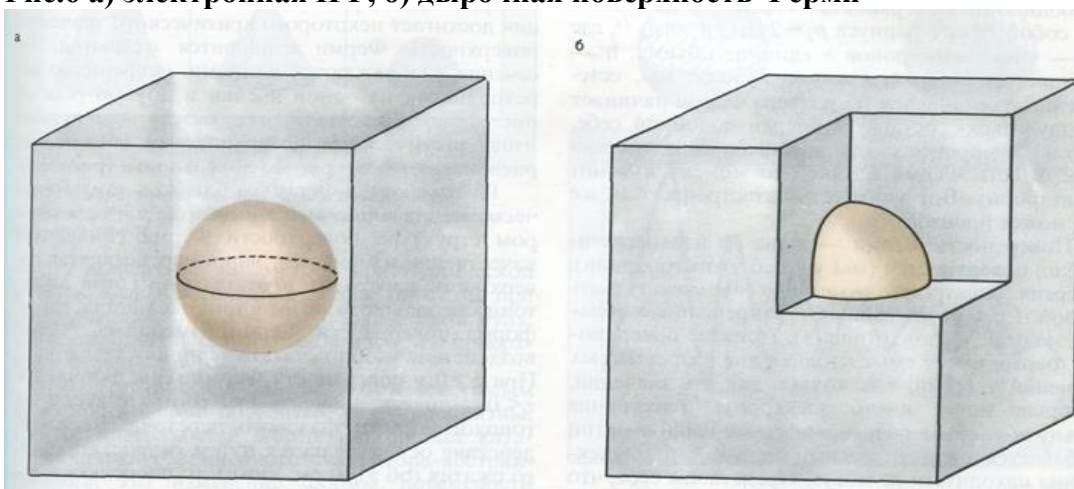


Рис.5

Рис.6 а) электронная ПФ, б) дырочная поверхность Ферми



Контрольные вопросы

1. Регулярное строение идеальных кристаллов.
2. Понятие о пространственной кристаллической решетке и элементарной ячейке.
3. Основные типы межатомной связи.
4. Типы межатомных связей (ионная, ковалентная, металлическая, молекулярная).
5. Основные типы кристаллических решеток металлов (ОЦК, ГЦК, ГПУ).
7. Анизотропия свойств.
8. Квазиизотропия в поликристаллическом материале.
9. Что такое поверхность Ферми?
10. Примеры поверхностей Ферми.

11. Методы определения поверхности Ферми.

Практическая работа N 2 Роль размеров атомов при образовании твердых растворов

Цель работы: ознакомление с процессом образования твердых растворов, типами твердых растворов и методами исследования твердых растворов.

Задания:

1. Рассчитать плотность твёрдого раствора YF_3 в CaF_2 в зависимости от состава: а) по модели катионных вакансий; б) по модели межузельных ионов F^- . Параметр a кубической элементарной ячейки CaF_2 равен 5.4626 \AA , число формульных единиц Z равно 4. Принять, что объём элементарной ячейки не зависит от состава твёрдого раствора.
2. Привести наиболее вероятные формулы для следующих ограниченных твёрдых растворов: а) $MnCl_2$ в KCl ; б) Y_2O_3 в ZrO_2 .
3. Объяснить: правило Гиббса и правило Вегарда

Твердыми растворами называют фазы, в которых один из компонентов сплава сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы других (или другого) компонентов располагаются в решетке первого компонента (растворителя), изменяя ее размеры (периоды). Таким образом, твердый раствор, состоящий из двух или нескольких компонентов, имеет один тип решетки и представляет собой одну фазу.

Существуют твердые растворы внедрения и твердые растворы замещения. При образовании твердых растворов внедрения атомы растворенного компонента В размещаются между атомами растворителя А в его кристаллической решетке. При образовании твердых растворов замещения атомы растворенного компонента В замещают часть атомов растворителя (компонент А) в его кристаллической решетке

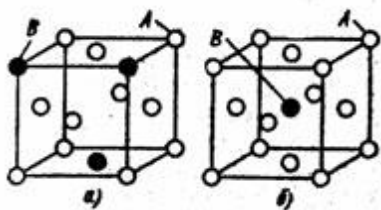


Рис.1 – Твердые растворы: а – замещения, б – внедрения

Твердые растворы внедрения образуют элементы внедрения с малыми атомными размерами. Твердые растворы внедрения всегда ограничены, а растворимость в них зависит от кристаллической структуры металла-растворителя и размеров атома элемента внедрения. Ограниченность твердых растворов внедрения определяется тем, что они сохраняют решетку металла-растворителя, а атомы внедрения в них занимают лишь вакантные междоузлия - октаэдрические и тетраэдрические поры в решетке металла-растворителя. Часть пор всегда не заполнена. Схема расположения пор в α -и γ -железе приведена на рис. 2.

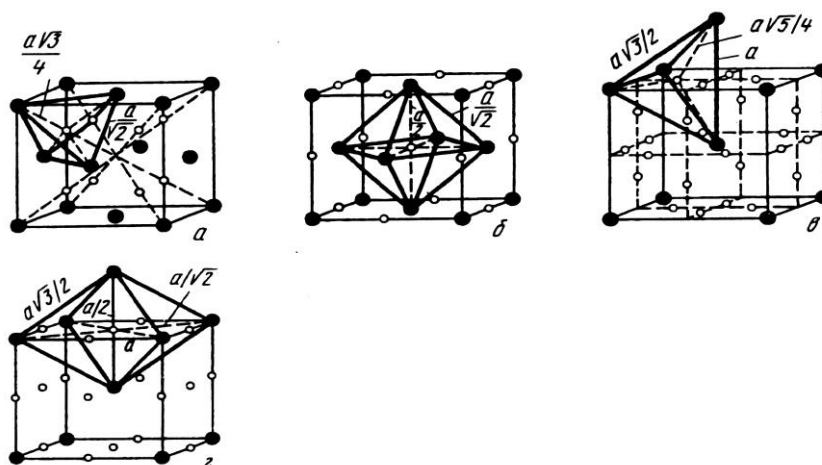


Рис.2 – Положение октаэдрических (б, г) и тетраэдрических пор в г.ц.к. (а, б) и о.ц.к. (а, г) решетках

Наиболее благоприятными позициями расположения атомов внедрения в твердом растворе будут октаэдрические поры в α -железе и окта- и тетраэдрические поры в γ -железе.

Междоузлие обязательно должно быть меньше, чем размер атома внедрения, так как в противном случае прочной связи между атомами металла-растворителя и атомами внедрения не будет. Однако размер поры не должен быть и слишком малым, так как внедрение атома вызовет ослабление связей между атомами решетки растворителя, и структура такого твердого раствора будет неустойчивой. Какая из пор является наиболее благоприятной для размещения в ней атома внедрения, будет определяться не только ее размерами, но и количеством соседних атомов, претерпевших деформацию при образовании твердого раствора внедрения. Так, в α -железе растворение углерода и азота происходит в октаэдрических порах, меньших по размеру, чем тетраэдрические, так как в первом случае смещаются два атома вдоль ребра куба в направлении с малой плотностью упаковки, а во втором - четыре атома в направлении плотной упаковки. Таким образом, энергия деформации о.ц.к. решетки от внедрения атомов углерода или азота в окта-пору будет меньше, чем при внедрении их в тетра-пору.

Растворимость атомов внедрения увеличивается с уменьшением размера атомов, т.е. возрастает в ряду В-С-N-O-H. Из перечисленных атомов внедрения наибольшее значение при рассмотрении легированных сталей имеют углерод и азот. Данные по их растворимости в α -железе приведены на рис.3. Как видно, азот, имеющий меньший атомный радиус (0,071 нм), чем углерод (0,077 нм), растворяется в α -железе в значительно большем количестве. В γ -железе максимальная растворимость азота также больше, чем углерода (2,8 и 2,0 % соответственно). Значительно большая растворимость углерода и азота в γ -железе по сравнению с α -железом связана с тем, что в г.ц.к. решетке размер пор больше, а их число меньше, чем в о.ц.к. решетке, т.е. для α -железа характерна большая рыхлость упаковки.

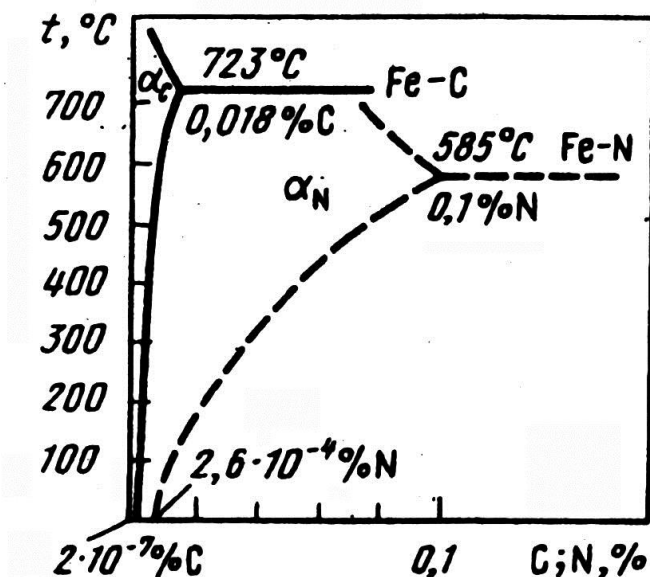


Рис. 3 – Температурная зависимость растворимости углерода (сплошные линии) и азота (штриховые линии) в α -железа

Необходимо также отметить, что значительная деформация решетки при внедрении атомов неметалла в пору решетки металла-растворителя приводит к тому, что значительное число пор не заполняется атомами внедрения. Так, при предельном насыщении углеродом γ -железа (до 2 % C) один атом углерода приходится на каждые три элементарных ячейки γ -железа [8 % (ат.) C], а для α -железа (0,018 % C) один атом углерода на 600 элементарных ячеек [0,083 % (ат.) C]. Столь значительное различие растворимости углерода в двух модификациях железа обуславливает возможность различной термической обработки сталей. а основании роли размерного фактора для твердых растворов внедрения ($r_x / r_{Me} < 0,59$) и замещения ($r_x / r_{Me} = 0,85-1,15$) следует сказать, что отношение атомных размеров в пределах 0,59-0,85 является неблагоприятным для образования твердых растворов.

Если при образовании твердого раствора замещения параметр решетки растворителя уменьшается или увеличивается в зависимости от размеров атомов растворенного компонента, то в твердых растворах внедрения параметр элементарной ячейки всегда **увеличивается**. Твердые растворы внедрения образуются тогда, когда *отношение диаметра атома внедряющегося компонента к диаметру атома растворителя меньше 0,59*. При отношении диаметров больше **0,59** твердые растворы внедрения или не образуются, или, образуясь, не подчиняются никаким определенным правилам. Для образования твердых растворов внедрения необходимо иметь отношение диаметров меньше 0,59, а для образования твердых растворов замещения это отношение должно быть от 0,85 до 1,0, то область от 0,59 до 0,85 является неблагоприятной для образования твердых растворов.

Поскольку размеры растворенных атомов отличаются от размеров атомов растворителя, то образование твердого раствора сопровождается искажением кристаллической решетки растворителя.

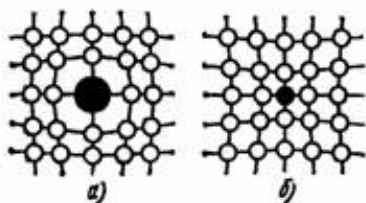


Рис. 4 – Искажения кристаллической решетки в твердых растворах замещения:

а – атом растворенного компонента больше атома растворителя
б – атом растворенного компонента меньше атома растворителя

Твердые растворы замещения. В случае если атомы или ионы одного вещества, внедряясь в решетку другого вещества, замещают его собственные атомы или ионы в узлах решетки, возникают твердые растворы замещения.

Твердыми растворами замещения называются такие растворы, которые образуются в результате статистического замещения атомов или ионов в структуре какого-либо кристаллического вещества (растворители или матрицы) атомами или ионами другого (растворенного) вещества, занимающими в результате этого регулярные узлы кристаллической решетки.

Твердые растворы замещения (рис. 10, а) часто называют также смешанными кристаллами и изоморфными смесями, а процесс образования твердых растворов замещения называют изоморфным замещением.

При образовании твердых растворов замещения в принципе замещать друг друга могут как катионы, так и анионы.

Некоторые вещества могут образовывать твердые растворы весьма легко, к примеру при их совместной кристаллизации из растворов. При этом чаще всего, к примеру в силикатных системах, для образования твердых растворов требуется значительная энергия активации, в связи с этим их возникновение связано с различными термическими процессами (нагреванием до высокой температуры, плавлением с последующей кристаллизацией, гидротермальными процессами).

Количество посторонних атомов или ионов, внедряющихся в структуру основного вещества, должна быть различным. Некоторые вещества могут смешиваться между собой в широких пределах, вплоть до полного замещения собственных атомов на атомы другого вещества. В этом случае говорят о непрерывном ряде твердых растворов, полной смешиваемости или совершенном изоморфизме. К таким веществам, к примеру, относятся $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ и $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, образующие непрерывные твердые растворы - оливины. Причем в структуре $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ катионы железа бывают полностью замещены на катионы магния и, напротив - в структуре $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ катионы магния на катионы железа (замещения типа $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$). При этом гораздо чаще замещения количественно могут происходить только в определенных пределах, вне которого твердые растворы уже не образуются. В этом случае говорят об ограниченном ряде твердых растворов, ограниченной смешиваемости или несовершенном изоморфизме (при очень малой растворимости образование твердых растворов называют эндокрипцией — маскировкой).

Твердые растворы замещения могут быть с ограниченной и неограниченной растворимостью. В твердых растворах с ограниченной растворимостью концентрация растворенного компонента возможна до определенных пределов. В твердых растворах с неограниченной растворимостью возможна любая концентрация растворенного компонента (от 0 до 100 %). Твердые растворы с неограниченной растворимостью образуются при соблюдении следующих условий: 1) у компонентов должны быть однотипные кристаллические решетки; 2) различие в атомных радиусах компонентов не должно превышать для сплавов на основе железа 9%, а для сплавов на основе меди 15%; 3) компоненты должны обладать близостью физико-химических свойств. Однако соблюдение этих свойств не всегда приводит к образованию твердых растворов замещения с неограниченной растворимостью. На практике, как правило, образуются твердые растворы с ограниченной растворимостью. Твердые растворы внедрения могут быть только с ограниченной концентрацией, поскольку число пор в решетке ограничено, а атомы основного компонента сохраняются в узлах решетки.

Твердые растворы замещения с неограниченной растворимостью на основе компонентов: Ag и Au, Ni и Cu, Mo и W, V и Ti, и т.д.

Твердые растворы замещения с ограниченной растворимостью на основе компонентов: Al и Cu, Cu и Zn, и т.д.

Твердые растворы внедрения: при растворении в металлах неметаллических элементов, как углерод, бор, азот и кислород. Например: Fe и C.

Твердые растворы вычитания, или растворы с «дефектной» решеткой, образуются только на базе химических соединений. В таких твердых растворах избыточные (против состава соединения) атомы одного из компонентов занимают нормальные положения в кристаллической решетке, тогда как места, которые должны были бы быть заняты другим компонентом, оказываются частично свободными. Так, в твердом растворе кислорода в закиси железа FeO (вюстит) узлы решетки, принадлежащие ионам кислорода, заняты полностью, в то время как часть узлов, которые должны бы быть заполнены ионами железа, остаются пустыми.

Современная термодинамика трактует способность соединений образовывать твердые растворы с общих позиций минимума свободной энергии. Образование или отсутствие твердого раствора определяется конкуренцией двух основных факторов противоположной направленности: 1) затратами энергии на деформацию кристаллической структуры при нарушении ее идеальности в результате появления в регулярных позициях структуры атомов иного размера и/или иного заряда (степени окисления); 2) выигрыша энергии за счет роста конфигурационной энтропии при увеличении беспорядка в системе. Конфигурационная энтропия связана с числом вариантов случайного размещения некоторой определенной доли «своих» и «чужих» атомов в одних и тех же позициях кристаллической структуры. Чем больше число таких вариантов, тем больше значение конфигурационной энтропии S_k

Правило Вегарда – правило аддитивного изменения размеров элементарной ячейки или межатомного расстояния с изменением состава твердого раствора. $a = X_1a_1 + X_2a_2$, (1) где X_1 и X_2 – мольные доли, a_1 и a_2 – параметры ячейки чистых компонентов. Под символом a можно понимать любой параметр ячейки или любое среднее межатомное расстояние. Различия в параметрах ячейки у изоструктурных веществ связаны с различиями в величинах атомных (ионных) радиусов их компонентов. Поэтому увеличение или уменьшение параметра ячейки с изменением состава твердого раствора является следствием замены меньших атомов (ионов) одного компонента на большие атомы (ионы) другого или соответственно наоборот. Эта эмпирическая закономерность служит экспериментальным рентгено- графическим доказательством образования или отсутствия твердого раствора той или иной фазы в изучаемой системе, а также определения границ твердых растворов. Строго прямолинейная зависимость параметров ячейки от состава твердых растворов соблюдается в реальных системах весьма редко. В большинстве случаев экспериментальные измеренные величины параметров ячейки от состава твердых растворов значительно отклоняются от прямой вегардовской линии как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Эти отклонения можно выразить с помощью параболической поправки: $A = X_1a_1 + X_2a_2 + X_1X_2\delta$, где δ – некоторый параметр, который может иметь как знак плюс (для положительных отклонений), так и знак минус (для отрицательных отклонений). В более сложных случаях отклонения от правила Вегарда могут иметь знакопеременный характер. Такое поведение параметров ячейки обычно указывает на изменение положения изоморфной примеси в структуре. Если замещение атомов происходит в нескольких неэквивалентных позициях структуры, то отклонения от правила Вегарда часто могут быть объяснены предпочтительным заполнением одной или нескольких позиций.

Контрольные вопросы

1. Что такое твердые растворы?
2. Что называется растворителем (матрицей) в твердых растворах?
3. Перечислите виды твердых растворов

4. Что такое твердые растворы замещения?
5. Что такое твердые растворы внедрения?
6. Что такое твердые растворы вычитания?
7. Твердые растворы замещения с ограниченной и неограниченной растворимостью. Приведите примеры.
8. Перечислите условия для неограниченной растворимости.
9. Почему твердые растворы внедрения могут быть только с ограниченной концентрации?
10. Почему образование твердого раствора сопровождается искажением кристаллической решетки растворителя?
11. Сформулируйте правило Вегарда.

Практическая работа N 3 Построение диаграмм состояния

Цель работы: научиться определять фазы и структуры в сплавах при различных температурах, устанавливать связь между диаграммой состояния (структурой) и механическими, технологическими свойствами сплавов.

Задания

1. Вычертить предложенную преподавателем диаграмму состояния, оставив рядом место для построения кривых охлаждения.
 2. Определить образующиеся фазы и значение линий диаграмм состояния (ликвидус, солидус, линии полиморфных превращений, предельной растворимости избыточных фаз, эвтектического и перитектического превращения).
 3. Написать реакции фазовых превращений, происходящих при постоянных температурах.
 4. Определить структуры сплавов во всех областях диаграммы состояния.
- Для заданных сплавов построить кривые охлаждения и объяснить происходящие в них изменения. Для указанного сплава при данной температуре определить фазы, их химический состав и весовое количество.
5. Сравнить механические и технологические свойства сплавов с различной структурой.
 6. Ответить на контрольные вопросы.
 7. Составить отчет.

Общие положения

В промышленности широко применяются не чистые металлы, а их сплавы. Под сплавом понимается вещество, получаемое сплавлением двух или более элементов. Различают следующие типы сплавов: механические смеси, твердые растворы и химические соединения. Общие закономерности сосуществования устойчивых фаз, отвечающих теоретическим условиям равновесия, могут быть выражены в математической форме, называемой *правилом фаз*, или *законом Гиббса*. Правило фаз дает количественную зависимость между степенью свободы системы и количества фаз и компонентов:

$$C = K + П - \Phi$$

где C – число степеней свободы (вариантность), т. е. число внешних и внутренних факторов, которое может изменяться без изменения числа фаз в системе;

K – количество компонентов (веществ, образующих систему);

$П$ – число внешних и внутренних факторов (температура, давление и концентрация), воздействующих на систему;

Φ – число фаз; фаза – это однородная часть системы, отделенная от других частей системы поверхностью раздела, при переходе через которую свойства изменяются скачкообразно.

Так как в дальнейшем мы будем рассматривать влияние температуры (охлаждение или нагрев системы), то правило фаз можно записать следующим образом:

$$C = K + 1 - \Phi$$

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение состояния сплава. Она показывает, как изменяется структура сплавов и температура фазовых превращений при изменении состава.

Между составом и структурой сплава, определяемой диаграммой состояния и свойствами сплава, существует определенная зависимость. Сплавы эвтектического состава отличаются

средней прочностью и пластичностью, но исключительно хорошими линейными свойствами, так как имеют высокую жидкотекучесть и очень малую усадку (поскольку кристаллизуются при постоянной температуре).

Твердые растворы однородны, а потому имеют повышенную прочность и пластичность, ковкие, но имеют очень высокое электросопротивление и плохие литейные свойства. Химические соединения устойчивы, тверды, но чрезвычайно хрупки. Переход сплава в однофазное состояние повышает пластичность, распад твердого раствора – понижает ее. Коррозионная стойкость высока у чистых металлов, ниже – твердых растворов и наименьшая – у механических смесей.

Порядок выполнения работы

Для выполнения работы каждый студент получает диаграмму состояния, по которой выполняет все предложенные задания.

Пример построения кривой охлаждения представлен на рис. 1.

Содержание отчета

1. Название, цель работы, задание.
2. Диаграмма состояния (приложение 1).
3. Кривые охлаждения.
4. Ответ на контрольный вопрос.
5. Список использованной литературы.

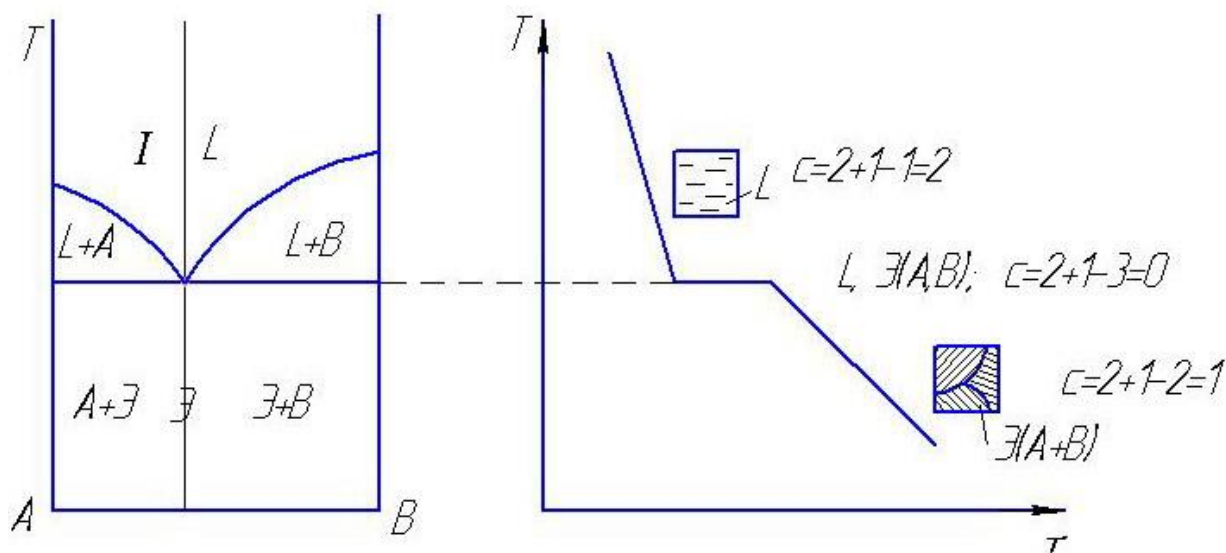


Рис.1. Диаграмма состояния и кривая охлаждения сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов

Контрольные вопросы

1. Правило фаз.
2. Твердые растворы замещения, внедрения, упорядоченные.
3. Химические соединения и промежуточные фазы.
4. Линии и структуры в диаграмме состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов.
5. Диаграмма состояния сплавов, кристаллизующихся с образованием механической смеси из чистых компонентов.
6. Диаграмма состояния с ограниченной растворимостью компонентов и с эвтектикой.
7. Диаграмма состояния с перитектическими превращениями.
8. Диаграмма состояния с устойчивым химическим соединением.
9. Диаграмма состояния с полиморфным превращением.
10. Что такое эвтектическое и эвтектоидное превращение?
11. Что такое перитектическое и перитектоидное превращение?
12. Правило отрезков.
13. Как определить химический состав (концентрацию) фаз, находящихся в равновесии в двухфазной области?

14. Диаграмма состояния с неустойчивым химическим соединением.

Практическая работа N 4 Разрушение материала при усталости

Цель работы – ознакомиться с процессом усталостного разрушения материалов

Задания:

1. Освоить методику усталостных испытаний при деформации.
2. Определить предел выносливости материала при напряжениях
3. Ознакомиться с конструкциями устройств для усталостных испытаний.

Общие положения.

Усталость - процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению. Накопление повреждений начинается задолго до окончательного разрушения, протекает незаметно. Разрушение, как правило, наступает внезапно. Усталость, согласно статистике, является причиной около 80 % разрушения изделий машиностроения.

Свойство противостоять усталости называется выносливостью. Число циклов до разрушения при заданных характеристиках нагружения называется долговечностью. Цикл напряжений – совокупность переменных значений напряжений за один период их изменения.

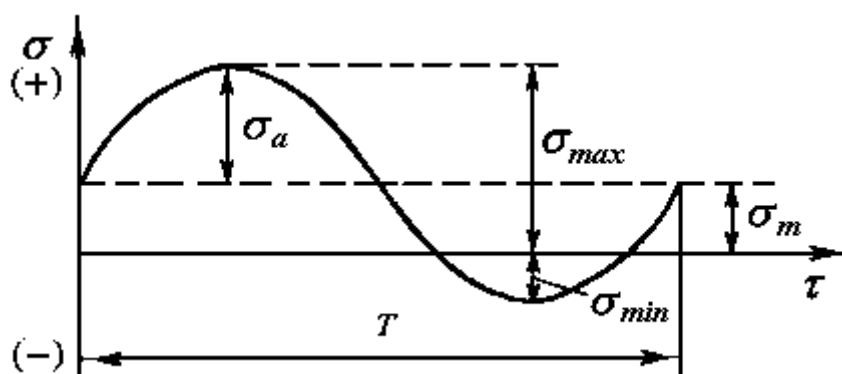


Рис. 1 Общий вид цикла нагружения

Каждый цикл характеризуется несколькими параметрами. Период T – это продолжительность одного цикла. Различают максимальное σ_{max} и минимальное σ_{min} напряжения. Максимальное напряжение цикла σ_{max} – это наибольшее по алгебраической величине напряжение цикла и оно равно алгебраической сумме среднего напряжения и амплитуды, а минимальное σ_{min} – их алгебраической разности. Соответственно среднее напряжение цикла рассчитывается как $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$. Амплитуда напряжения цикла определяется выражением $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$. Цикл характеризуется также коэффициентом асимметрии: $R = \sigma_{max} / \sigma_{min}$.

Наиболее распространенная схема нагружения при усталостных испытаниях – изгиб. Эта схема реализуется по-разному. Особенно проста и чаще всего применяется схема чистого изгиба образца при вращении. Нагрузка здесь прилагается в двух точках, что обеспечивает постоянство изгибающего момента на всей рабочей длине образца. Применяется также круговой изгиб консольно закрепленного образца, испытание в условиях циклического "растяжения – сжатия" и другие приемы. Первичным результатом усталостного испытания

одного образца является число циклов до разрушения (долговечность) при заданных характеристиках цикла. По результатам испытаний серии образцов могут быть определены различные характеристики выносливости. Главной из них является предел выносливости σ_g – наибольшее значение максимального напряжения цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца. Если испытания ведут при постоянном среднем напряжении цикла, σ_r определяется как наибольшее значение средней амплитуды напряжений цикла, при которых не происходит усталостного разрушения после неограниченного или заданного количества циклов. По результатам испытания отдельных образцов строят кривую усталости (кривая Велера).

Испытание на усталость проводится на специальной машине МУИ-6000, которая позволяет создавать деформацию чистого изгиба с максимальным моментом 50 Н·м. Схема нагружения образца представлена на рис.2. Постоянная нагрузка Q вызывает во вращающемся образце симметричный цикл напряжений, наиболее опасный для детали.

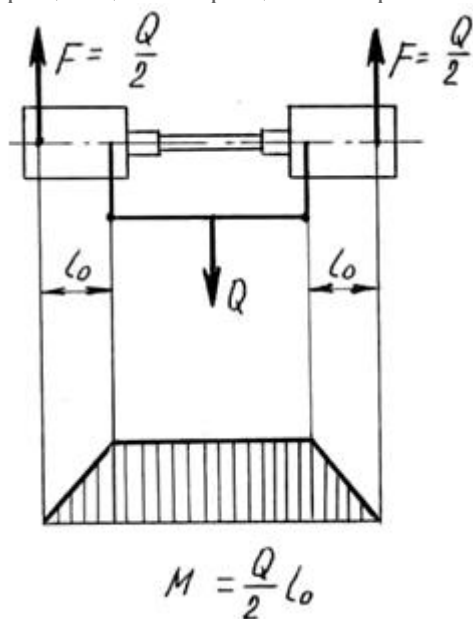


Рис.2. Схема нагружения образца при испытании на выносливость

При испытании на выносливость используются стандартные цилиндрические образцы по ГОСТ 25.502-79 диаметром 5-10 мм, при этом для получения достоверных результатов требуется испытать 6-12 одинаковых образцов.

Первый образец испытывают при наибольшем напряжении цикла для сталей $\sigma_{\max} = 0,6 \cdot \sigma_{\text{пч}}$, для сплавов и цветных металлов $\sigma_{\max} = 0,4 \cdot \sigma_{\text{пч}}$, фиксируя число циклов N , при котором образец был разрушен.

Для каждого последующего образца наибольшие напряжения уменьшают на 20 ... 40 МПа, при этом число циклов, необходимое для разрушения, увеличивается. В итоге находят так называемый предел выносливости – наибольшее напряжение, которое образец выдерживает без разрушения в течение заданного числа циклов, называемого базой испытаний (для сталей база испытаний равна $10 \cdot 10^6$ циклов, для цветных металлов – $100 \cdot 10^6$ циклов).

Диаграмма, представленная в координатах $\sigma_{\max}-N_{\text{ц}}$, называется кривой усталости (кривая Вёлера) и позволяет определить предел выносливости материала при симметричном цикле нагружения σ_{-1} (рис.3).

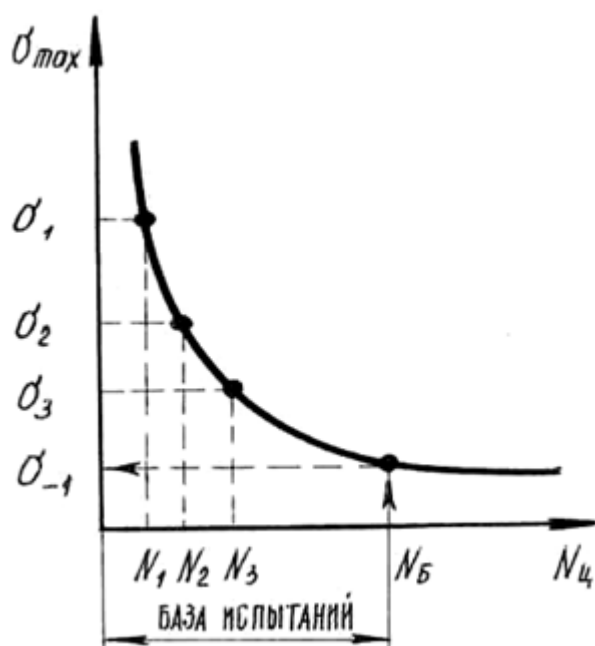


Рис.3. Кривая усталости (кривая Велера)

Испытания на выносливость – очень длительные испытания и при проведении учебной лабораторной работы не всегда удастся получить предел выносливости. Обычно ограничиваются определением разрушающего напряжения двух-трех образцов.

При тщательно проведенных испытаниях можно убедиться, что чем меньше σ_{max} , тем большее число циклов нагружения выдерживает образец. По мере уменьшения максимального напряжения цикла долговечность всех материалов возрастает.

По результатам этих испытаний для каждого образца определяют усталостную долговечность – число циклов нагружения, которое выдерживает материал перед разрушением при определенном напряжении. Усталостная долговечность – вторая по важности характеристика выносливости металлических материалов. По мере увеличения числа циклов при любых напряжениях выше предела выносливости в образце последовательно идут следующие основные процессы: 1) пластическая деформация; 2) зарождение трещин; 3) постепенное развитие некоторых из них и преимущественное распространение одной, главной трещины; 4) быстрое окончательное разрушение. Характеристики выносливости, как и всякие механические свойства, зависят от условий проведения испытания, состава и структуры материала. Чем больше среднее напряжение цикла, тем меньшая амплитуда напряжений требуется для разрушения материала при одной базе испытания. Существенно на характеристики выносливости влияет соотношение растягивающих и сжимающих напряжений. Чем больше растягивающие напряжения, тем ниже выносливость. Наоборот, увеличение средних сжимающих напряжений при неизменном растягивающем смещает кривую усталости в сторону больших напряжений. Эти эффекты объясняют противоположным действием растягивающих и сжимающих напряжений на раскрытие трещины. Дополнительное сжатие тормозит этот процесс, а растяжение ускоряет. Повышение частоты циклов при прочих равных условиях обычно вызывает некоторое увеличение характеристик выносливости, особенно при повышенных температурах. Характеристики цикла напряжений (Σm , R , частота нагружения) существенно сказываются на скорости развития усталостной трещины, особенно сильно влияет коэффициент асимметрии цикла. Для получения высокого предела выносливости структура поверхностного слоя должна обладать максимально возможным сопротивлением деформации. Это достигается химико-термической обработкой, поверхностным наклепом и т. д. Все эти обработки способствуют не только упрочнению поверхности, но и созданию там дополнительных сжимающих напряжений, которые тормозят развитие усталостных

трещин. На усталостные свойства сильно влияет внешняя среда, контактирующая с поверхностью. Установлено, что на воздухе усталостные трещины развиваются быстрее, чем в вакууме. Усталостные трещины часто возникают на поверхности у различных концентраторов напряжений. Поэтому большое внимание уделяют качеству поверхности. Полировка поверхности, особенно электролитическая, приводит к существенному повышению предела выносливости. Влияние масштабного фактора также частично связывают с качеством поверхности. При увеличении размеров образца (детали) растет вероятность наличия на его поверхности опасного концентратора напряжения, который вызовет преждевременное усталостное разрушение. Изменение температуры качественно не сказывается на характере кривых усталости. По мере ее повышения наблюдается смещение кривых в сторону более низких напряжений. Если при каких-то температурах испытания сплавов происходят фазовые или структурные изменения, то это приводит к немоноотному изменению характеристик выносливости. Частота нагружения влияет на результаты усталостных испытаний при таких высоких температурах, когда заметное развитие получают процессы ползучести (особенно в тех случаях, когда среднее напряжение цикла не равно нулю). В этих условиях большое значение имеет общее время воздействия напряжения на металл, которое при данном числе циклов до разрушения уменьшается с увеличением частоты. Повышение частоты приводит к увеличению предела выносливости и в области больших амплитуд пластической деформации даже при невысоких температурах (малоцикловая усталость). В остальных случаях изменение частоты нагружения в обычных пределах ($10^2 - 10^4$ циклов /мин) не оказывает заметного влияния на усталостную прочность металлов. В реальных условиях высокотемпературной службы материалов усталостные процессы и ползучесть протекают параллельно. Большое значение имеет усталость в условиях циклического изменения температуры, например в материалах камеры сгорания двигателей, поверхности прокатных валков, котлов, тормозных элементов колес и т. д. Если температура изменяется при постоянном напряжении, то мы имеем дело с так называемой термической усталостью. Способность материала сопротивляться разрушению в условиях проявления термической усталости называют термостойкостью.

Для повышения выносливости необходимо: - улучшать качество поверхностных слоев деталей (по шероховатости и свойствам); - предотвращать появление трещин и зон локализованной деформации, в которых облегчено их зарождение; - уменьшать количество крупных (более микрометра) включений избыточных фаз; - увеличивать напряжение начала пластической деформации в условиях циклического нагружения; - повышать однородность пластической деформации в объеме материала.

Порядок выполнения работы.

Подсчет напряжений, вызвавших разрушение образца, производится по формуле

$$\sigma_{i \max} = M_i / W_x$$

где $M_i = Q_i l_0 / 2$ – изгибающий момент на среднем участке образца;

$W_x = \pi d^3 / 32$ – момент сопротивления среднего участка образца.

Для стали ожидаемое значение предела усталости подсчитывается во одной из следующих зависимостей:

$$\sigma_{-1} = 0,27 \cdot \sigma_{\text{пч}} + 1850 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2;$$

$$\sigma_{-1} = 0,24 \cdot \sigma_T + 2750 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2.$$

Порядок проведения испытания следующий:

- измеряются размеры образца и подсчитывается первичная нагрузка Q ;
- образец закрепляется в шпиндельных головках испытательной машины, устанавливается индикатор, сбрасывается показание счетчика образцов и запускается двигатель;
- после поломки образца определяется по счетчику образцов число циклов до разрушения;
- принимается очередная ступень нагрузки и испытание повторяется.

Контрольные вопросы

1. Какие факторы обуславливают разрушение деталей при относительно небольших переменных напряжениях?

2. Как строится и для чего кривая усталости для симметричного цикла?
3. Дайте определение предела выносливости.
4. Что является первичным результатом усталостного испытания одного образца?
5. Что называют усталостью? Что называют выносливостью?
6. Почему уменьшение коэффициента термического расширения и увеличение теплопроводности должны повышать термостойкость?
7. Что понимают под пределом выносливости?
8. Влияние температуры испытания на характеристики выносливости.
9. Связь выносливости с другими механическими свойствами.
10. Что понимают под термостойкостью?

Практическая работа N 5

Зависимость механических свойств материалов от микроструктур

Цель работы: ознакомиться с микроструктурным методом анализа металлов и сплавов и изучить взаимосвязь между структурой и механическими свойствами металлов и сплавов.

Задания

1. Используя литературу, ознакомиться с влиянием микроструктуры на механические свойства металлов и сплавов.
2. Освоить методику приготовления микрошлифов.
3. Ознакомиться с устройством микроскопа МИМ-7, принципом его работы, зарисовать схему хода лучей.
4. Изучить под микроскопом и зарисовать поверхности образцов после различных обработок. Определить увеличение микроскопа.
5. Измерить микроскопический объект при помощи окулярных и объективных микрометров.
6. Ответить на контрольные вопросы.
7. Составить отчет.

Общие положения

Под микроскопическим анализом (микроанализом) понимают изучение строения металлов и сплавов с помощью металлографического микроскопа при увеличении в 90-1500 раз.

Задачи микроанализа:

- 1) оценка формы и размеров кристаллических зерен металлов и сплавов;
- 2) определение формы и размеров неметаллических включений – сульфидов, оксидов и др.;
- 3) определение микропороков – микротрещин, раковин, пор и др.;
- 4) анализ изменения микроструктуры сплавов после термической, химико-термической обработки и обработки металлов давлением;
- 5) определение химического состава некоторых структурных составляющих по их характерной форме и окраске после применения избирательных травителей.

Для микроанализа из испытуемого материала вырезают образец и путем ряда операций (шлифования, полирования, травления) доводят до такого состояния, когда при рассмотрении его в металлографический микроскоп выявляют неметаллические включения, мелкие поры, графит в чугуне (после шлифования и полирования) или микроструктуры (после шлифования, полирования и травления).

Микроструктуру металлов и сплавов наблюдают в оптическом микроскопе МИМ-7, МИМ-8 и др. Практически увеличение микроскопа определяется произведением увеличения окуляра на увеличение объектива.

Порядок выполнения работы

Первое и второе задания студенты выполняют при подготовке к работе. Обратите внимание, что существенное влияние на свойства оказывают форма и размер неметаллических включений, неоднородность структуры.

Третье задание выполняется под руководством преподавателя всей группой.

Четвертое задание выполняется бригадами по 2–3 человека на металлографическом микроскопе МИМ-7. Каждая бригада получает комплект из 4 образцов сталей и чугунов:

- 1 – после шлифовки (сталь);
- 2 – после полировки (сталь);
- 3 – после полировки (чугун);
- 4 – после полировки и травления (сталь).

Установить шлиф па предметный столик микроскопа, рассмотреть и зарисовать наблюдаемую поверхность после различных видов обработки (в квадрате 40x40 мм), указать наличие и отсутствие неметаллических включений и характер их распределения. Определить увеличение микроскопа, используя характеристики: фокусное расстояние, числовую апертуру объектива и увеличение окуляра.

При выполнении пятого задания необходимо сначала определить цену деления окулярмикрометра:

1. Вставить окулярмикрометр и объектив.
2. На предметный столик поместить объектмикрометр таким образом, чтобы шкала с делениями находилась над объективом.
3. Вращением макроскопического и микроскопического винтов навести на фокус шкалу объектмикрометра.
4. Вращением окуляра совместить шкалу окулярмикрометра со шкалой объектмикрометра.
5. Определить, в какое число делений окулярмикрометра укладывается шкала объектмикрометра (сколько делений одной шкалы приходится на другую).
6. Определить цену деления шкалы окулярмикрометра $C_{ок}$ по формуле:

$$C_{ок} = \frac{C_{об} \cdot A_{об}}{A_{ок}} \text{ мм,}$$

где $C_{об} = 0,01 \text{ мм}$ – цена деления шкалы объектмикрометра;

$A_{об}$ – число совмещенных делений объектмикрометра;

$A_{ок}$ – число совмещенных делений окулярмикрометра.

Например, шкала объектмикрометра укладывается на 25 делениях шкалы окулярмикрометра. Тогда:

$$C_{ок} = \frac{0,01 \cdot 100}{25} = 0,04 \text{ мм,}$$

Для измерения микроскопических объектов необходимо:

1. Настроить микроскоп на измеряемый объект.
 2. Совместить данный объект со шкалой окулярмикрометра.
 3. Измерить микроскопический объект, т. е. определить, сколько делений шкалы окулярмикрометра занимает объект.
 4. Определить величину измеряемого объекта, для чего полученное число делений шкалы окулярмикрометра, которое занимает объект, умножить на цену деления окулярмикрометра.
- Например, объект занимает 6 делений шкалы окулярмикрометра. Цена деления окулярмикрометра 0,04 мм. Величина измеряемого объекта $6 \cdot 0,04 = 0,24 \text{ мм}$.

Содержание отчета

1. Название, цель работы, задание.
2. Оптическая схема микроскопа МИМ-7 со спецификацией основных элементов схемы.
3. Микроструктуры шлифованного, полированного и травленных микрошлифов стали и чугуна с необходимыми объяснениями, увеличение микроскопа.
4. Результаты измерения микроскопических объектов.
5. Ответ на контрольный вопрос.

Контрольные вопросы

1. Задачи и область применения микроструктурного анализа.
2. Методика приготовления шлифов.
3. Принципиальная оптическая схема микроскопа МИМ-7.
4. Максимальное увеличение микроскопа. Разрешающая способность микроскопа.
5. Что собой представляют границы зерен?
6. Оценка зерна в металлах и сплавах с помощью окуляра и объективмикрометра.

7. Влияние размеров зерна на механические свойства металлов и сплавов.

Практическая работа N 6 Влияние примесей на механические свойства

Цель: изучить изменения механических свойств от количественного соотношения примесей.

Задания:

1. Описать изменения механических свойств в зависимости от процентного содержания таких примесей, как кремний, марганец, сера, фосфор.
2. Описать скрытые и специальные примеси.
3. Рассмотреть примеси в цветных металлах и их воздействие на характеристики материалов.

Общие положения.

Сталь является многокомпонентным сплавом, содержащим углерод и ряд постоянных примесей. После охлаждения сталь состоит из феррита и цементита. В сталях всегда присутствуют примеси, которые делятся на четыре группы.

1. **Постоянные примеси:** кремний, марганец, сера, фосфор.

Марганец и кремний вводятся в процессе выплавки стали для раскисления, они являются технологическими примесями.

Содержание марганца не превышает $0,5...0,8\%$. Марганец повышает прочность, не снижая пластичности, и резко снижает красноломкость стали, вызванную влиянием серы. Он способствует уменьшению содержания сульфида железа FeS , так как образует с серой соединение сульфид марганца MnS . Частицы сульфида марганца располагаются в виде отдельных включений, которые деформируются и оказываются вытянутыми вдоль направления прокатки.

Содержание кремния не превышает $0,35...0,4\%$. Кремний, дегазируя металл, повышает плотность слитка. Кремний растворяется в феррите и повышает прочность стали, особенно повышается предел текучести. Но наблюдается некоторое снижение пластичности, что снижает способность стали к вытяжке.

Содержание фосфора в стали $0,025...0,045\%$. Фосфор, растворяясь в феррите, искажает кристаллическую решетку и увеличивает предел прочности и предел текучести, но снижает пластичность и вязкость. Располагаясь вблизи зерен, увеличивает температуру перехода в хрупкое состояние, вызывает хладоломкость, уменьшает работу распространения трещин. Повышение содержания фосфора на каждую $0,01\%$ повышает порог хладоломкости на $20...25^\circ C$. Фосфор обладает склонностью к ликвации, поэтому в центре слитка отдельные участки имеют резко пониженную вязкость. Для некоторых сталей возможно увеличение содержания фосфора до $0,10...0,15\%$, для улучшения обрабатываемости резанием. S – уменьшается пластичность, свариваемость и коррозионная стойкость. P – искажает кристаллическую решетку.

Содержание серы в сталях составляет $0,025...0,06\%$. Сера – вредная примесь, попадает в сталь из чугуна. При взаимодействии с железом образует химическое соединение – сульфид серы FeS , которое, в свою очередь, образует с железом легкоплавкую эвтектику с температурой плавления $988^\circ C$. При нагреве под прокатку или ковку эвтектика плавится, нарушаются связи между зернами. При деформации в местах расположения эвтектики возникают надрывы и трещины, заготовка разрушается – явление *красноломкости*.

Красноломкость – повышение хрупкости при высоких температурах. Сера снижает механические свойства, особенно ударную вязкость и пластичность, а так же предел выносливости. Она ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость.

2. **Скрытые примеси** - газы (азот, кислород, водород) – попадают в сталь при выплавке. Азот и кислород находятся в стали в виде хрупких неметаллических включений: окислов (FeO , SiO_2 , Al_2O_3) нитридов (Fe_2N), в виде твердого раствора или в свободном состоянии, располагаясь в дефектах (раковинах, трещинах). Примеси внедрения (азот N , кислород O) повышают порог хладоломкости и снижают сопротивление хрупкому разрушению. Неметаллические включения (окислы, нитриды), являясь концентраторами напряжений, могут значительно понизить предел выносливости и вязкость. Очень вредным является растворенный в стали водород, который значительно охрупчивает сталь. Он приводит к образованию в катанных заготовках и поковках *флокенов*. *Флокены* – тонкие трещины овальной или округлой формы, имеющие в изломе вид пятен – хлопьев серебристого цвета. Металл с флокенами нельзя использовать в промышленности, при сварке образуются холодные трещины в наплавленном и основном металле. Если водород находится в поверхностном слое, то он удаляется в результате нагрева при $150...180$, лучше в вакууме. Для удаления скрытых примесей используют вакуумирование.

3. **Специальные примеси** – специально вводятся в сталь для получения заданных свойств. Примеси называются легирующими элементами, а стали - легированными сталями.

Примеси в цветных металлах

Алюминий и его сплавы. Наиболее распространённой из твёрдых неметаллических примесей алюминия, влияющей на свойства и качество металла, является окись алюминия, а из газов - водород. Кроме того, в алюминии могут присутствовать и другие неметаллические примеси - окислы металлов, углерод, карбиды, нитриды и т. п.

Из всех газов, с которыми приходится соприкасаться алюминию, наибольшей растворимостью обладает водород. Водород в алюминии может находиться не только в растворённом состоянии (в форме атомов или протонов), но и в молекулярной форме в виде выделившихся пузырьков или в форме химических соединений (гидридов) в твёрдом металле. На поглощение водорода жидким алюминием заметное влияние оказывают легирующие элементы. Добавки магния повышают, а кремния и меди понижают растворимость водорода в алюминии. Марганец и никель в жидком сплаве снижают растворимость водорода, а в твёрдом - увеличивают. Так, для получения плотного литья из сплава Al-Si (7 %) содержание водорода в расплаве не должно превышать $0,13$ см³/100 г, для силумина АК12 - $0,4$ см³/100 г и для сплава АК8М - $0,55$ см³/100 г металла. Среднее газосодержание в жидких алюминиевых сплавах обычно находится в пределах от $0,2..0,4$ до $0,8$ см³/100 г металла. В реальных условиях концентрация кислорода в алюминиевых сплавах составляет $(2,5...5) \cdot 10^{-3}$ %, а для получения качественного литья она не должна превышать $2 \cdot 10^{-4}$ %. Добавки натрия и кальция способствуют образованию на его поверхности рыхлых оксидных плёнок.

Неметаллические примеси. На свойства силуминовых отливок оказывает влияние величина неметаллических включений.

Наиболее вредная примесь для алюминия и его сплавов - это железо. также нежелательной примесью в алюминиевых сплавах является цинк.

Медь и ее сплавы. Водород. Появление газовой пористости в литом металле обусловлено наличием водорода в медных расплавах, содержание которого находится в пределах $80...90$ % от общего количества выделяющихся из них газов. С повышением концентрации водорода уменьшаются пластичность и прочность литого металла. Брак отливок из медных сплавов по дефектам газоусадочного происхождения составляет около 70 %.

Кислород является вредной примесью в меди. Он присутствует в виде закиси Si_2O .

Наиболее вредное влияние на механические и технологические свойства меди оказывает висмут. Сурьма оказывает меньшее влияние на свойства меди по сравнению с

висмутом. Марганец является вредной примесью в проводниковой меди, так как резко снижает электро- и теплопроводность. В изделиях с высокой электропроводностью меди, работающих в условиях высокого вакуума, цинк вследствие высокой упругости пара является вредной примесью. Примесь олова в меди также находится в твёрдом растворе при комнатной температуре, что вызывает снижение электро- и теплопроводности. Никель образует с медью непрерывный ряд твёрдых растворов. Он, как и марганец, снижает электро- и теплопроводность меди. Однако в отличие от марганца влияние никеля на эти характеристики значительно слабее. Свинец не приводит к хладноломкости меди, так как он пластичен, но из-за низкой температуры плавления эвтектики вызывает горячеломкость.

Наибольшее значение при использовании олова имеют примеси меди, сурьмы, висмута, алюминия, цинка, железа, свинца, мышьяка.

Железо. Повышает твердость олова и снижает его пластические свойства. При обычном его содержании (в пределах нескольких тысячных долей процента) основные свойства олова не нарушаются.

Свинец. В небольших количествах не снижает механических свойств олова (твёрдый раствор свинца в олове до 97,4 % Sn); в олове, идущем на изготовление консервной жести, содержание свинца не должно превышать 0,04 %. Для изготовления высокооловянистых баббитов (83 % Sn и более) содержание свинца в олове не должно превышать 0,25 % во избежание образования заметных количеств легкоплавкой эвтектики.

Мышьяк. Сильно ухудшает пластические свойства металла и снижает жидкотекучесть. Особенно вреден мышьяк в олове, идущем на изготовление консервной жести, где предел его содержания в слое полуды не должен превосходить 0,015 %. Примесь мышьяка в количестве сотых долей процента связывается на внешнем виде и характере излома олова; твердость и хрупкость олова возрастают.

Опасна обработка кислотами олова, содержащего мышьяка, вследствие выделения крайне ядовитого мышьяковистого водорода (AsH_3).

Медь. В малых количествах медь дает с оловом эвтектику (0,7-1,0 % Cu) с температурой плавления 227 °С. Для изготовления ряда сплавов присутствие меди не вредит. Коррозионная стойкость олова, содержащего медь, сильно понижается.

Сурьма. В пределах до 9 % сурьма дает с оловом твердые растворы; в этих же пределах олово сохраняет способность хорошо коваться и прокатываться. Для многих сплавов присутствие заметных количеств сурьмы нежелательно и регулируется соответствующими стандартами.

Висмут. В большинстве случаев висмут является вредной примесью для олова, и содержание его торговых сортах металла довольно жестоко лимитируется, несмотря на ценное свойство висмута при малом его количестве в олове (не менее 0,0035 %) предотвращать переход белого олова в сере («оловянная чума»).

Алюминий и цинк. Эти примеси попадают в олово при процессах рафинирования. Вследствие образования тончайших пленок из окислов алюминия и цинка, удерживающихся в олове, затрудняется слияние капелек металла, что сильно мешает применению такого олова при лужении и пайке. Примесь металлических алюминия и цинка сильно снижает коррозионную стойкость олова. Поэтому содержание алюминия и цинка в олове строго лимитируется (не более 0,002 %).

Влияние примесей на механические свойства. Сравнительно небольшое число исследований по этому вопросу показало, что увеличение содержания свинца в олове с 0,0025 до 0,25 % не отразилось на механических свойствах металла; увеличение содержания сурьмы с 0,0031 до 0,243 % также не показало изменения твердости и сужения. То же для меди, содержание которой изменялось от 0,0004 до 0,05 % и висмут (с 0,0004 до 0,056 %); увеличение содержания мышьяка до 0,055 %, повлекло за собой повышение твердости от $\text{НВ} = 5,0$ до $\text{НВ} = 8,7 \text{ кг/мм}^2$; увеличение содержания серы 0,0002 до 0,036 % не отразилось на механических свойствах; увеличение содержания цинка с 0,000 до 0,24 % почти утроило твердость и снизило сужение олова при одновременном удвоении выхода съёмов при плавке.

Торговые сорта олова, содержащие повышенное количество меди (0,274 %) висмута (0,330 %) и мышьяка (0,100 %), также обладают сильно повышенной твердостью ($HV = 12-13$ кг/мм²) и пониженным сужением (75 %).

Контрольные вопросы:

1. Как влияют сера, никель, молибден, титан, кремний на механические свойства сталей?
2. Какими методами проводят испытания на твердость?
3. На какие группы подразделяются примеси?
4. Какие механические свойства улучшают и ухудшают постоянные примеси?
5. Какие примеси относятся к группе постоянных примесей?
6. Как влияют примеси на характеристики цветных металлов?
7. Способы упрочнения материалов с помощью примесей.

Практическая работа N 7 Зависимость свойств металлов от температуры

Цель: ознакомиться с изменением механических и физических свойств от температуры

Задания:

1. Рассмотреть зависимость механических свойств стали от температуры.
2. Определить изменение предела текучести стали в зависимости от температуры.
3. Рассмотреть степень излома при разных температурных режимах.

Общие положения.

При нагреве металла возрастает подвижность атомов, увеличивается амплитуда колебаний, ослабевают межатомные связи, облегчается обмен местами и переход атомов в новые положения. Все это существенным образом влияет на изменение физико-химических и механических свойств металлов и сплавов.

Механические свойства металла изменяются в зависимости от его температурного состояния. Механические характеристики металла при высоких температурах нельзя считать полностью исследованными. Более обстоятельно изучены механические свойства металла в области упругих изменений. На рис. 1 представлено изменение механических характеристик стали в зависимости от температуры при нагреве до 500—600° С.

Модуль упругости стали E при нагревании постепенно понижается, а коэффициент теплового расширения a возрастает. В области температур упругих изменений стали произведение aE можем принять постоянным и равным 25 кг/см².

Предел прочности стали с повышением температуры до 100°С несколько снижается, затем при дальнейшем нагреве повышается и имеет наибольшее значение в области температур 200—300°С. При нагреве от 300 до 500°С предел прочности стали, кроме жароупорной, постепенно понижается. При температуре выше 500°С предел прочности стали резко снижается, принимая при 600°С весьма низкие значения по сравнению с прочностью при обычных температурах.

Пластические свойства стали, характеризуемые относительным удлинением и поперечным сужением при разрыве, несколько снижаются в области температур 150—300° С. С увеличением температуры выше 300°С пластические свойства стали возрастают. Такой характер изменения пластических свойств стали показывает, что при большой скорости остывания закрепленного стального элемента его разрыв при температурах 150—300°С весьма вероятен. Этим объясняется целесообразность предварительного подогрева стали при сварке до 150—200° С, чтобы замедлить остывание после сварки.

Предел текучести стали с повышением температуры до 500° С несколько понижается, а затем при дальнейшем повышении температуры (свыше 500°С) резко падает, доходя почти до нуля при температуре 600°С.

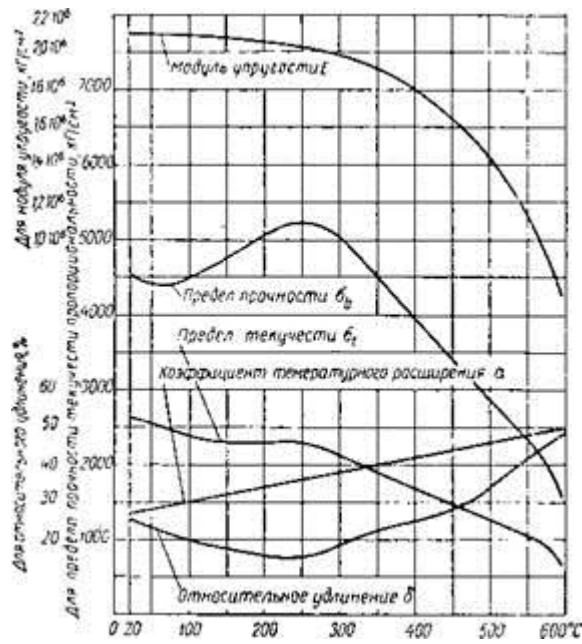


Рис. 1. Зависимость механических свойств стали от температуры.

В действительности предел текучести стали несколько повышается в области температур 150—300°C, затем постепенно понижается при нагреве до 500° С, а после этого резко падает (рис. 2, пунктирная кривая). Ввиду малых значений предела текучести стали при температуре 600°С и выше, примем допущение, что предел текучести сталей, кроме жароупорной, при температуре 600° С и выше имеет нулевое значение (рис. 3). Другими словами, будем считать, что при температуре 600°С и выше сталь находится только в пластическом состоянии, теряя полностью свои упругие свойства.

При охлаждении стали ниже нуля предел прочности и предел текучести повышаются, причем предел текучести приближается к пределу прочности.

При весьма низкой температуре сталь теряет пластические свойства, переходит в хрупкое состояние и становится хладноломкой.

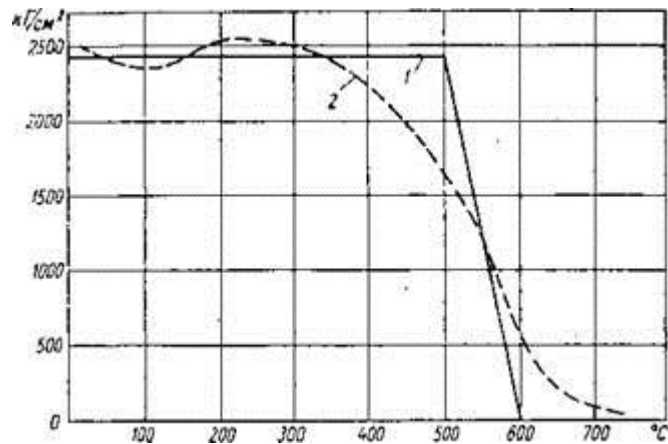


Рис. 2. Зависимость предела текучести стали от температуры

:

1 — схематизированная диаграмма; 2 — действительная диаграмма.

КГ/СМ²

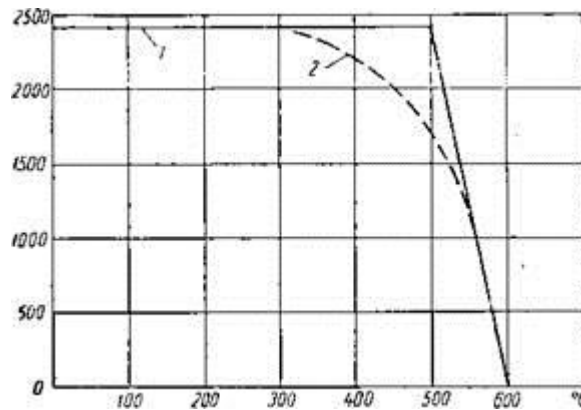


Рис. 3. Условная зависимость предела текучести стали от температуры:
1 — схематизированная диаграмма; 2 — условная диаграмма.

Для каждого металла существует своя критическая температура, выше которой металл способен пластически деформироваться, а при температурах ниже критических металл теряет способность к образованию пластических деформаций и разрушается в виде хрупкого излома. Для стали критическая температура, ниже которой происходит хрупкое разрушение, находится в области — 65—160° С.

Помимо низких температур, на хрупкое разрушение стали большое влияние оказывает концентрация напряжений, вызванная надрезами и неровностями.

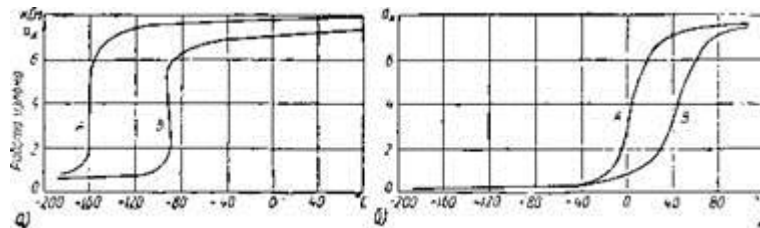


Рис. 4. Работа излома стали при разных температурах;
а — ненадрезанные образцы; б — надрезанные образцы.

Хрупкое состояние стали может быть вызвано объемным напряженным состоянием, при котором весьма затруднено образование пластических деформаций.

На рис. 4 приведены кривые ударной вязкости котельной стали в зависимости от температуры. Кривые *A* соответствуют результатам испытаний стали, подвергавшейся предварительно нормализации для измельчения зерна, а кривые *B* соответствуют результатам испытаний крупнозернистой стали.

Критическая температура ненадрезанных образцов для стали *A*— 160°С, а для стали *B*— 90°С. При наличии надрезов критическая температура хрупкого разрушения значительно выше и для стали *A* равна +5° С, а для стали *B* +45° С (см. рис. 4).

В таблице 1 приведены теплофизические свойства железа Fe в зависимости от температуры в интервале от 100 до 2000 К.

Свойства железа существенно зависят от температуры: при нагревании этого металла его теплопроводность, температуропроводность и плотность уменьшаются, а значение удельной теплоемкости железа растет.

Поскольку железо является основным элементом в составе стали, то плотность железа определяет и значение плотности стали. Зависимость плотности железа от температуры слабая — при нагревании железа плотность этого металла снижается и принимает значение 7040 кг/м³ при температуре плавления равной 1810 К.

Плотность железа равна 7870 кг/м³ при комнатной температуре; теплопроводность железа при этой же температуре равна 80 Вт/(м·град), а удельная теплоемкость железа, по данным таблицы, имеет значение 450 Дж/(кг·град).

В расплавленном состоянии свойства железа претерпевают изменения. Так, плотность жидкого железа уменьшается и становится равной 7040 кг/м³. Удельная теплоемкость

расплавленного железа составляет величину 835 Дж/(кг·град), а теплопроводность железа снижается до значения 39 Вт/(м·град). При этом удельное электрическое сопротивление этого металла увеличивается.

В таблице даны следующие свойства железа:

- плотность железа, г/м³;
- удельная теплоемкость, Дж/(кг·град);
- температуропроводность, м²/сек;
- теплопроводность железа, Вт/(м·град);
- удельное электросопротивление, Ом·м;
- функция Лоренца.

Таблица 1

T, K	$d, \text{г/см}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\rho \cdot 10^8, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$\frac{L}{L_0}$
100	—	216,1	—	—	—	—
200	—	385,0	30,9	—	5,1	—
300	7,87	450,0	22,7	79,9	10,2	1,11
400	7,84	491,1	18,1	69,4	16,4	1,16
500	7,81	530,7	14,9	61,8	24,2	1,22
600	7,77	573,1	12,4	55,1	33,5	1,25
700	7,73	619,9	10,2	48,7	44,8	1,27
800	7,70	679,1	8,18	42,7	58,6	1,27
900	7,66	772,8	6,30	37,2	74,0	1,24
1000	7,62	975,1	4,06	32,0	91,4	1,19
1042 T_c	7,61	1409,0	2,71	25,4	102,2	1,01
1100	7,59	794,1	4,80	30,2	106,5	1,19
1183 α	—	716,2	5,40	30,0	111,0	1,12
1183 β	—	604,8	6,10	29,0	109,0	1,09
1200	—	607,1	6,20	29,0	111,9	1,10
1400	—	640,1	6,60	31,5	117,2	1,07
1600	—	673,8	6,90	34	122	1,06
1667 β	—	685,1	6,90	34	—	—
1667 ν	—	723,4	6,50	35	—	—
1800	—	799,5	6,40	35	—	—
1810 s	—	805,8	6,40	35	130	1,02
1810 l	7,04	834,9	6,8	39	133	1,1
2000	—	835,0	—	—	138	—

Thermalinfo.ru

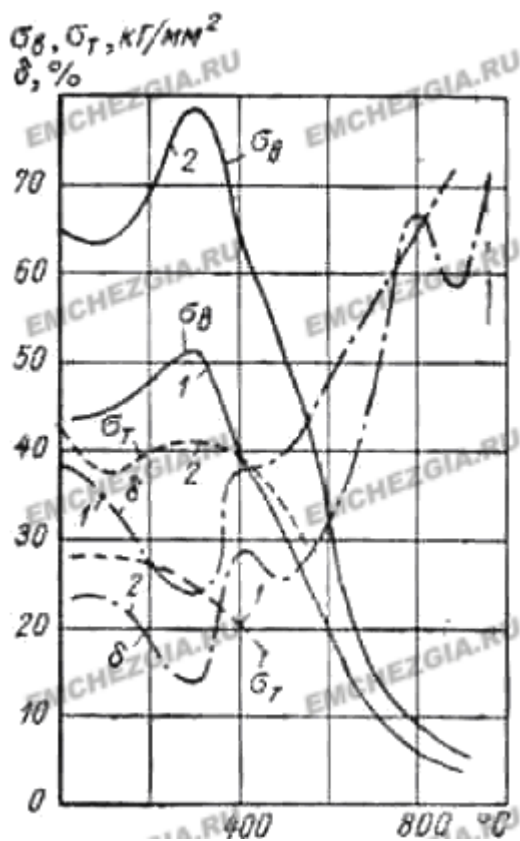


Рис. 5

Рассмотрим зависимость механических свойств тугоплавких металлов от температуры.

Вольфрам и молибден промышленной чистоты не пластичны при комнатной температуре. Переход вольфрама из хрупкого состояния в пластичное колеблется в интервале температур 150-450° С, причем разрушение носит главным образом межкристаллитный характер. Молибден в зависимости от чистоты переходит из хрупкого в пластичное состояние в интервале температур 20-300° С. На температуру перехода, наряду с другими факторами, влияет размер зерна в металле: чем мельче зерно, тем ниже температура этого перехода. Ниобий и тантал обычной чистоты обладают хорошей пластичностью при температурах ниже комнатной.

При нагреве до высоких температур заметно изменяются физико-механические свойства тугоплавких металлов.

Сравнение высокотемпературной прочности нелегированных вольфрама, молибдена, ниобия и тантала показывает, что вольфрам отличается наибольшей прочностью при всех температурах, в то время как тантал занимает среднее по прочности место между ниобием и молибденом.

Интенсивно увеличивается предел текучести вольфрама при понижении температуры от 350 до 175° С, т. е. в интервале перехода из пластичного состояния в хрупкое. Примерно в этом же интервале температур резко увеличивается удлинение, а прочность снижается более равномерно. Снижение твердости происходит одинаково как для наклепанного, так и для отожженного металла. Твердость вольфрама и молибдена при нагреве до 327° С резко падает, однако при дальнейшем повышении температуры твердость изменяется с меньшей интенсивностью.

Представляет интерес изменение механических свойств полуфабрикатов тугоплавких металлов при высоких температурах после деформации. Например, прочность молибденовой проволоки диаметром 0,6 мм с повышением температуры падает, но даже при температуре 1400° С остается высокой и составляет 500 Мн/м² (50 кГ/мм²). Прочность этой же проволоки при комнатной температуре после деформации ~90-95% составляет 1150 Мн/м² (115 кГ/мм²).

С уменьшением содержания примесей предел прочности понижается почти в два раза при всех температурах, оставаясь все же значительным по величине 140 Мн/м² (14 кГ/мм²) даже при 1500° С. Одновременно повышается пластичность, достигая при 1500° С 50,8%. Зависимость твердости ниобия от температуры: с повышением температуры твердость ниобия резко снижается. При температуре 1173° С твердость у литого ниобия достигает максимума, а у металлокерамического ниобия три максимума — при 777, 927 и 1127° С. Дальнейшее повышение температуры вызывает понижение твердости, и при 1850° С твердость металлокерамического и литого ниобия совпадает и составляет небольшую величину: при 2027° С • 1 Мн/м² (0,1 кГ/мм²), а при 2127° С всего 8,2 Мн/м² (0,82 кГ/мм²).

Влияние температуры на изменение механических свойств тантала: при температуре 400° С наблюдается «пик», вызванный процессом деформационного старения. Твердость тантала при повышении температуры также снижается.

Важным показателем является удельная прочность тугоплавких металлов при высоких температурах. До температуры 1320°С ниобий и молибден имеют значительное преимущество по удельной прочности по сравнению с вольфрамом и танталом, а выше этой температуры наибольшую удельную прочность имеет вольфрам.

Одной из характеристик тугоплавких металлов при высоких температурах является ползучесть или свойство металла пластически деформироваться при высоких температурах под действием постоянных напряжений..

Пластические, технологические и другие свойства тугоплавких металлов заметно изменяются под воздействием термической обработки. Основным видом термической обработки является отжиг, который подразделяют на три вида: гомогенизацию, возврат, полный рекристаллизационный отжиг.

Например, слитки ниобия, выплавленные в дуговых печах и содержащие значительное количество примесей, при неоднородной структуре подвергают отжигу при 1800-2000° С в вакууме 13,3-1,33 мн/м² (10^{-*}- 10~5 мм рт. ст.) и выдерживают до 10 ч. Такой отжиг приводит к уменьшению газосодержания в слитке. Одновременно с дегазацией происходит растворение избыточных фаз и структура становится более однородной. Однако следует учитывать, что длительный отжиг ниобия при высоких температурах приводит к росту зерна в слитках.

Гомогенизирующий отжиг прессованных и кованных заготовок из ниобия производят при температуре 1350- 1450° С, когда происходит заметное растворение карбидных и других фаз, и в то же время не наблюдается сильного роста зерна. Гомогенизация заготовки благоприятно сказывается на технологических свойствах при последующей обработке.

Возврат или неполный отжиг применяют для частичного снятия остаточных напряжений, искажений кристаллической решетки, возникающих в заготовках и изделиях при различных операциях обработки давлением. В результате такого процесса повышается пластичность металла. Микроструктура металла не изменяется.

Отжиг-возврат рекомендуется применять к изделиям и полуфабрикатам, предназначенным для работы при температурах ниже температуры рекристаллизации.

Рекристаллизационный отжиг применяют как промежуточный процесс между операциями холодной обработки (для снятия наклепа и устранения текстуры) или как окончательную операцию термообработки, (для придания полуфабрикатам или изделиям необходимых свойств).

В процессе сварки металл подвергается нагреву до высоких температур, изменение которых происходит в широких пределах и в сравнительно короткое время.

Контрольные вопросы:

1. Как влияет температура на основные механические свойства металлов?
2. Изменение модуля упругости при нагревании.
3. Что происходит с пластическими характеристиками металла в зависимости от температуры?
4. Как изменяется показатель текучести при нагревании?
5. Зависит ли хрупкость металла от температурного режима?
6. Теплопроводность железа при нагревании.
7. Характеристики тугоплавких металлов при высоких температурах.
8. Что такое отжиг, возврат и назначение этих операций.
9. Термообработка.

Практическая работа N 8 **Исследование магнитных свойств**

Цель: рассмотреть магнитные характеристики материалов и классификацию ферромагнитных материалов.

Задания:

1. Изучить материалы по степени их магнитной проницаемости.
2. Изучить магнитные характеристики
3. Рассмотреть явления намагничивания

Общие положения.

Все вещества являются магнетиками и намагничиваются во внешнем магнитном поле.

По магнитным свойствам материалы подразделяются на слабомагнитные (диамагнетики и парамагнетики) и сильномагнитные (ферромагнетики и ферримагнетики).

Диамагнетики – вещества с магнитной проницаемостью $\mu_r < 1$, значение которой не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. Диамагнетиками являются вещества, атомы

(молекулы) которых в отсутствие намагничивающего поля имеют магнитный момент равный нулю: водород, инертные газы, большинство органических соединений и некоторые металлы (Cu, Zn, Ag, Au, Hg), а также Bi, Ga, Sb.

Парамагнетики – вещества с магнитной проницаемостью $\mu_r > 1$, которая в слабых полях не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К парамагнетикам относятся вещества, атомы (молекулы) которых в отсутствие намагничивающего поля обладают магнитным моментом отличным от нуля: кислород, оксид азота, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов, щелочные металлы, алюминий, платина.

У диамагнетиков и парамагнетиков магнитная проницаемость μ_r близка к единице. Применение в технике в качестве магнитных материалов носит ограниченный характер.

У сильномагнитных материалов магнитная проницаемость значительно больше единицы ($\mu_r \gg 1$) и зависит от напряженности магнитного поля. К ним относятся: железо, никель, кобальт и их сплавы, а также сплавы хрома и марганца, гадолиний, ферриты различного состава.

Магнитные характеристики материалов

Магнитные свойства материалов оценивают физическими величинами, называемыми магнитными характеристиками:

- магнитная проницаемость

Различают *относительную* и *абсолютную магнитные проницаемости* вещества (материала), которые между собой связаны соотношением

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu, \text{ Гн/м}$$

$$\mu_0 - \text{магнитная постоянная, } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м;}$$

μ – относительная магнитная проницаемость (безразмерная величина).

Для описания свойств магнитных материалов применяют относительную магнитную проницаемость μ (чаще называемую магнитная проницаемость), а для практических расчетов используют абсолютную магнитную проницаемость μ_a , вычисляемую по уравнению

$$\mu_a = B/H, \text{ Гн/м}$$

H – напряженность намагничивающего (внешнего) магнитного поля, А/м

B – магнитная индукция поля в магнетике.

Большая величина μ показывает, что материал легко намагничивается в слабых и сильных магнитных полях. Магнитная проницаемость у большинства магнетиков зависит от напряженности намагничивающего магнитного поля.

Для характеристики магнитных свойств широко используется безразмерная величина, называемая *магнитной восприимчивостью* χ .

$$\mu = 1 + \chi$$

- температурный коэффициент магнитной проницаемости

Магнитные свойства вещества зависят от температуры $\mu = \mu(T)$.

Для описания характера изменения магнитных свойств с температурой используют температурный коэффициент магнитной проницаемости.

$$TK_{\mu} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1}, \quad \frac{1}{\text{град}}$$

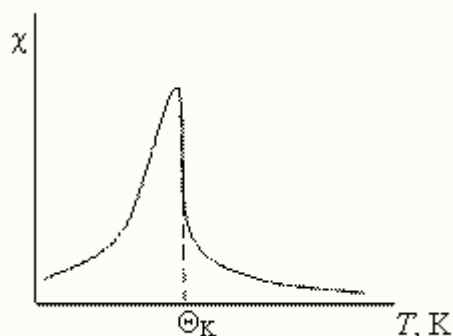
Зависимость магнитной восприимчивости парамагнетиков от температуры T описывается законом Кюри

$$\chi = \frac{C}{T},$$

где C - постоянная Кюри.

Магнитные характеристики ферромагнетиков

Зависимость магнитных свойств ферромагнетиков имеет более сложный характер показанный на **рис.1**.



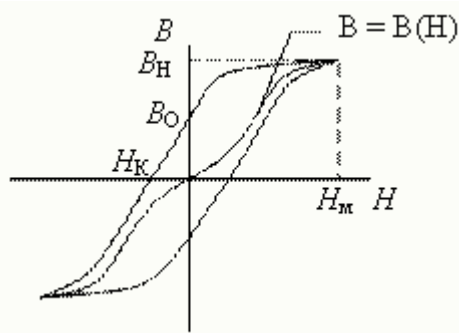
Температура, при которой магнитная восприимчивость резко снижается, почти до нуля, носит название температуры Кюри - T_K . При температурах выше T_K процесс намагничивания ферромагнетика нарушается из-за интенсивного теплового движения атомов и молекул и материал перестает быть ферромагнитным и становится парамагнетиком.

Для железа $T_K = 768^\circ C$, для никеля $T_K = 358^\circ C$, для кобальта $T_K = 1131^\circ C$.

Выше температуры Кюри зависимость магнитной восприимчивости ферромагнетика от температуры T описывается законом Кюри-Вейса

$$\chi = \frac{C}{T - \Theta_K},$$

Процесс намагничивания сильномагнитных материалов (ферромагнетиков) обладает *гистерезисом*. Если производить намагничивание размагниченного ферромагнетика во внешнем поле, то он намагничивается по *кривой намагничивания* $B = B(H)$. Если затем, начиная с некоторого значения H начать уменьшать напряженность поля, то индукция B будет уменьшаться с некоторым запаздыванием (*гистерезисом*) по отношению к кривой намагничивания. При увеличении поля противоположного направления ферромагнетик размагничивается, затем перемагничивается, и при новой смене направления магнитного поля может вернуться в исходную точку, откуда начинался процесс размагничивания. Получившаяся петля, изображенная на рисунке, называется *петлей гистерезиса*. - **Рис.2**



При некоторой максимальной напряженности H_m намагничивающего поля вещество намагничивается до состояния насыщения, индукция в котором достигает значения B_H , которое называется *индукцией насыщения*.

Остаточная магнитная индукция B_0 – наблюдается в ферромагнитном материале, намагниченном до насыщения, при его размагничивании, когда напряженность магнитного поля равна нулю. Для размагничивания образца материала надо, чтобы напряженность магнитного поля изменила свое направление на обратное ($-H$). Напряженность поля H_K , при которой индукция равна нулю, называется *коэрцитивной силой* (удерживающая сила).

Перемагничивание ферромагнетика в переменных магнитных полях всегда сопровождается тепловыми потерями энергии, которые обусловлены *потерями на гистерезис и динамическими потерями*. Динамические потери связаны с вихревыми токами, индуцированными в объеме материала, и зависят от электрического сопротивления материала, уменьшаясь с ростом сопротивления. Потери на гистерезис W в одном цикле перемагничивания определяются площадью петли гистерезиса

$$W = \int_0^{H_m} B(H) dH$$

и могут быть вычислены для единицы объема вещества по эмпирической формуле

$$\frac{W}{V} = \eta B_H^n, \quad \text{Дж/м}^3$$

где η – коэффициент зависящий от материала, B_H – максимальная индукция, достигаемая в течение цикла, n – показатель степени, равный в зависимости от материала 1,6 \square 2.

Удельные потери энергии на гистерезис P_Γ – потери, затраченные на перемагничивание единицы массы в единице объема материала за секунду.

$$P_\Gamma = \frac{W}{mVT} = \eta B_H^n f, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{кг} \cdot \text{м}^3}$$

где f – частота переменного тока, T – период колебаний.

Магнитострикция

Магнитострикция – явление изменения геометрических размеров и формы ферромагнетика при изменении величины магнитного поля, т.е. при намагничивании. Относительное

изменение размеров материала может быть положительным и отрицательным. У никеля магнитострикция меньше нуля и достигает величины 0,004 %.

Если при намагничивании тело испытывает в данном направлении сокращение своих размеров, то приложение механического напряжения сжатия в этом направлении способствует намагничиванию, а растяжение – затрудняет намагничивание.

Классификация ферромагнитных материалов

Все ферромагнитные материалы по поведению в магнитном поле делятся на две группы.

Магнитомягкие – с большой магнитной проницаемостью μ и малой величиной коэрцитивной силы $H_K < 10$ А/м. Они легко намагничиваются и размагничиваются. Обладают малыми потерями на гистерезис, т.е. узкой петлей гистерезиса.

Магнитные характеристики зависят от химической чистоты и степени искажения кристаллической структуры. Чем меньше примесей (С, Р, S, О, N), тем выше уровень характеристик материала, поэтому необходимо при производстве ферромагнетика их и оксиды удалять, и стараться не исказить кристаллическую структуру материала. К металлическим магнитомягким материалам относятся карбонильное железо, пластичные железоникелевые сплавы, нековкие хрупкие сплавы состава Al – Si – Fe , низкоуглеродистые кремнистые стали.

Магнитотвердые материалы – обладают большой $H_K > 0,5$ МА/м и остаточной индукцией ($B_0 \geq 0,1$ Т). Им соответствует широкая петля гистерезиса. Они с большим трудом намагничиваются, зато могут несколько лет сохранять магнитную энергию, т.е. служить источником постоянного магнитного поля. Поэтому из них изготавливаются постоянные магниты.

Подразделяются в зависимости от состава, состояния и способа получения на:

- легированные мартенситные стали;
- литые магнитотвердые сплавы.

Для изготовления постоянных магнитов находят применение три основных группы сплавов:

- Железо – кобальт – молибденовый сплав* типа *ремаллой* с коэрцитивной силой $H_K = 12 – 18$ кА/м.
- Группа сплавов:
 - медь – никель – железо*;
 - медь – никель – кобальт*;
 - железо – марганец*, легированные алюминием или титаном;
 - железо – кобальт – ванадий* (Fe – Co – V).

Сплав медь – никель – железо называется *кунифе* (Cu – Ni - Fe). Сплав Fe – Co – V (железо – кобальт - ванадий) называется *викалой*. Сплавы этой группы имеют коэрцитивную силу $H_K = 24 – 40$ кА/м. Выпускаются в виде проволоки и в листах.

По составу все магнитные материалы делятся на:

- металлические;
- неметаллические;
- магнитодиэлектрики.

Металлические магнитные материалы - это чистые металлы (железо, кобальт, никель) и магнитные сплавы некоторых металлов.

К *неметаллическим* материалам относятся *ферриты*, получаемые из порошков оксидов железа и других металлов. Их прессуют и обжигают при 1300 – 1500 °С и они превращаются в твердые монолитные магнитные детали. Ферриты, как и металлические магнитные материалы, могут быть магнитомягкими и магнитотвердыми.

Магнитодиэлектрики – это композиционные материалы из 60 – 80 % порошка магнитного материала и 40 – 20 % органического диэлектрика. Ферриты и магнитодиэлектрики имеют большое значение удельного электрического сопротивления ($\rho = 10 \div 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Высокое сопротивление этих материалов обеспечивает низкие динамические потери энергии в переменных электромагнитных полях и позволяет широко использовать их в высокочастотной технике. В качестве диэлектриков применяют полистирол, бакелитовые смолы, жидкое стекло и др.

Контрольные вопросы:

1. Какие материалы относятся к слабомагнитным и сильномагнитным?
2. Что такое магнитная проницаемость?
3. Зависимость магнитных свойств от температуры.
4. Что такое петля гистерезиса?
5. Объяснить явление - остаточная магнитная индукция.
6. Чем отличаются магнитотвердые материалы от магнитомягких?
7. Как подразделяются все магнитные материалы по составу?
8. Какие сплавы используются для изготовления постоянных магнитов?

Литература

1. Готтштайн, Г. Физико-химические основы материаловедения [Электронный ресурс] / Г. Готтштайн; пер. с англ. К.Н. Золотовой, Д.О. Чаркина под ред. В.П. Зломанова. - 2-е изд. (эл.). - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. - 403 с. - (Лучший зарубежный учебник). - ISBN 978-5-9963-1327-3. <http://znanium.com/bookread2.php?book=539831>
2. Федотов, А.К. Физическое материаловедение. Ч. 2. Фазовые превращения в металлах и сплавах [Электронный ресурс] : учеб. пособие. В 3 ч. / А.К. Федотов. – Минск : Выш. шк., 2012. – 446 с.: ил. - ISBN 978-985-06-2063-7. <http://znanium.com/bookread2.php?book=508082>
3. Шепелевич, В.Г. Физика металлов и металловедение. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В.Г. Шепелевич. – Минск: Выш. шк., 2012. – 166 с.: ил. - ISBN 987-985-06-2191-7. <http://znanium.com/bookread2.php?book=508814>