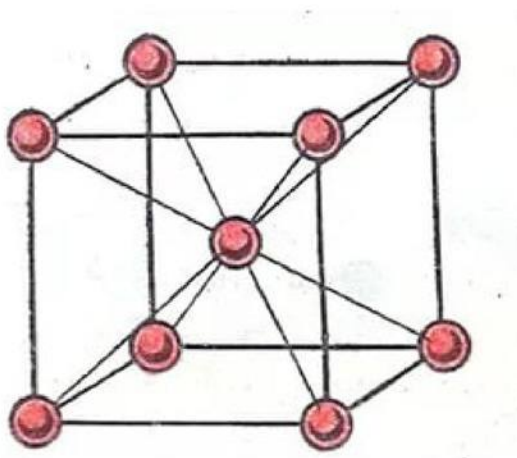


Министерство образования и науки РФ
Филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Майкопский
государственный технологический университет» в пос. Яблоновском
Кафедра инженерных дисциплин и таможенного дела

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



пос. Яблоновский
2016

Составитель: ст. преподаватель Хрисониди В.А.

УДК 620.22(07)

ББК 30.3

М 34

Материаловедение. Методические указания по выполнению практических работ для студентов всех форм обучения по направлениям подготовки 21.03.01 – Нефтегазовое дело, 21.03.02 – Землеустройство и кадастры, 23.03.01 – Технология транспортных процессов и специальностям 20.05.01 – Пожарная безопасность, 38.05.02 – Таможенное дело : Сост. В.А. Хрисониди. Майкоп. гос. технол. ун-т. Кафедра инженерных дисциплин и таможенного дела – пос. Яблоновский: Изд. Филиал Майкоп. гос. технол. ун-т в пос. Яблоновском, 2016. – 94 с.

В методических указаниях приведены: основные теоретические положения разделов дисциплины, методические указания по выполнению практических работ для студентов всех форм обучения по указанным направлениям подготовки и специальностям, индивидуальные задания для студентов для выполнения расчетно-графических работ, рекомендуемая литература.

Данные методические указания могут быть использованы при проведении практических занятий по дисциплине, а также в качестве заданий для контрольной работы студентов заочной формы обучения указанных направлений и специальностей

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и автосервиса, ФГБОУ ВО «КубГТУ» Соколов Е.Г.;
д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой общей, неорганической химии и информационно-вычислительных технологий в химии, ФГБОУ ВО «КубГУ» Н.Н. Буков

Печатается по решению научно-методических советов направлений подготовки 21.03.01 – Нефтегазовое дело, 21.03.02 – Землеустройство и кадастры, 23.03.01 – Технология транспортных процессов и специальностям 20.05.01 - Пожарная безопасность, 38.05.02 – Таможенное дело протоколы от 26.08.2016 г. №1

© Филиал МГТУ, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Основные разделы теоретической части дисциплины.....	6
2 Практические работы по дисциплине	7
Тема №1 «Кристаллические структуры».....	7
Тема №2 «Механические свойства металлов и сплавов».....	12
Тема №3 «Фазовое равновесие сплавов. Фазовые диаграммы двухкомпонентных конденсированных систем»	21
Тема №4 «Анализ диаграммы фазового равновесия сплавов системы «железо-цементит»»	37
Тема №6 «Теоретические вопросы материаловедения. Выбор материала и способа его упрочнения с учетом производственного назначения»	54
Тема №7 «Коррозия металлов и сплавов и методы борьбы с ней».....	74
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	81
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	82

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение относится к числу основополагающих дисциплин для подготовки бакалавров в области нефтегазового дела, землеустройства и кадастров, технологии транспортных процессов, специалистов по таможенному делу и пожарной безопасности. Это связано с тем, что получение, разработка новых материалов, способы их обработки являются основой современного производства и во многом определяют уровень своего развития научно-технический и экономический потенциал страны. Проектирование рациональных, конкурентноспособных изделий, организация их производства невозможны без достаточного уровня знаний в области материаловедения.

Разнообразие свойств материалов является главным фактором, предопределяющим их широкое применение в технике. Материалы обладают отличающимися друг от друга свойствами, причем каждое зависит от особенностей внутреннего строения материала. В связи с этим материаловедение как наука занимается изучением строения материала в тесной связи с их свойствами. Основные свойства материалов можно подразделить на физические, механические, технологические и эксплуатационные.

От физических и механических свойств зависят технологические и эксплуатационные свойства материалов.

Цель освоения дисциплины заключается в формировании совокупности знаний о свойствах и строении материалов, способах их получения и упрочнения, современных методах получения деталей с заданными эксплуатационными характеристиками, необходимых для обоснованного выбора материала детали и технологии обработки, приобретение студентами теоретических и практических навыков в области сварочных работ, выбора технологических процессов и их режимов, способов получения основных конструкционных материалов и изделий, обеспечивающих высокое качество, экономию материалов.

Задачами дисциплины является изучение:

- изучение кристаллического строения металлов и сплавов;
- основ термической и химико-термической обработки;
- технологических процессов получения различных материалов;
- способов обеспечения свойств материалов различными методами;
- методов получения заготовок с заранее заданными свойствами;
- основных марок металлических материалов;
- технико-экономических и экологических характеристик технологических процессов, инструментов и оборудования;
- влияния производственных и эксплуатационных факторов на свойства материалов.

Основные положения дисциплины используются в качестве общеметодологических принципов при изучении базовых и вариативных

дисциплин, а также могут быть использованы в дальнейшем в курсовом и дипломном проектировании.

Целями освоения дисциплины в области обучения, воспитания и развития, соответствующие целям ОПОП являются цели:

- формирование знаний в области теории строения материалов, физической теории металлического состояния вещества, технологии получения металлов и сплавов различного назначения, способы их обработки, а также контроля их свойств и качества;

- подготовка бакалавров и специалистов к проектной деятельности в области разработки технологических процессов предприятий машиностроительной промышленности, а также для проведения оценки физико-химических и технологических свойств выпускаемых материалов;

- формирование навыков обосновывать выбор конструкционного материала при проектировании, а также принимать правильное решение при выборе материала;

- формирование навыков поиска научной информации в области материаловедения и технологии конструкционных материалов, работы с профессиональной литературой;

- подготовка выпускников к поиску и получению новой информации, необходимой для решения инженерных и научных задач в области технологии материалов современной энергетики, интеграции знаний применительно к своей области деятельности, к самообучению и постоянному профессиональному самосовершенствованию

В результате освоения дисциплины студент должен:

знать:

- материалы и технологии, применяемые для изготовления технических средств и защиты от коррозионного разрушения;

- особенности строения технических материалов, зависимость их свойств от состава и строения;

- способы упрочнения и разупрочнения материалов;

- физическую сущность явлений, происходящих в материалах;

- основные характеристики и принципы выбора конструкционных материалов для производства деталей и узлов технических средств.

уметь:

- применять полученные знания для выбора материала и технологии обработки;

- идентифицировать на основании маркировки конструкционные материалы и определять возможные области их применения;

- определять механические свойства материалов при различных температурных условиях и условиях нагружения;

- использовать общие принципы рационального выбора материала детали и способа ее изготовления и повышения эксплуатационных свойств, исходя из заданных требований к изделию.

владеть:

- особенностями производства, методами и способами формирования различных поверхностей деталей для технологичной конструкции, обеспечивающей требуемые технические параметры;
- основными методами определения механических, эксплуатационных и технологических свойств материалов;
- навыками подбора различных материалов, исходя из заданных условий их эксплуатации.

1 Основные разделы теоретической части дисциплины

В теоретическую часть по дисциплине «Материаловедение» входят следующие разделы и их основные тематические единицы:

Раздел 1. Строение и свойства металлов. Общая характеристика металлов и сплавов. Кристаллическое состояние металлов. Дефекты строения кристаллических тел. Кристаллизация металлов. Основы теории механики разрушения материалов. Свойства металлов и сплавов. Упругая и пластическая деформация. Хрупкое и вязкое разрушение. Факторы, определяющие характер разрушения. Наклеп и рекристаллизация. Методы исследований и испытаний материалов. Металлографические методы испытаний. Испытания механических свойств и долговечности.

Раздел 2. Строение и свойства сплавов. Фазы и структуры металлических сплавов. Характеристика основных фаз в сплавах. Структура сплавов. Диффузия и структура сплавов. Пути упрочнения сталей и сплавов. Диаграммы состояния (фазового равновесия) сплавов. Условия и методика построения диаграмм состояния. Основные типы диаграмм состояния. Неравновесная кристаллизация и перекристаллизация сплавов. Связь между свойствами сплавов и типом диаграмм состояния. Понятие о диаграммах состояния тройных сплавов.

Раздел 3. Железо и его сплавы. Диаграмма состояния системы железо-углерод. Компоненты и фазы в сплавах железа с углеродом. Диаграмма состояния системы железо-цементит (метастабильное состояние). Диаграмма состояния системы железо-графит (стабильное состояние). Общая характеристика углеродистых сталей. Влияние углерода на свойства стали. Влияние примесей на свойства стали. Классификация углеродистых сталей. Легированные стали. Влияние легирующих элементов на превращения и свойства стали. Карбиды в легированных сталях. Классификация легированных сталей. Маркировка сталей по российским и международным стандартам. Чугуны. Разновидности чугунов. Микроструктура и свойства чугуна. Легированные чугуны.

Раздел 4. Термическая обработка стали. Основы теории термической обработки. Классификация видов термической обработки стали. Превращения в стали при нагреве. Образование аустенита.

Диффузионные превращения аустенита при охлаждении стали. Диаграмма изотермического превращения аустенита. Мартенситное превращение аустенита. Бейнитное превращение аустенита. Изотермическое превращение аустенита в легированных сталях. Превращение аустенита при неперерывном охлаждении. Термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита. Превращения при отпуске закаленной стали. Технология термической обработки стали. Отжиг стали. Закалка стали. Отпуск стали. Поверхностное упрочнение стальных изделий. Упрочнение поверхности методом пластической деформации. Поверхностная закалка. Химико-термическая обработка стали.

Раздел 5. Промышленные стали и сплавы. Конструкционные стали и их общая характеристика. Низколегированные строительные стали. Цементируемые стали. Улучшаемые стали. Высокопрочные стали. Рессорно-пружинные стали. Подшипниковые стали. Износостойкие стали. Судостроительные стали. Инструментальные стали. Стали и сплавы для режущего инструмента. Металлокерамические твердые сплавы. Стали для измерительного инструмента. Штамповые стали. Коррозия и коррозионностойкие материалы. Виды электрохимической коррозии. Оценка коррозионной стойкости материалов. Методы защиты от коррозии. Коррозионностойкие стали и сплавы цветных металлов. Жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы. Стали и сплавы со специальными свойствами. Литейные сплавы. Характеристика литейных сплавов. Классификация и маркировка литейных сталей. Особенности применения и термообработки литейных сплавов. Порошковые материалы.

Раздел 6. Цветные металлы и сплавы. Магний и его сплавы. Основные свойства магния. Классификация и характеристика магниевых сплавов. Деформируемые и литейные магниевые сплавы. Применение магниевых сплавов. Бериллий и его сплавы. Основные свойства бериллия. Сплавы бериллия. Применения бериллия. Алюминий и его сплавы. Основные свойства алюминия. Классификация алюминиевых сплавов. Деформируемые и литейные алюминиевые сплавы. Маркировка алюминиевых сплавов. Титан и его сплавы. Основные свойства титана. Фазовые превращения в титановых сплавах. Промышленное применение титановых сплавов. Медь и ее сплавы. Основные свойства меди. Латунь. Бронзы. Антифрикционные сплавы.

Раздел 7. Неметаллические материалы. Материалы на основе полимеров. Характеристика полимеров. Пластические массы. Резины. Клеящие материалы. Лакокрасочные покрытия. Стекло. Древесина. Керамические материалы. Композиционные материалы.

2 Практические работы по дисциплине

Тема №1 «Кристаллические структуры».

Цель практического занятия – изучить методику расчета плотности кристаллических вещества и объема кристаллической решетки, научиться оценивать частоту перескоков и коэффициент самодиффузии вакансии и атома при комнатной температуре и вблизи температур плавления, освоить методику расчета среднеквадратичного смещения вакансий и атомов, научиться рассчитывать теоретическую прочность на сдвиг (по Френкелю).

Теоретическая часть

В природе твердые вещества могут находиться в аморфном и кристаллическом состоянии. В аморфных веществах атомы (молекулы) расположены беспорядочно, произвольно. Для кристаллических веществ характерно упорядоченное взаимное расположение атомов, ионов и молекул. К кристаллическим веществам относятся металлы и их сплавы в твердом состоянии.

Строение кристаллического вещества графически изображается в виде кристаллической решетки, которая состоит из элементарных ячеек. Элементарные ячейки по признаку симметрии делятся на семь *сингоний*, каждая из которых характеризуется определенным соотношением между длинами ребер и углами между ними: кубическую, гексагональную, тетрагональную, тригональную, ромбическую, моноклинную и триклинную (рисунок 1). Кубическая решетка является простейшей кристаллической решеткой твердого тела.

Длины ребер в элементарной ячейке кристалла относятся к *параметрам кристаллической решетки*. В частности, кубическую решетку определяет один параметр — длина ребра куба.

Кристаллическая решетка в целом характеризуется параметрами решетки a , b , c ; углами между осями координат α , β , γ ; координационным числом, коэффициентом компактности η и числом формульных единиц Z .

Координационное число — число ближайших равноудаленных соседних атомов, окружающих каждый атом в кристалле. *Коэффициент компактности решетки η* — отношение объема, занятого атомами, ко всему объему решетки. *Число формульных единиц Z* называют число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку.

Объем элементарной ячейки кристаллического вещества определяется исходя из сингонии ее кристаллической ячейки и формально-геометрических соображений.

Большинство металлов образуют одну из следующих кристаллических решеток с плотной упаковкой атомов: объемно-центрированную кубическую (ОЦК), гранецентрированную кубическую (ГЦК) и гексагональную плотно упакованную (ГПУ) (рисунок 2). Зная вид кристаллической решетки, можно рассчитать число атомов в элементарной ячейке.

На одну элементарную ячейку объемно-центрированной кубической ячейки приходится два атома: один в центре куба, а другой —

располагающийся в вершине куба (каждый атом в вершине куба принадлежит одновременно восьми соприженным элементарным ячейкам, и, таким образом, на данную ячейку приходится лишь $1/8$ массы этого атома, а на всю ячейку — $1/8 \cdot 8 = 1$ атом) (рисунок 2, а).

На элементарную ячейку гранецентрированной кубической решетки приходится четыре атома: из них один образуется за счет атомов в вершинах куба, а три — суммарная ($1/2 \cdot 6 = 3$) доля атомов, находящихся в серединах граней, так как каждый из этих атомов принадлежит двум ячейкам.

На элементарную ячейку гексагональной плотноупакованной решетки приходится шесть атомов: $3 + (1/6 \cdot 12) + (1/2 \cdot 2) = 6$.

При определении плотности по данным рентгенографического анализа используется связь значений плотности вещества (металл, минерал) с атомными массами составляющих его элементов и объемом, занимаемым ими.

Для определения рентгенографической плотности необходимо знать

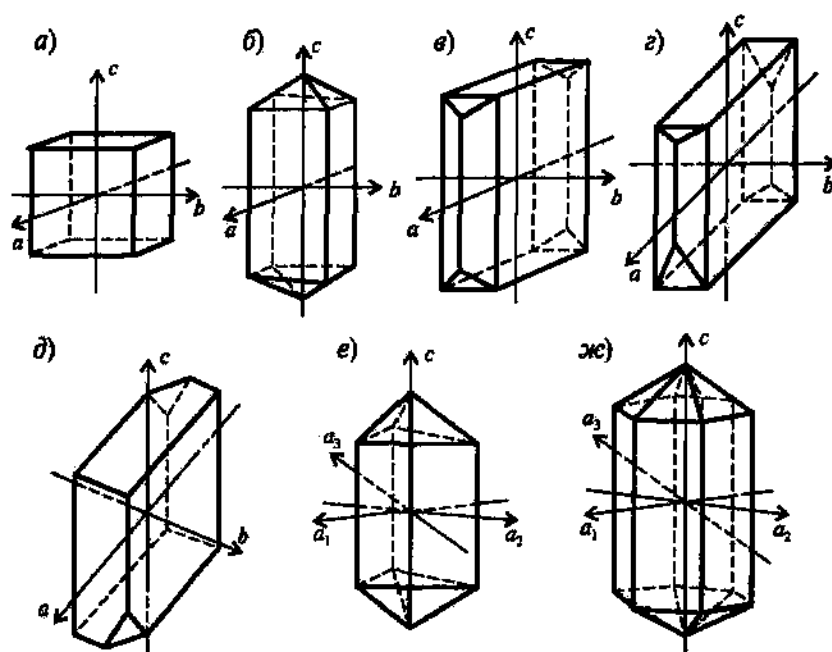


Рисунок 1 — Кристаллографические сингонии: а — кубическая; б — тетрагональная; в — ромбическая; г — моноклинная; д — триклинная; е — тригональная; ж — гексагональная

объем элементарной ячейки V_0 , число атомов Z в ней и массу этих атомов (грамм-атом A известен). Тогда масса атомов в элементарной ячейке равна $(A/N_0) Z$, г, где A/N_0 — масса одного атома, г; N_0 — число Авогадро, ед.

Таким образом,

$$\rho = \frac{AZ}{N_0 V_0}, \text{ г/см}^3 \quad (1)$$

Так как параметры элементарной ячейки измеряются в ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$), то при переводе значений объема элементарной ячейки из А

в кубические сантиметры в знаменателе формулы появляется $V_0 \cdot 10^{-24}$, где V_0 — объем, Å. Тогда уравнение можно упростить:

$$\rho = 1,6602 \cdot \frac{AZ}{V_0}, \text{ г/см}^3 \quad (2)$$

Для химических соединений вместо A подставляют ΣA_i т.е. грамм-формульный вес. Атомная молекулярная масса веществ A_e рассчитывается по справочным данным.

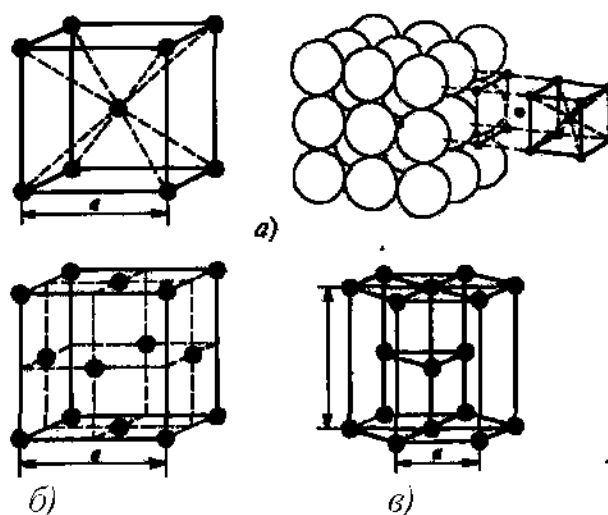


Рисунок 2 – Кристаллические решетки металлов: *а* – объемно-центрированная кубическая; *б* – гранецентрированная кубическая; *в* – гексагональная плотноупакованная

Объем элементарной ячейки для известных кристаллических веществ определяется по справочным данным об их параметрах и сингонии. Для расчета плотности веществ с неизвестными параметрами элементарной ячейки необходимо снять рентгенограмму вещества и рассчитать эти параметры.

Значение рассчитанной таким образом рентгенографической плотности кристаллического материала характеризует идеализированную кристаллическую решетку с реальными параметрами. Справочные значения плотности кристаллических веществ, как правило, будут отличаться от рентгенографической в меньшую или большую сторону. Эта разница может быть вызвана наличием в реальных кристаллах примесей, дефектов кристаллической решетки, внутренних напряжений.

Задание для выполнения практической работы.

В соответствии с вариантом для кристаллического вещества, необходимо:

а) рассчитать плотность металла (при комнатной температуре) по параметрам его кристаллической решетки;

б) рассчитать объем элементарной ячейки металла;

в) оцените частоту нерескоков и коэффициент самодиффузии вакансии и атома при комнатной температуре и вблизи температуры плавления;

г) оценить среднеквадратичное смещение вакансий и атома для четных вариантов – за 1 час, при нечетных вариантов – за 1,5 часа (при комнатной температуре и вблизи температуры плавления);

д) рассчитайте теоретическую прочность на сдвиг (по Френкелю).

Необходимые данные для проведения расчетов представлены в справочном материале приложения А. Индивидуальное задание студент выбирает в соответствии с порядковым номером в списке преподавателя.

- | | | |
|----------------------|---------------|---------------|
| 1) литий; | 8) медь; | 16) кадмий; |
| 2) магний; | 9) цинк; | 17) индий; |
| 3) γ -железо; | 10) ниобий; | 18) олово; |
| 4) β -кобальт; | 11) молибден; | 19) тантал; |
| 5) никель; | 12) палладий; | 20) вольфрам; |
| 6) хром; | 13) алюминий; | 21) платина; |
| 7) α -железо; | 14) ванадий; | 22) золото; |
| | 15) серебро; | 23) свинец. |

Вопросы для самоконтроля:

1. Чем характеризуется кристаллическое и аморфное строение материала?

2. Виды кристаллов в зависимости от типа химической связи между микрочастицами (атомами, ионами, молекулами).

3. В чем сущность кристаллического и аморфного строения? Понятие дальнего и ближнего порядка.

4. Какие характерные типы кристаллических решеток в металлах вам известны?

5. Назвать характеристики (параметры) решеток.

6. Как обозначаются кристаллографические направления и плоскости? Зачем нужны эти понятия?

7. Что такое анизотропия в кристаллах? Текстура в материале? Их общность и различие.

8. Что такое анизотропия в металлах?

9. В чем сущность поликристаллического строения твердых тел?

10. Назвать основные виды дефектов кристаллического строения. На что они влияют?

11. В чем суть дислокационного механизма упругопластической деформации?

12. Влияет ли плотность дислокации на прочность материала? Если да, объяснить механизм влияния.

Теоретическая часть

Традиционные методы конструирования механизмов, машин и инженерных сооружений, основанные на курсе сопротивления материалов, исходят из предположения о материале как сплошном теле, свободном от дефектов. Однако таких идеальных материалов практически нет. Еще до нагружения в конструкционных материалах присутствуют трещиноподобные дефекты в виде инородных включений, газовой пористости и других несплошностей. Типичными примерами трещиноподобных дефектов в металлах являются трещины, образующиеся при затвердевании сварных швов и отливок, в зонах термического влияния при сварке, в стальном прокате вокруг неметаллических включений, а также трещины, возникающие вследствие усталости и коррозии под напряжением.

Такие дефекты можно обнаружить, используя ультразвуковой контроль или какой-либо другой метод неразрушающего контроля, и с помощью методов механики разрушения определить максимально допустимый размер дефекта, при котором катастрофическое разрушение может быть предотвращено. В определенных условиях эти дефекты могут инициировать разрушение даже при нагрузках, значительно меньших прочностных свойств материала, определенных при обычных механических испытаниях. Основная задача механики разрушения – выявить условия, при которых может произойти разрушение, и оценить степень безопасности конструкции.

Дефекты типа трещин являются концентраторами напряжений, которые тем больше, чем острее трещина и больше ее длина. Номинальные напряжения в вершине эллиптической трещины (рис. 3.23) определяются по формуле:

$$\sigma_{\pi} = \sigma_{cp} \left(1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \right) = 2\sigma_{cp} \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (3)$$

где σ_{cp} - среднее приложенное напряжение; c - длина большой полуоси эллипса (трещины); ρ - радиус в вершине эллипса (трещины).

Отсюда коэффициент концентрации напряжений:

$$K = 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (4)$$

В случае достаточно острой и длинной трещины напряжения вблизи ее вершины могут достигать значений, превышающих разрушающее напряжение материала даже при сравнительно малом приложенном напряжении. Для инициирования разрушения совсем не нужно, чтобы средние напряжения по сечению детали достигали значений прочности. Достаточно создать их только в вершине дефекта, чтобы трещина начала распространяться.

Для того чтобы предсказать поведение трещины, определить перспективы ее развития или остановки, необходимо провести анализ напряженного состояния вблизи вершины трещины.

При продвижении трещины имеют место два процесса: высвобождение упругой энергии V , запасенной системой, и затрата энергии U на образование новых поверхностей растущей трещины. Из сопоставления высвобождающейся упругой энергии и поверхностной энергии Гриффитса вывел уравнение энергетического баланса неустойчивого роста трещины.

Хрупкая тонкая пластина единичной толщины находится под действием внешних сил (рисунок 3), создающих напряжения σ . Запасенная упругая энергия в единице объема пластины без трещины

$$A = \sigma \varepsilon / 2 = \sigma^2 / 2E \quad (5)$$

где σ – приложенное внешнее напряжение; ε – деформация; E – модуль нормальной упругости ($E = \sigma / \varepsilon$).

Если в пластине внезапно образуется сквозная эллиптическая трещина длиной $2c$, расположенная под прямым углом к направлению действующих напряжений, то упругая энергия высвободится в зоне трещины, представляющей собой область эллиптической формы объемом $2\pi c^2$. Высвобождающаяся энергия упругой Деформации в пластине

$$V = [\sigma^2 / 2E] \cdot 2\pi c^2 = \pi c^2 \sigma^2 / E. \quad (6)$$

Для образования трещины необходимо затратить энергию, так как при ее появлении возникают две новые поверхности. В пластине единичной толщины затрата энергии $Q = 4c\gamma$.

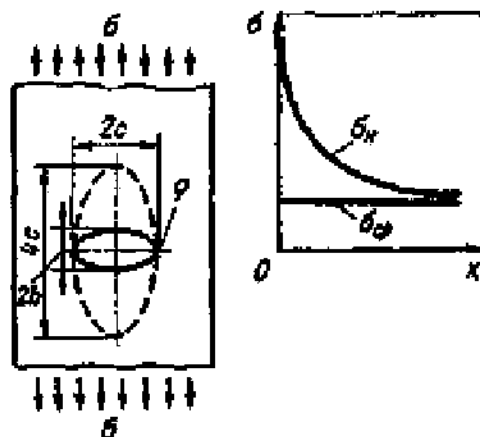


Рисунок 3 – Распределение напряжений у вершины эллиптической трещины

Энергия U расходуется системой, поэтому она имеет знак минус, а энергия Q поглощается, поэтому она является положительной (рисунок 4).

Общая энергия пластины сначала растет, а после достижения трещиной критического размера $C_{кр}$ начинает снижаться. Поведение трещины в растягиваемой пластине зависит от того, в какую сторону будет изменяться общая энергия пластины при малом приращении длины трещины. Если с ростом трещины энергия пластины будет уменьшаться,

то трещина будет расти без внешнего дополнительного воздействия, т. е. самопроизвольно. В поведении трещины возможны три случая:

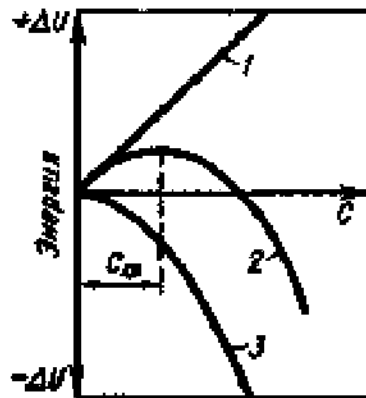


Рисунок 4 – Схема изменения энергии системы при росте трещины (по Гриффитсу): 1 –затраты энергии на образование новых поверхностей; 2 – изменение общей энергии; 3 – высвобождающаяся свободная энергия.

– трещина устойчива и без дополнительной деформации не растет: $(d/dc)(-V + Q) > 0$;

– трещина легко распространяется: $(d/dc)(-V + Q) < 0$;

– условие неустойчивости трещины: $(d/dc)(-V + Q) = 0$.

Из условия неустойчивости трещины следует, что

$$(d/dc)(-V - Q) = (d/dc)[-(\pi c^2 \sigma^2)/E - 4c\gamma] = -(2\pi c \sigma^2)/E - 4\gamma = 0.$$

Отсюда критическое разрушающее напряжение в хрупкой пластине при наличии трещины данного размера

$$\sigma_{кр} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}} \quad (7)$$

Для данного растягивающего напряжения критическая длина трещины $c_{кр} = 2E\gamma/(\pi\sigma^2)$.

Если взять вторую производную от выражения в скобках в формуле для условия неустойчивости, то полученное значение будет со знаком минус. Это означает, что критической длине трещины соответствует максимум энергии, и ее дальнейший рост будет происходить самопроизвольно за счет высвобождения накопленной упругой энергии.

Из найденных выражений следует, что при отсутствии пластической деформации произведение $\sigma\sqrt{c}$ должно быть постоянной величиной для данного материала. Гриффитс проверил постоянство этого произведения испытанием на разрыв внутренним гидравлическим давлением стеклянных трубок с нанесением алмазом царапин разной длины. Во всех случаях произведение $\sigma\sqrt{c}$ оставалось постоянным, что подтвердило справедливость выводов Гриффитса.

Для плоского деформированного состояния при равенстве нулю одной из деформаций, т. е. в случае прямого, без сколов, излома,

перпендикулярного действующим силам, критическое разрушающее напряжение

$$\sigma_{кр} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c(1-\mu^2)}}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Современное состояние теории развития трещин и механики разрушения основано на работах Ирвина, относящихся к 1950-1960 гг. Такие характеристики, как температура остановки трещины, порог хладноломкости, ударная вязкость или ее составляющие и др., позволяют проводить качественное сопоставление разных материалов и определять их преимущественную пригодность для данной конструкции. Однако они не могут быть использованы в количественных расчетах.

Опираясь на работы Гриффитса и других исследователей, Ирвин ввел в механику квазихрупкого разрушения новый параметр – коэффициент интенсивности напряжений. Преимущество использования этого параметра заключается в возможности его экспериментального определения и подстановки в расчеты на прочность. Стало возможным прогнозировать поведение сплошного материала в конструкциях на основе предварительных инженерных расчетов.

Для описания переходов от состояния стабильности образца с трещиной под действием приложенной нагрузки к катастрофическому разрушению Ирвин сопоставил два критерия оценки: энергетический и силовой. Рассмотрев связь этих критериев, он доказал равноценность энергетического и силового подхода.

При плоском напряженном состоянии при распространении трещины изменение упругой энергии dU с увеличением раскрывающихся поверхностей трещины dF происходит по условию:

$$dU/dF = dU/(2dc) = G, \quad (9)$$

где $U = \pi c^2 \sigma^2 / (2E)$.

Отсюда при плоском напряженном состоянии

$$G = \pi c \sigma^2 / E, \quad (10)$$

где c – полудлина трещины; σ – среднее приложенное напряжение, E – модуль нормальной упругости.

При плоском деформированном состоянии

$$G = (1 - \mu^2) \pi c \sigma^2 / E. \quad (11)$$

Смысл параметра G по Ирвину состоит в определении сопротивления движению трещины. Этот критерий связывает вместе приложенное напряжение и размер дефекта, т. е. значения, от которых зависит работоспособность материала.

Самопроизвольное разрушение будет иметь место в том случае, если G достигнет значения G_c , характеризующего критическое сопротивление продвижению трещины. Критерием разрушения является условие $G > G_c$. Можно G интерпретировать как энергию, которую необходимо затратить для распространения трещины на единицу

поверхности раскрытия трещины в момент начала ее самопроизвольного роста. Из сопоставления найденного значения G_c и критического напряжения, определенного по формуле Гриффитса, видно, что они имеют одинаковый вид и что $G_c = 2\gamma$.

Таким образом, обе концепции (Гриффитса и Ирвина) приводят к одинаковым результатам, несмотря на различие исходных предпосылок.

Для удобства экспериментальной оценки и выполнения прочностных расчетов Ирвин ввел другой параметр – *коэффициент интенсивности напряжений* K , являющийся математической интерпретацией критерия G .

Физический смысл параметра K сложен для восприятия, особенно из-за его непривычной размерности: напряжение, умноженное на корень квадратный из длины. Важно понять, что K – это коэффициент, характеризующий интенсивность поля напряжений перед трещиной. Коэффициент интенсивности напряжений K можно сравнить с напряженностью магнитного или электрического поля:

$$G = K^2/E; \quad K^2 = GE \quad (12)$$

Отсюда K имеет единицу измерения МПа · м^{1/2}.

Неустойчивость трещины проявляется при достижении коэффициентом K величины критического коэффициента интенсивности напряжений K_c , обычно называемого вязкостью разрушения. K_c является важнейшей характеристикой материала в механике разрушения. Критерий K_c связывает величину напряжений в момент разрушения и критический размер трещины.

Существует три типа раскрытия трещины (рисунок 5).

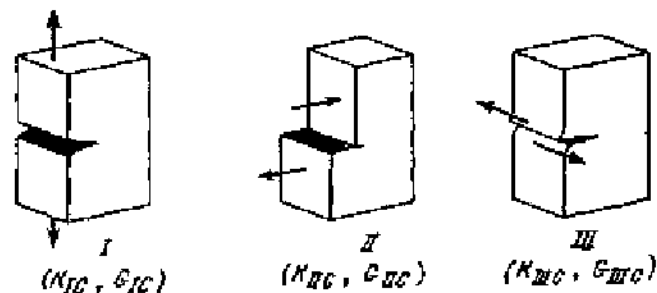


Рисунок 5 – Типы раскрытия трещины (по Ирвину): I – разрушение отрывом; II – поперечный сдвиг; III – антиплоская деформация

Соответствующие им параметры интенсивности напряжений обозначают индексом I, II, III, или K_I , K_{II} , K_{III} , G_I , G_{II} , G_{III} . Тип I соответствует разрушению отрывом, когда растягивающие напряжения перпендикулярны к плоскостям трещины. Тип II представляет собой поперечный сдвиг относительно плоскости трещины, а тип III – антиплоская деформация, при которой происходит сдвиг плоскостей трещины в стороны, когда сдвиговые напряжения параллельны фронту трещины. Из трех типов раскрытия трещины наибольший интерес представляет первый – отрыв с симметричным распределением напряжений относительно плоскости трещины. Он встречается наиболее часто.

Рост трещины связан с пластической деформацией, идущей впереди вершины трещины. Формулы Ирвина применительно к металлам справедливы только в том случае, когда размер упругоэластической зоны мал по сравнению с длиной трещины и оставшимся сечением образца. При плоской деформации зона пластической деформации значительно меньше, чем в случае плоского напряженного состояния.

Воздействие окружающего упругонапряженного материала ограничивает размер зоны пластической деформации. Поэтому в средней части достаточно толстого образца размер пластической зоны минимален, и трещина находится в области плоской деформации. В периферийных областях, где размер пластической зоны значительно больше, материал находится в плоском напряженном состоянии. Разрушение в этих местах происходит по сдвиговому механизму с максимальным поглощением энергии. Следовательно, чем толще образец, тем стесненнее деформация, тем более точным становится анализ на базе механики разрушения.

Для образцов разной толщины возможны различные виды разрушения (рисунок 6): сдвигом, частичным сдвигом, от нормальных напряжений. Вязкость разрушения определяется относительным развитием нормального и наклонного (скосом) участков разрушения. У достаточно толстых образцов с высокоразвитой поверхностью нормального разрушения вязкость разрушения приближается к предельному значению K_{Ic} - вязкости разрушения в условиях плоской деформации. Начиная с этой толщины образца, K_{Ic} и G_{Ic} практически не изменяются и являются константами материала (рисунок 7).



Рисунок 6 – Виды разрушения: а – сдвигом; б – частичным сдвигом; в – от нормальных напряжений

Таким образом, K_{Ic} - это критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации, когда разрушение происходит путем либо смешанного (прямого и косого), либо только прямого излома. Коэффициент K_c не является константой материала, т.е. зависит от размеров образца. Критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации не зависит от геометрии образца и является константой материала. Коэффициент K_{Ic} - предельная характеристика, определяемая при наиболее жестких условиях испытаний, к которой стремится K_c по мере увеличения толщины образца.

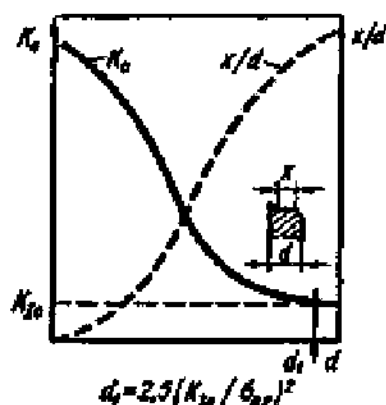


Рисунок 7 – Зависимость вязкости разрушения от толщины образца

Учитывая, что K_{Ic} является крайней страховочной характеристикой, могут быть случаи, когда ее использование недостаточно оправдано, например, когда материалу не приходится работать при той толщине, при которой производилось определение K_{Ic} . Разрушение тонколистовых конструкций происходит в условиях плосконапряженного состояния. Использование K_{Ic} в качестве браковочной характеристики может привести к забраковыванию потенциально годных материалов, способных удовлетворительно работать при небольших толщинах.

Знание характеристик вязкости разрушения позволяет определять максимально допустимые напряжения в конструкции при наличии трещин определенной длины. Приложенные напряжения должны быть ниже разрушающего напряжения, найденного с помощью K_{Ic} . Одновременно может решаться и другая задача, связанная с определением критического размера дефекта при данном приложенном напряжении и сопоставлением его с максимальным размером исходных дефектов в металле.

Материалы с хорошими характеристиками механических свойств могут оказаться непригодными из-за низкого сопротивления развитию трещины. Если при дефектоскопии металла выявится, что длина трещин меньше критического значения, то для оценки надежности конструкции необходимо установить, могут ли условия ее эксплуатации вызвать развитие трещин. Распространение трещин при длине, меньшей критической, возможно при действии таких факторов, как циклические нагрузки, коррозия, водородное охрупчивание и др.

Расчетная часть

Задание:

Для материала приведенного ниже необходимо рассчитать:

- а) максимальный размер дефекта, способный привести к хрупкому разрушению материала;
- б) напряжение разрушения материала;
- в) вязкость разрушения материала;
- г) напряжение разрушения материала при определенных условиях воздействия.

Необходимые данные для расчетов взять из марочника сталей и сплавов.

Материал	Тип	Дли на тре щи ны, мм	Ши рин а пла сти ны, мм	Уго л нак лон а
1) ВСт3сп	Бесконечная пластина с центральной трещиной, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	22	110	–
2) Ст10	Бесконечная пластина с центральным разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой с углом наклона	35	120	60
3) Ст20	Полоса с центральным разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	41	130	–
4) 09Г2С	Бесконечная пластина с краевым разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	19	140	–
5) 13ХМ	Полоса с краевым разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	12	145	–
6) 15Х5М	Полоса с двумя краевыми разрезами, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	18	149	–
7) 12Х18Н10Т	Полоса с центральным разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	15	153	–
8) 08Х18Н10Т	Полоса с двумя краевыми разрезами, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	38	161	–
9) 08Х17Н13М2Т	Бесконечная пластина с центральным разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой с углом наклона	32	165	45
10) А85М	Бесконечная пластина с	59	169	–

	краевым разрезом (трещиной), одноосное растяжение распределенной нагрузкой			
11) АД00М	Полоса с двумя краевыми разрезами, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	57	174	–
12) АМцСМ	Полоса с центральным разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	31	187	–
13) АМр2М	Полоса с краевым разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	47	192	–
14) АМр5М	Бесконечная пластина с центральной трещиной, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	42	210	–
15) М2	Бесконечная пластина с центральной трещиной, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	40	221	–
16) М3	Бесконечная пластина с центральным разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой с углом наклона	46	232	15
17) М3р	Бесконечная пластина с краевым разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	47, 2	241	–
18) Л63	Полоса с двумя краевыми разрезами, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	25	253	–
19) ЛО62-1	Бесконечная пластина с центральным разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой с углом наклона	13, 7	245	32, 5
20) ЛЖМц59-1-1	Полоса с центральным разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	16	213	–
21) ВТ1-0	Полоса с краевым разрезом, одноосное растяжение	7	95	–

	распределенной нагрузкой			
22) OT4-0	Полоса с центральным разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	5	90	–
23) AT-3	Бесконечная пластина с краевым разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	3	80	–
24) 10Г2Ф6Ю	Полоса с краевым разрезом, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	9	100	–
25) Ст40	Бесконечная пластина с центральной трещиной, одноосное растяжение распределенной нагрузкой	45	156	–

Вопросы для самоконтроля:

1. Какие виды разрушения и типы трещин вы знаете?
2. Что понимается под линейным дефектом структуры материала?
3. Что такое двумерный дефект?
4. Приведите примеры объемных дефектов в структуре материала.
5. Как определяется теоретическая прочность материала?
6. В чем заключается разница между теоретической и технической прочностями материала?
7. Объясните смысл теории Гриффитса.
8. Напишите формулу, по которой определяется коэффициент интенсивности напряжения.
9. Какая принципиальная разница между коэффициентом интенсивности напряжения и коэффициентом вязкости разрушения?
10. Как определяется коэффициент вязкости разрушения?
11. Каков принцип расчета на прочность материалов с трещиной?

Тема №3 «Фазовое равновесие сплавов. Фазовые диаграммы двухкомпонентных конденсированных систем»

Теоретическая часть

Для металлургии и металловедения представляет особый интерес выбор температуры плавления в качестве основного свойства, а также температуры равновесия между жидкой и твердой фазами, и температуры фазовых равновесий в твердом состоянии (при полиморфных превращениях, образовании и распаде твердых растворов).

Рассмотрим условия, при которых из двухкомпонентной жидкости выделяются твердые фазы. Учитывая, что давление постоянно, используем правило фаз. Если система состоит только из одной жидкой фазы, то $C = 2$

$+ 1 - 1 = 2$. Это означает, что в известных пределах можно произвольно изменять и температуру, и состав жидкости, оставляя систему однофазной. Таким образом, на диаграмме равновесия (в координатах состав - температура) однофазной двухкомпонентной системе соответствует плоскость.

Если из жидкости при ее охлаждении выделяется одна твердая фаза, то $C = 1$, и, следовательно, это моновариантное равновесие изображается линией. Такие линии ограничивают фазовые поля, т.е. области существования фаз, например, твердой или жидкой. Очевидно, точка пересечения двух линий соответствует одновременному существованию трех фаз - двух твердых и одной жидкой. Такое равновесие является инвариантным ($C = 0$), и изменение любого параметра (температуры или состава) приведет к исчезновению одной из фаз.

Рассмотрим основные диаграммы равновесий (или состояний) в двухкомпонентных системах.

Первый тип диаграмм. Компоненты A и B неограниченно взаимно растворимы в жидком состоянии, а в твердом не образуют ни растворов, ни химических соединений. Известно, что абсолютной не растворимости компонентов друг в друге не существует. Однако для упрощения в некоторых случаях с достаточным приближением можно считать, что из жидкости выделяются чистые компоненты в виде отдельных фаз. Это наблюдается, например, для таких систем, как $Pb-As$, $Cd-Bi$, $Au-Si$ и др.

Диаграмма равновесия для подобных систем схематически представлена на рисунке 8, на котором по оси ординат откладывается температура плавления, а по оси абсцисс - состав.

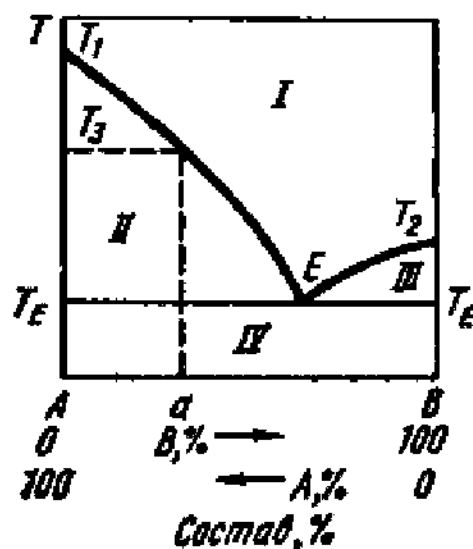


Рисунок 8 – Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов

Жидкий раслав (поле I) характеризуется тем, что в известных пределах можно произвольно изменять его температуру и состав, не

вызывая появления новых фаз ($C = 2$). Линии T_1E и T_2E и горизонталь T_EET_E ограничивают области (поля II и III), соответствующие моновариантным двухфазным равновесиям. В них заданной температуре соответствует определенный состав жидкости, равновесной с кристаллами компонента (A или B), и, наоборот, данному составу жидкости соответствует своя температура кристаллизации. Так, при температуре T_3 состав жидкости, находящейся в равновесии с твердым компонентом A , определяется пересечением горизонтальной прямой, идущей на уровне T_3 с линией T_1E , т.е. соответствует точке a на оси абсцисс.

В поле II существуют две фазы - расплав переменного состава, зависящего от T , и твердый компонент A . Поле III также ограничивает область существования двух фаз - твердого компонента B и расплава переменного состава. Поле IV соответствует механической смеси твердых компонентов A и B .

Диаграммы равновесия преимущественно строятся на основании измерений температуры охлаждающихся сплавов различного состава, ход которых изменяется при выделении фаз, и других превращениях. Результаты этих измерений изображаются на графиках в координатах температура - время в виде так называемых кривых охлаждения. Построение диаграммы первого типа таким способом пояснено на рисунке 9, где в левой части представлены кривые охлаждения.

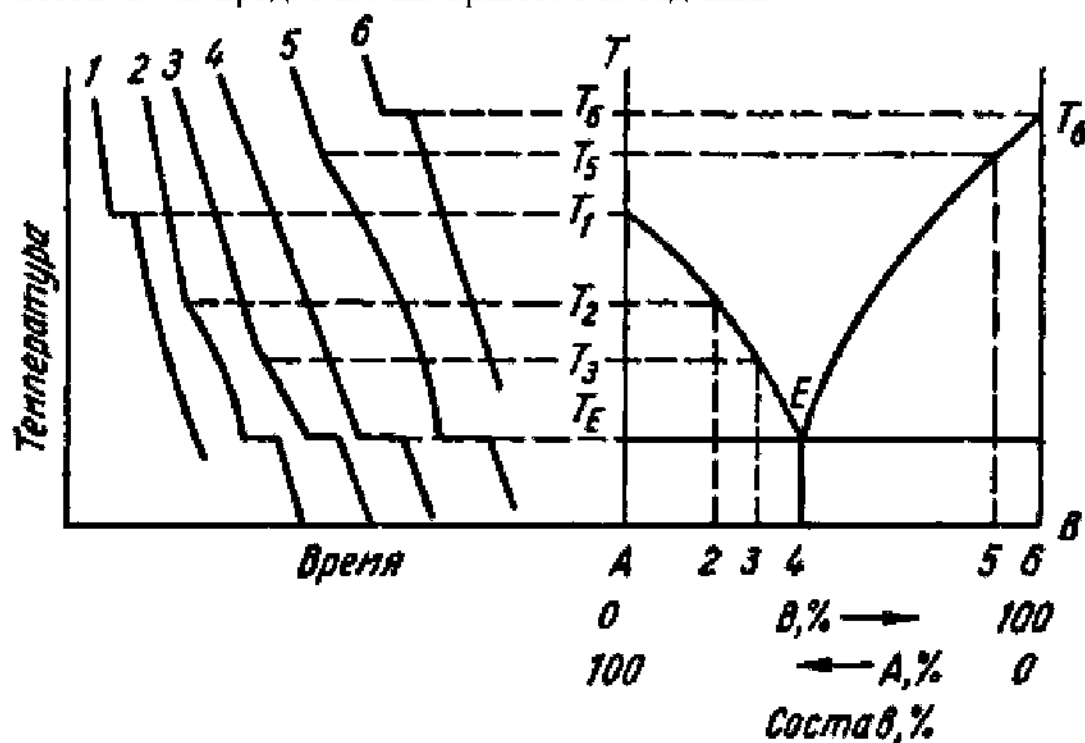


Рисунок 9 – Построение диаграммы состояния по кривым охлаждения

Состав 1 - чистый компонент A . При охлаждении расплава температура монотонно уменьшается до T_1 . Здесь температура остается некоторое время постоянной и равной температуре плавления компонента $A(T)$. Это объясняется тем, что при кристаллизации освобождается теплота

плавления. Такая остановка (горизонтальный участок на кривой 1) длится до полного завершения кристаллизации. Дальнейшее охлаждение твердого компонента A описывается плавной кривой. Найденную температуру плавления T отмечают на левой оси ординат, соответствующей чистому компоненту на диаграмме равновесия.

Состав 2 - расплав содержит компоненты A и B . При охлаждении до температуры T_2 достигается насыщение и начинают выделяться кристаллы чистого компонента A . Процесс охлаждения замедляется (излом на кривой), так как освобождается теплота плавления. Температура T_2 отмечается на диаграмме равновесия на перпендикуляре, восстановленном к оси составов в точке 2. В отличие от предыдущего случая здесь не может быть постоянства температуры при кристаллизации, так как вследствие выделения компонента A расплав непрерывно становится всё более концентрированным относительно компонента B , и поэтому температура его замерзания понижается.

Совокупность подобных точек выделения кристаллов компонента A - линия T_1E , описывающая составы расплавов, равновесных с компонентом A_T . При температуре T_E концентрация компонента B настолько увеличивается, что расплав становится насыщенным и этим компонентом. Следовательно, находится в равновесии одновременно с кристаллами компонентов A и B . Расплав такого состава, называемого эвтектическим, затвердевает целиком без изменения состава и при неизменяющейся температуре, подобно чистому компоненту. Это следует из правила фаз, так как компоненты A_T и B_T представляют собой отдельные фазы (жидкость - третья фаза) и $C = 2 + 1 - 3 = 0$, т.е. равновесие при T_E является инвариантным (остановка на кривой охлаждения).

Ниже T_E жидкость полностью исчезает и существует лишь смесь из двух твердых фаз A и B . Под микроскопом в полностью затвердевшем сплаве можно увидеть относительно крупные кристаллы A , которые выделились из расплава во время его охлаждения от T_2 до T_E . Они находятся в массе, представляющей собой тесную смесь мелких кристалликов A и B , которая образовалась при окончательном затвердевании расплава при T_E . Такая смесь называется *эвтектикой*. Она не является фазой, а есть *механическая смесь двух фаз*.

Состав 3 - кривая охлаждения имеет такой же вид, как для состава 2, с той разницей, что выделение кристаллов компонента A начинается при более низкой температуре, так как по мере повышения концентрации компонента B от состава 2 до 3 температура начала кристаллизации понижается от T_2 до T_3 . Подобные кривые охлаждения и такие же фазы характерны для сплавов, составы которых лежат в интервале концентраций от компонента A до состава 4.

Состав 4 - эвтектический, как отмечалось выше, кристаллизуется при постоянной температуре T_E . Эвтектическая точка E отвечает равновесию трех фаз - одной жидкой и двух твердых ($\Phi = 3$), которое изображается уравнением: Расплав (состава 4) $\longleftrightarrow A_T + B_T$. Для

эвтектического расплава характерна кривая охлаждения такая же, как для чистого вещества. Вследствие одновременной кристаллизации A и B эвтектическая смесь состоит, как уже отмечалось, из мелких, тесно перемешанных кристалликов обоих компонентов. Эта смесь имеет самую низкую температуру плавления из всех сплавов данной системы. При любых других составах эвтектическая составляющая первая начинает выплавляться из любого твердого сплава при его нагревании до T_E .

Состав 5 - при охлаждении этого расплава до температуры T_5 начинается кристаллизация чистого компонента B . По мере его выделения происходит дальнейшее понижение температуры, а остающаяся жидкость обогащается компонентом A . Составы расплавов, находящихся в равновесии с кристаллами компонента B , описываются линией T_6E , подобно тому как расплавы, равновесные с кристаллами A описываются линией T_1E .

Таким образом, при температуре T_E концентрация расплава соответствует точке E , и происходит кристаллизация эвтектики. Все расплавы, имеющие составы в интервале концентраций 4-6, характеризуются такими же кривыми охлаждения, как расплав 5,

Состав 6 - чистый компонент B , кривая охлаждения которого подобна кривой 1. Кристаллизация происходит при постоянной температуре T_6 .

Как видно из рисунка 9, кристаллизация всех сплавов системы $A-B$ заканчивается при температуре T_E . При охлаждении расплава любого состава до этой температуры жидкая фаза принимает одну и ту же концентрацию, отвечающую эвтектике (точка E). Горизонталь $T_E T_E$ называется *линией солидуса*, так как при более низких температурах существуют только твердые фазы, а жидкость полностью исчезает. Линии T_1E и T_6E называются *линиями ликвидуса*, так как при температурах, лежащих выше этих линий, существует только жидкая фаза.

Второй тип диаграмм. Компоненты A и B неограниченно растворимы друг в друге как в жидком, так и в твердом состоянии и не образуют между собой химических соединений. Системы такого типа обычно образуются близкими по своей природе компонентами, например, Cu-Ni, Fe-Ni, Bi-Sb, Ag-Au, FeO-MnO.

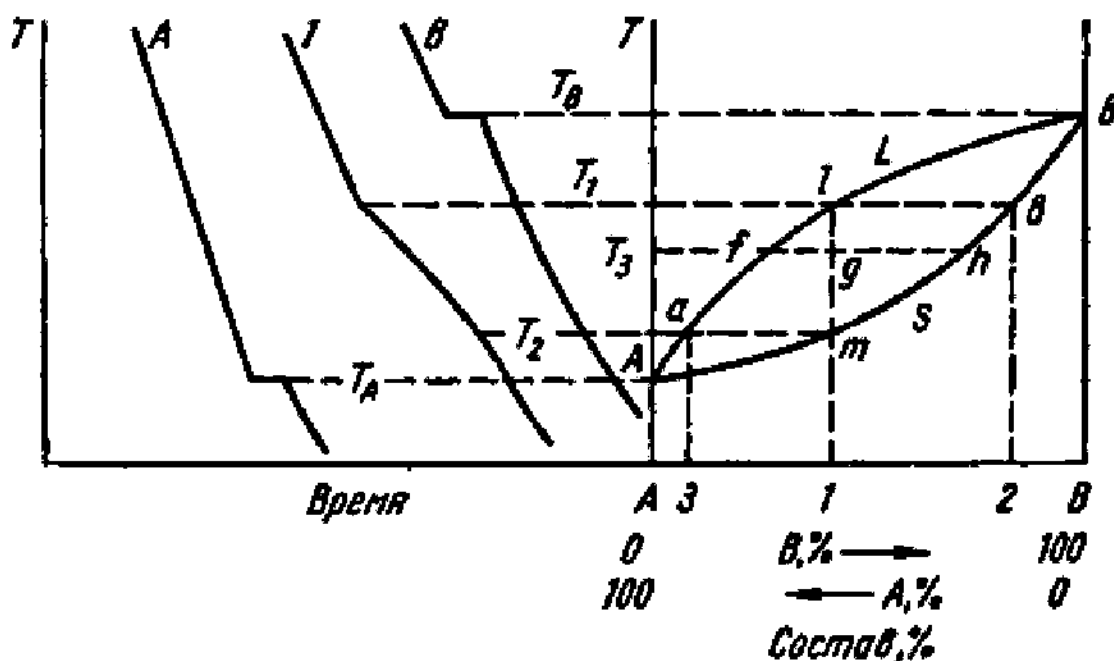
На рисунке 10 схематически представлена диаграмма такой системы. Кривые ALB (ликвидуса) и ASB (солидуса) подобны кривым для составов пара и жидкого раствора, т.е. составы твердого и жидкого растворов, находящихся в равновесии, не одинаковы.

Две кривые охлаждения компонентов A и B (в левой части рис. VII.5) относятся к чистым компонентам, а средняя - к расплаву состава 1. При охлаждении этого расплава до температуры T_1 начинается кристаллизация твердого раствора, и охлаждение замедляется (нерегиб на кривой).

Выделяющаяся фаза представляет собой твердый раствор, поэтому равновесие при его кристаллизации является моновариантным ($C = 2 + 1 - 2 = 1$), т.е. температура плавления зависит от состава.

Вследствие различия составов твердой и жидкой фаз концентрации компонентов в обеих фазах изменяются в ходе кристаллизации, поэтому на кривых охлаждения отсутствуют остановки. После окончания кристаллизации (состав твердой фазы совпадает с исходным составом жидкости) скорость охлаждения вновь увеличивается и на кривой появляется второй излом. Кривые охлаждения всех сплавов в этой системе подобны друг другу и различаются только температурами начала и конца кристаллизации.

Из рисунка 10 видно, что кристаллы твердого раствора, находящегося в равновесии с расплавом состава 1 при температуре T_1 , имеют состав, отвечающий точке 2, т.е. твердая фаза обогащена более тугоплавким компонентом.



Рисунке 10 – Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

В процессе охлаждения системы в интервале $T_1 - T_2$ составы равновесных фаз меняются по линии ликвидуса (отрезок bm) и солидуса (отрезок bm). При этом жидкость обогащается более легкоплавким компонентом. Например, порции жидкости, оставшейся при температуре T_2 (точка a) и находящиеся в равновесии с кристаллами твердого раствора состава 1, имеют состав 3 (рисунок 10). Очевидно, средний состав затвердевшего сплава не отличается от исходного. В зависимости от скорости охлаждения в практике затвердевшие сплавы характеризуются разной степенью неоднородности. То обстоятельство, что во всем интервале температур $T_A - T_B$ составы сосуществующих твердой и жидкой фаз отличаются друг от друга, позволяет осуществлять дробную

кристаллизацию. Повторение такой кристаллизации, т.е. операций расплавления и последующего отделения кристаллизующихся фаз позволяет выделять один из компонентов в почти чистом состоянии.

В обычных условиях кристаллизации не достигается состояние равновесия, поэтому выделяющиеся твердые растворы не имеют вполне однородной структуры. Приблизиться к такой структуре можно лишь при чрезвычайно медленном охлаждении, когда при каждой температуре успевает установиться равновесие, для достижения которого должно произойти изменение состава ранее выделившихся кристаллов твердого раствора. Скорость последнего процесса определяется диффузией компонентов в твердом состоянии, которая протекает весьма медленно. Этим объясняется тот факт, что в практических условиях при кристаллизации сплавов наблюдается явление ликвации, состоящее в отличии по составу наружных и внутренних областей кристаллов твердых растворов (например, стальных слитков). В некоторых случаях ликвацию устраняют путем длительной выдержки сплавов при высоких температурах ниже линии солидуса.

Каждый прямолинейный горизонтальный участок на рисунке 10, соединяющий кривую ALB (ликвидус) и кривую ASB (солидус), называется *коннода*. Такой отрезок, например Ib , есть геометрическое место точек, изображающих двухфазные системы, состоящие из жидкого и твердого раствора постоянных составов. При движении вдоль конноды изменяются соотношения между массами жидкой и твердой фаз, но составы фаз остаются постоянными.

В тех случаях, когда компоненты имеют близкие температуры плавления, диаграммы равновесия рассмотренного типа часто характеризуются наличием максимумов или минимумов. Пример такой диаграммы с минимумом для системы $Cu-Ag$ приведен на рисунке 11.

Сплав, который имеет состав, отвечающий точке экстремума, кристаллизуется при постоянной температуре без изменения состава и поэтому не может быть разделен дробной кристаллизацией.

Сплавы, характеризующиеся неограниченной растворимостью в твердом состоянии, за исключением систем, имеющих диаграммы с экстремумами, кристаллизуются в некотором интервале температур, и сплаву каждого состава присущи определенные температуры начала и конца затвердевания.

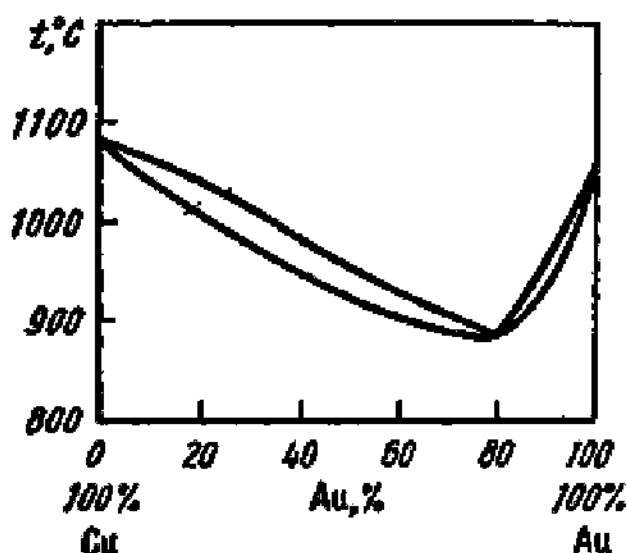


Рисунок 11 – Диаграмма состояния медь-золото

Третий тип диаграмм. Компоненты A и B имеют ограниченную взаимную растворимость в твердом состоянии.

Рассмотренные выше две диаграммы относятся к предельным случаям абсолютной нерастворимости и полной растворимости компонентов в твердом состоянии. Существуют многочисленные системы, которые занимают промежуточное положение между этими двумя типами. В таких системах однородные твердые растворы компонента B в A , обозначаемые как α -растворы, образуются лишь до определенной концентрации B и твердые растворы A и B (β -растворы) до определенной концентрации A .

Для таких систем возможны два случая.

1. Твердые растворы образуют эвтектику, т.е. точка невариантного равновесия E лежит ниже температуры плавления чистых компонентов.

Твердые растворы с перитектикой - невариантная точка P лежит между температурами плавления чистых компонентов.

Поле I - область существования одной фазы, в поле II сосуществуют жидкий расплав и твердая фаза α в поле III - жидкий расплав и твердая фаза β , в поле IV - однородный твердый раствор α в поле V - однородный твердый раствор β , и в поле VI - механическая смесь двух твердых фаз α и β .

В эвтектической точке имеет место невариантное равновесие трех фаз: жидкого расплава E , твердого раствора α , концентрация которого соответствует точке H' , и твердого раствора β с концентрацией, отвечающей точке G .

На рисунке 12 представлены две характерные кривые охлаждения. Сплав состава 1 кристаллизуется в интервале температур $T_1 - T_2$, в котором из расплава выделяется твердый раствор α . На кривой охлаждения имеются два перегиба, соответствующие началу и концу кристаллизации. Кроме того, при температуре T_4 твердый α -раствор становится

насыщенным и из него выделяется некоторое количество твердого раствора β состава 3, что сопровождается небольшим тепловым эффектом.

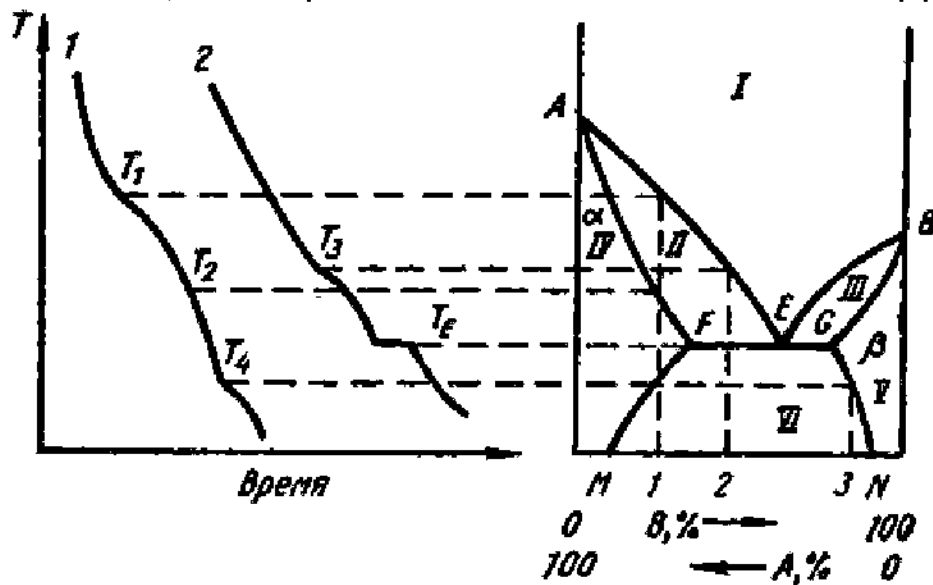


Рисунок 12 – Диаграмма состояния с эвтектикой из двух твердых растворов

подобного типа наблюдаются, например, в системах Cu-Ag, Pb-Sn.

При охлаждении сплава 2 кристаллизация α -фазы начинается при температуре T_3 и заканчивается при T_E . При этой температуре из расплава одновременно кристаллизуются два твердых раствора α и β , составы которых соответствуют точкам F и G.

Расплав эвтектического состава затвердевает без изменения своей концентрации, и температура при его кристаллизации остается постоянной. При охлаждении затвердевших сплавов ниже линии солидуса HG происходит изменение концентрации твердых растворов α и β и соответственно по линиям FM и GN , которые дают температурную зависимость растворимостей B в A и A в B в твердом состоянии. Теплота, выделяющаяся при распаде твердых растворов, невелика и редко обнаруживается на кривых охлаждения. Кривые охлаждения сплавов, составы которых лежат правее точки E, подобны кривым 1 и 2.

Второй случай представлен на рисунке 13. Здесь также из расплава кристаллизуются два твердых раствора. Поле I - область жидкой фазы. В поле II сосуществуют жидкость и твердый раствор α , в поле III - жидкость и твердый раствор β , в поле IV - однородный α - раствор, в поле V - однородный β - раствор и в VI - механическая смесь двух твердых растворов α и β .

Как видно из хода кривых охлаждения, сплав 1 затвердевает так же, как и сплав 1 на предыдущей диаграмме.

Кривая охлаждения сплава 5 абсолютно подобна кривым на диаграммах второго типа, т.е. твердый раствор β кристаллизуется в определенном интервале температур. В сплавах 2, 3, 4 при охлаждении сначала кристаллизуется твердый раствор α . При понижении температуры до некоторого значения T_p этот раствор претерпевает превращение,

которое называется перитектическим. Оно описывается реакцией $\alpha + \text{расплав} \longleftrightarrow \beta$, которая протекает при постоянной температуре и состоит во взаимодействии кристаллов ранее выделившегося α -раствора с жидкостью состава P и образовании нового, твердого раствора β состава F . Так как здесь $\Phi = 3$ и $K = 2$, то равновесие является невариантным и, следовательно, $T_P = \text{const}$.

В силе 4 после окончания перитектической реакции остается избыток жидкой фазы, и при дальнейшем его охлаждении в интервале температур $T_P - T_2$ происходит кристаллизация, твердого β -раствора. Ниже T_2 происходит охлаждение однородного твердого раствора p . При дальнейшем понижении температуры (ниже линии FN , точка T_3) этот раствор становится неустойчивым и, распадаясь, выделяет некоторое количество раствора α -состава, отвечающего линии GM (точка Q). В сплавах 2 и 3 после окончания перитектической реакции полностью исчезает жидкая фаза и ниже температуры T_P остаются в равновесии два твердых раствора α и β , составы которых по мере снижения температуры изменяются в соответствии с ходом линий GM, FN . Примером системы с перитектикой может служить Cd-Hg .

Четвертый тип диаграмм. Компоненты A и B образуют прочные химические соединения, устойчивые вплоть до температуры плавления.

Диаграмма состояния системы, где компоненты образуют одно химическое соединение A_mB_n , представлена на рисунке 13. Точка C соответствует составу химического соединения A_mB_n постоянного состава. Избыток любого из компонентов (A или B) понижает температуру плавления соединения. Именно поэтому температура его плавления является наиболее высокой, что отражает наличие максимума на линии ликвидус. Если сделать разрез по линии $C - A_mB_n$, то диаграмму можно рассматривать как сочетание двух диаграмм первого типа для систем $A - A_mB_n$ и $A_mB_n - B$, в которых полностью отсутствует растворимость в твердом состоянии.

Таким образом, с двух сторон от линии $C - A_mB_n$ имеются две различные системы, переход между которыми совершается скачком. Точки, соответствующие подобным скачкам или изломам на кривых состав - свойство, в данном случае состав - температура плавления, указывающие на образование химического соединения, называются *сингулярными*.

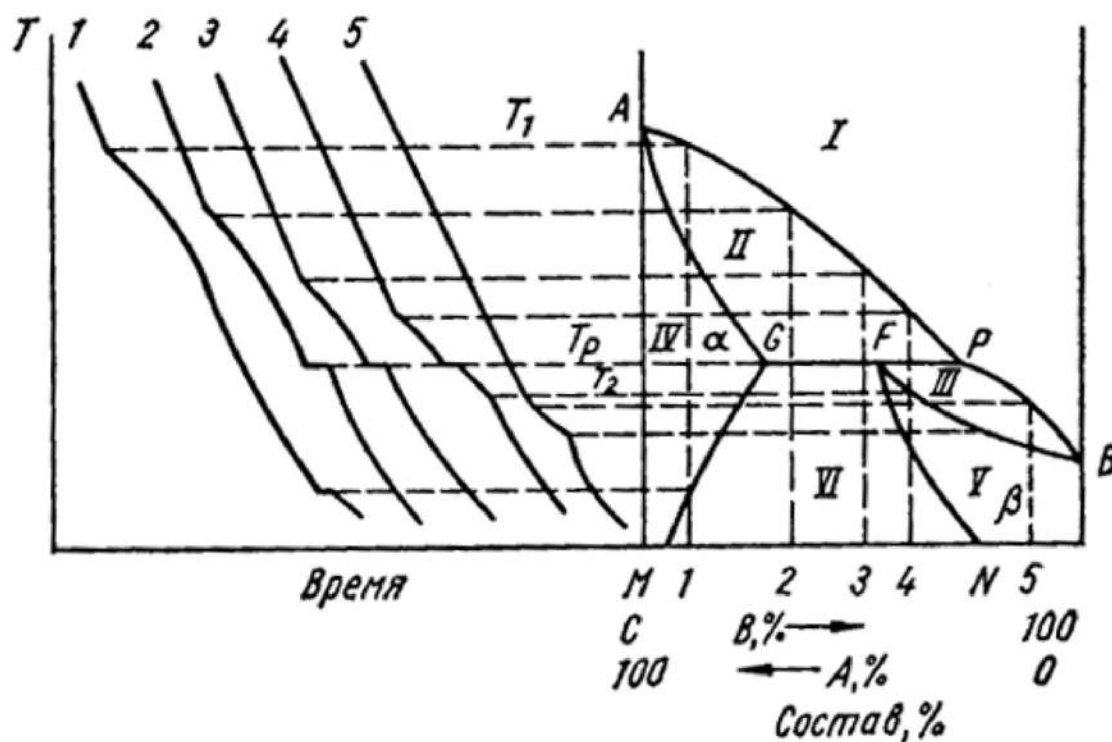


Рисунок 13 – Диаграмма состояния с перитектикой

Соединения, в которых отношение между количествами компонентов выражается целыми числами, называются стехиометрическими или *дальтонидами*, так как они удовлетворяют закону кратных отношений, открытому Дальтоном.

На рисунке 14 представлена диаграмма системы, в которой химическое соединение и образующие его компоненты неограниченно взаимно растворимы в твердом состоянии.

На основании изучения диаграмм состояния многих систем, главным образом металлических, Н.С. Курнаков первый показал, что могут существовать соединения обоих типов. Открытие бертоллидов обогатило науку и расширило представления о природе химических соединений и кристаллического состояния тел. В настоящее время бертоллиды приобрели большое практическое значение.

Многие формулы кристаллических соединений, имеющих значение для металлургии обычно записывают с целочисленными стехиометрическими индексами. Например, FeS , FeO , PbS , TiO , TiO_2 и многие другие. В действительности в сульфиде железа индекс при сере может быть и больше и меньше единицы. Оксид железа - вюстит - имеет состав, близкий к $\text{FeO}_{0,95}$. Состав сульфида свинца колеблется от $\text{Pb}_{0,9990}\text{S}$ до $\text{Pb}_{0,9990}\text{S}$. Оксид титана TiO_2 может иметь составы от $\text{TiO}_{1,9}$ до $\text{TiO}_{2,1}$. Следует заметить, что бертоллиды встречаются преимущественно в соединениях металлов, а дальтониды среди соединений легких элементов с молекулярной структурой H_2O , NH_3 , CO_2 , H_2S и т.п.

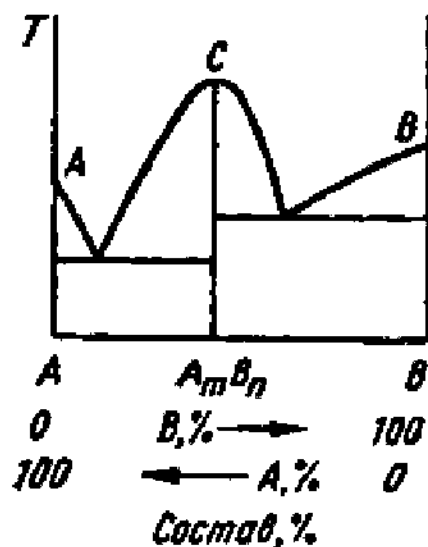


Рисунок 14 – Диаграмма состояния с устойчивым химическим соединением при полном отсутствии растворимости в твердом состоянии

Расчетная часть

Задание:

1) Для всех отмеченных арабскими цифрами на диаграмме точек рассчитайте:

- а) число степеней свободы;
- б) количество компонентов;
- в) число фаз и их химический состав ($P = \text{const}$)

2) Постройте кривые охлаждения для расплавов, обозначенных римскими цифрами и рассчитайте число степеней свободы на каждом характерном участке кривой охлаждения. Поясните как будет изменяться состав жидкой фазы при кристаллизации.

3) Определите температуру начала плавления сплава, заданного точкой 8.

4) Рассчитайте массу компонентов фаз в точке 2. Исходный расплав взят в количестве 1 кг (содержание дано в массовых процентах m).

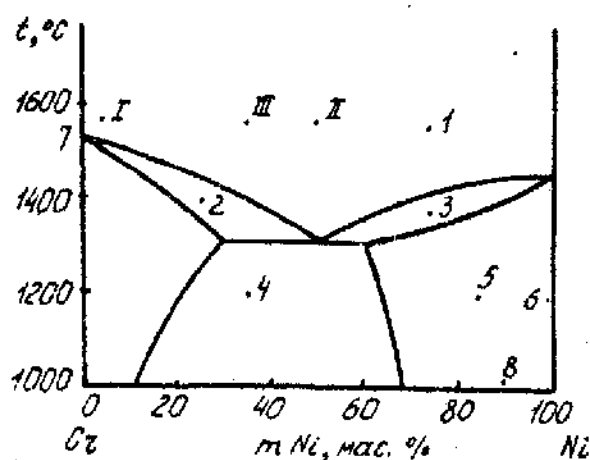


Рис.1.

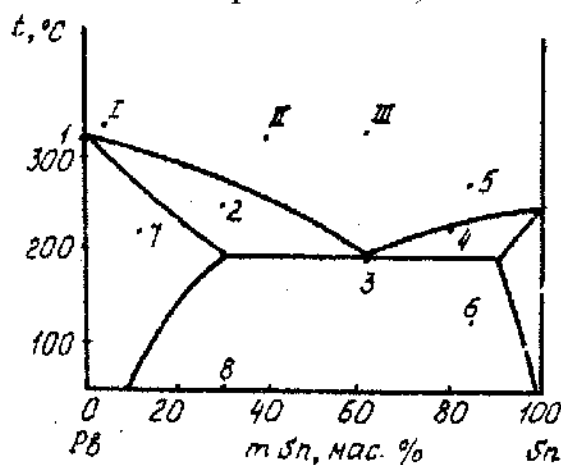


Рис.2.

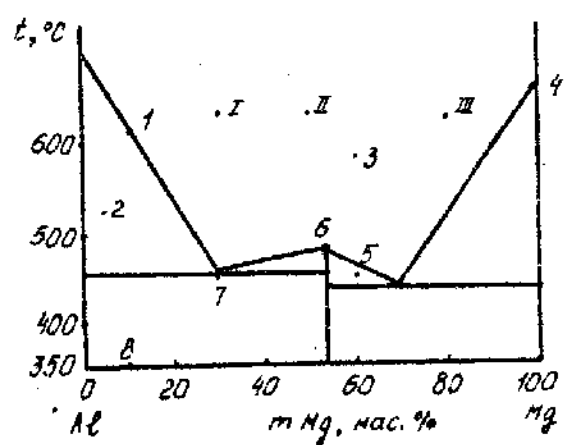


Рис.3.

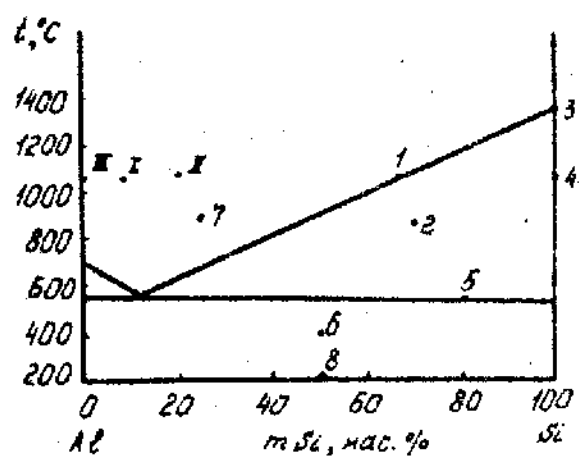


Рис.4.

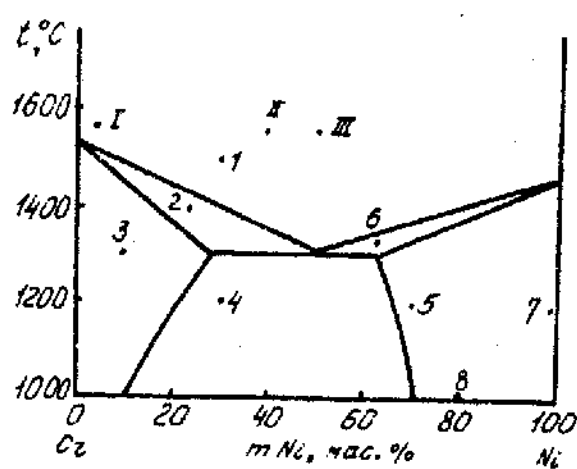


Рис.5.

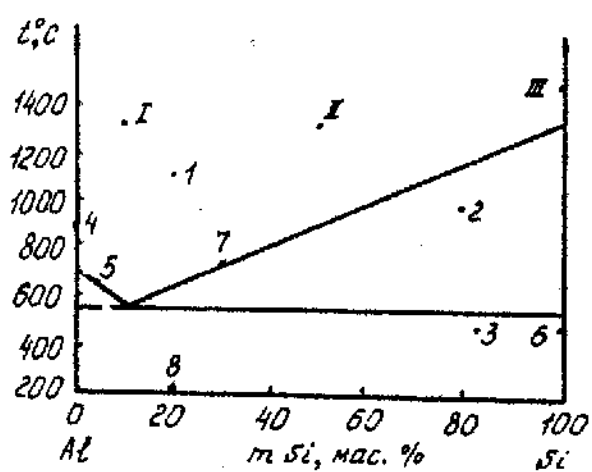


Рис.6.

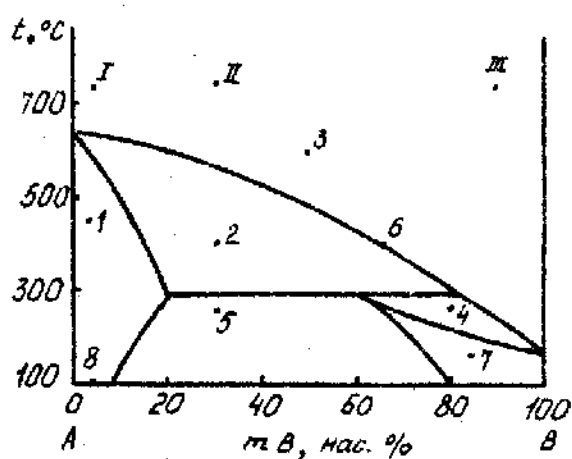


Рис.7.

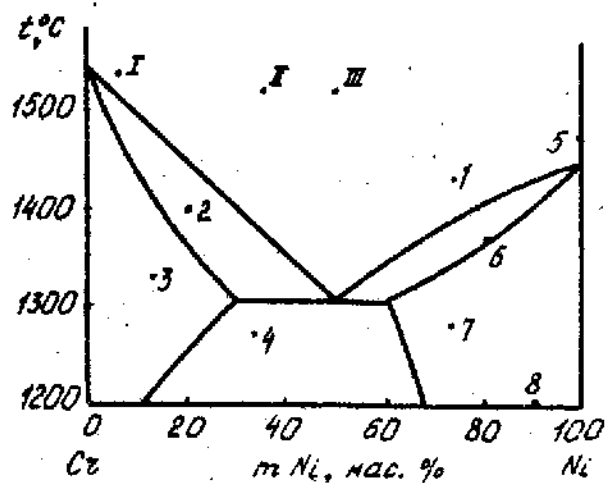


Рис.8.

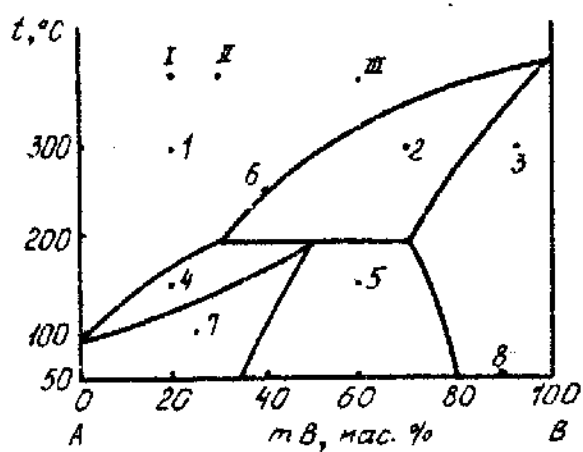


Рис.9.

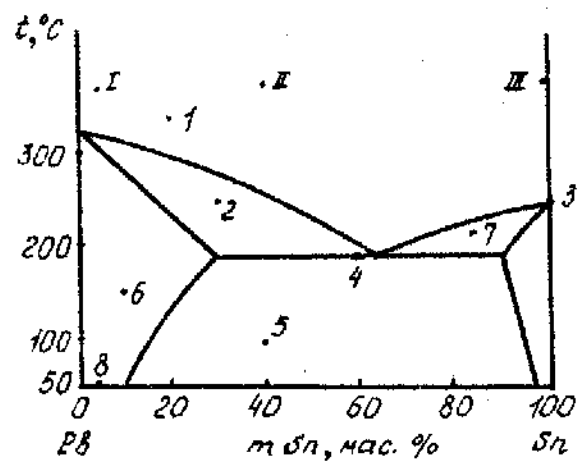


Рис.10.

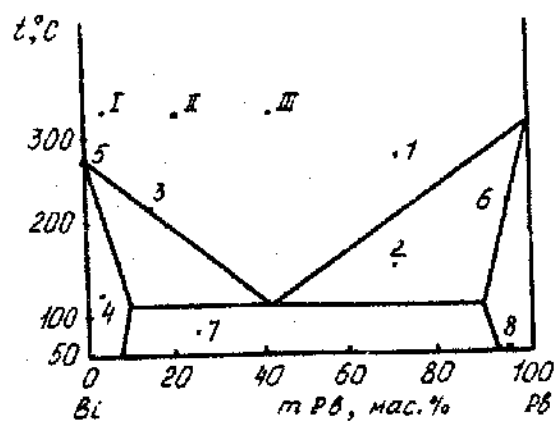


Рис.11.

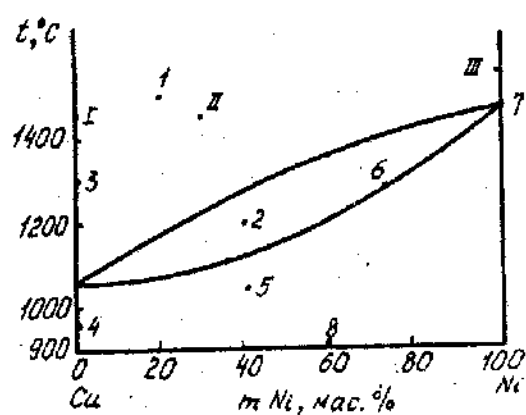


Рис.12.

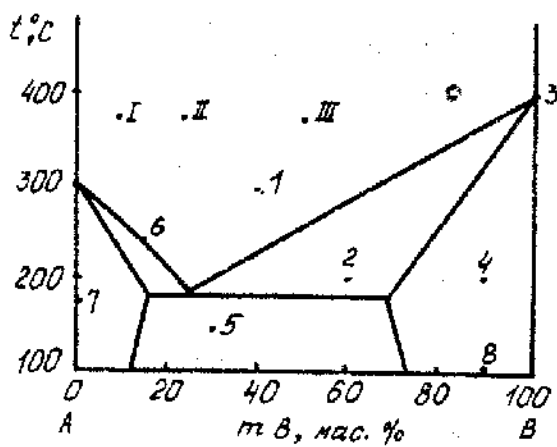


Рис.13.

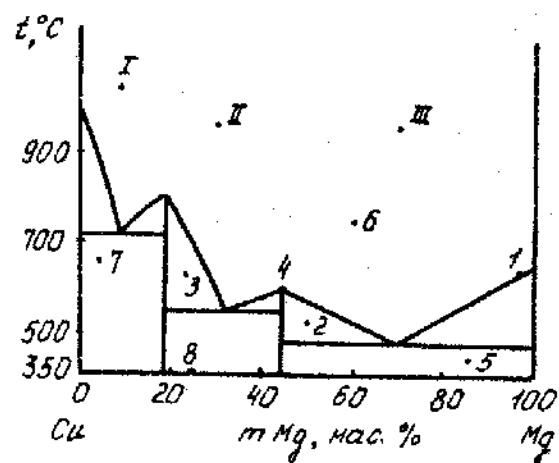


Рис.14.

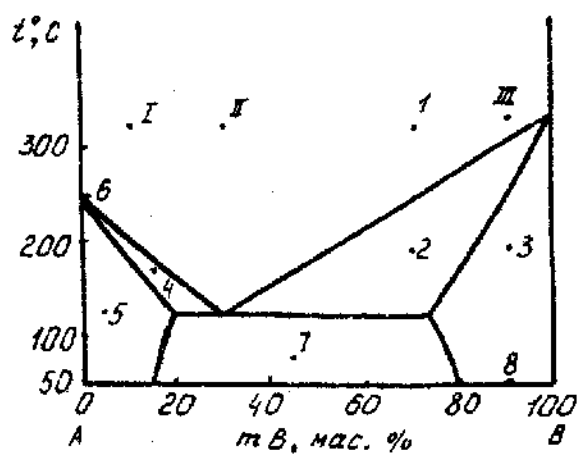


Рис. 15.

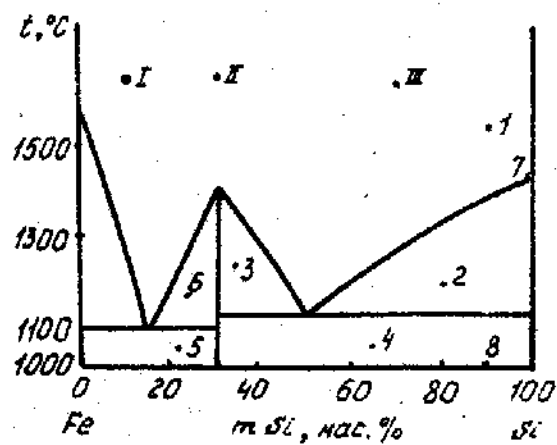


Рис. 16.

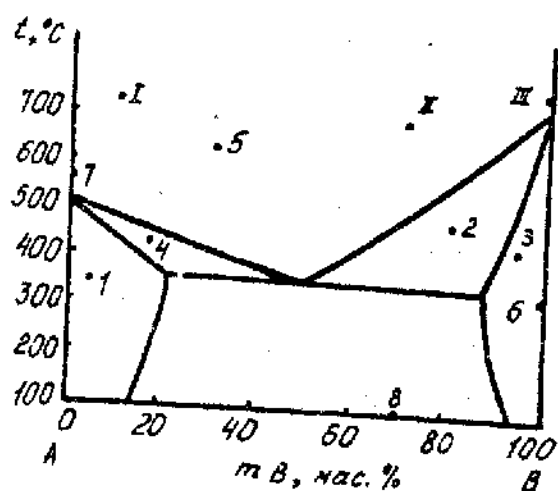


Рис. 17.

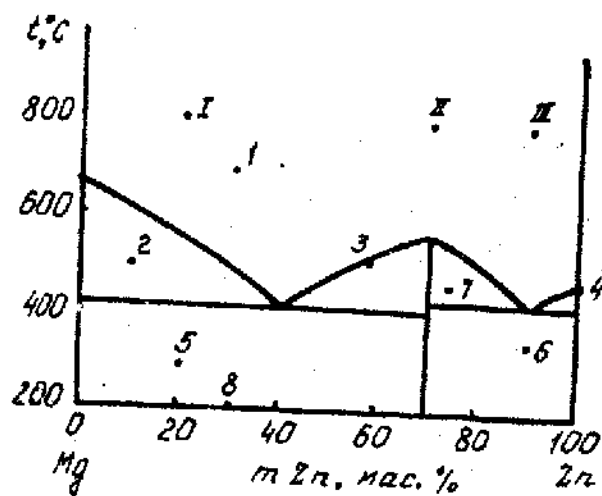


Рис. 18.

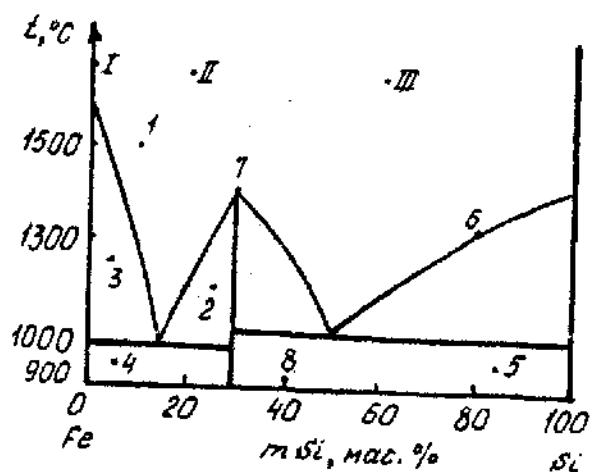


Рис. 19.

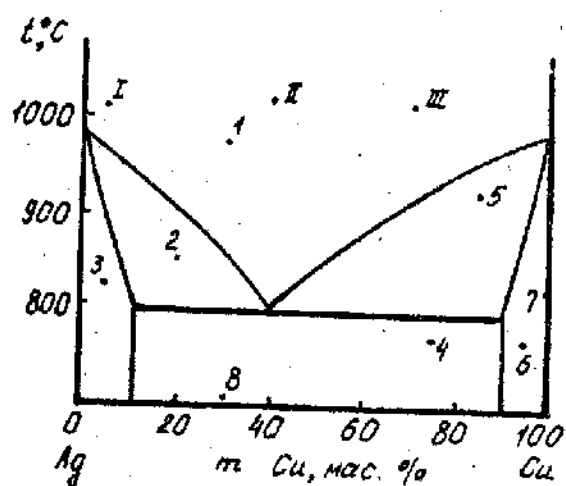


Рис. 20.

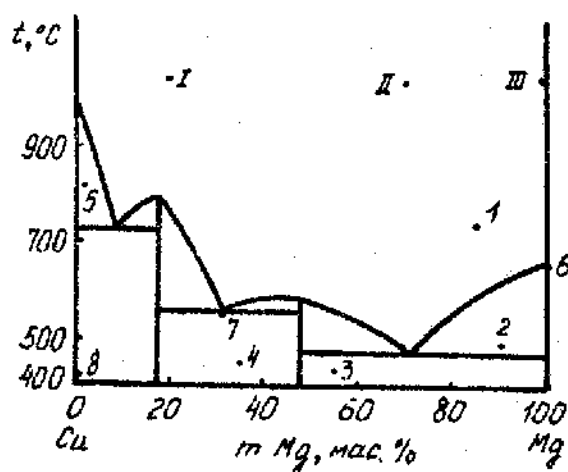


Рис. 21.

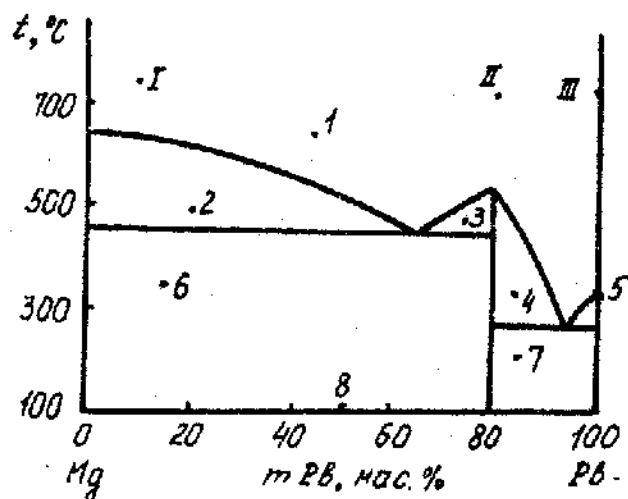


Рис. 22.

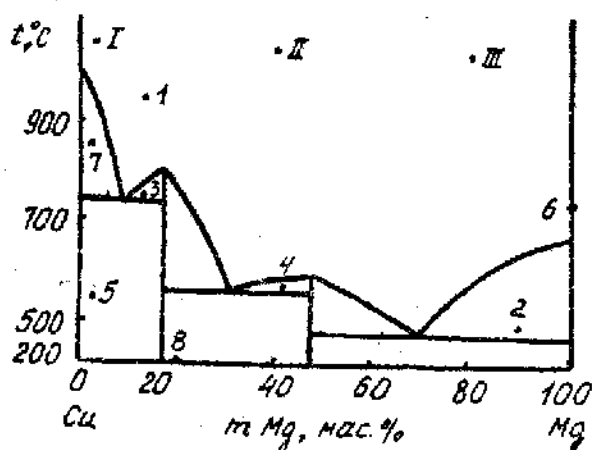


Рис. 23.

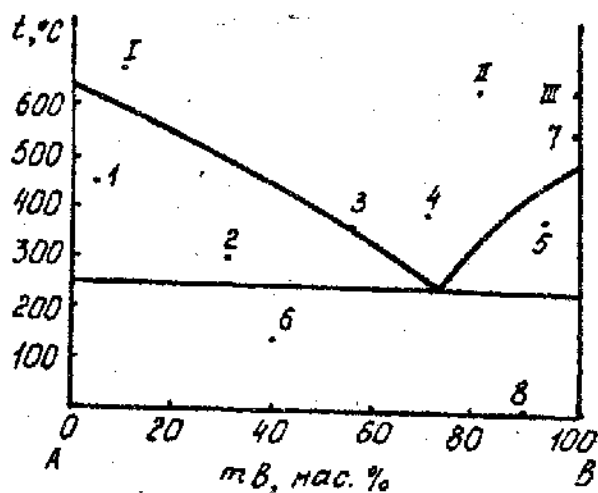


Рис. 24.

Вопросы для самоконтроля:

1. Дать определение понятий: гетерогенная система, компонент, фаза, степень свободы. В чём отличие понятий «двухкомпонентная система» и «двухфазная система»?
2. Напишите выражение правила фаз и определите, какие системы называются невариантными и какие моновариантными?
3. Записать правило фаз Гиббса, объяснить физический смысл входящих в него параметров и привести пример использования этого правила для проверки правильности построения диаграммы состояния.
4. В чём суть метода проведения термического анализа?
5. Объяснить понятие «диаграмма состояния» и принцип её построения.
6. Начертить кривые охлаждения для систем различного состава, обладающих одной эвтектикой. Объяснить процессы, протекающие на отдельных участках кривых.
7. В чём состоит различие кривых охлаждения однокомпонентных и двухкомпонентных систем? Назовите причину этого различия.

8. Порядок построения диаграммы состояния двухкомпонентной системы.

9. Каково значение поверхностей, линий и точек на диаграмме состояния двухкомпонентной системы?

10. Что такое эвтектика, эвтектическая концентрация, эвтектическая температура?

11. Объяснить смысл терминов: эвтектическая, доэвтектические и заэвтектические смеси.

12. Что называется точкой перитектики?

13. Указать типы диаграмм плавкости. Описать одну из диаграмм плавкости по выбору преподавателя.

14. На примере диаграммы состояния объяснить правило рычага.

Тема №4 «Анализ диаграммы фазового равновесия сплавов системы «железо-цементит»»

Теоретическая часть

Имеется много методов построения диаграммы состояния (дилатометрический, электрический, магнитотермический, термический и др.). Сущность любого из них сводится к нахождению критических точек при нагреве или охлаждении металлов и сплавов. Критическими точками называются температуры, при которых начинаются и/или заканчиваются какие-либо превращения в сплавах. Определив экспериментально критические точки серии сплавов, строят полную диаграмму состояния в координатах «температура – концентрация». Диаграмма состояния железо-цементит (рисунок 15) охватывает сплавы, содержащие углерод в количестве от 0 до 6,67 %. При содержании 6,67 % углерода он образует химическое соединение с железом Fe_3C – карбид железа, называемый также цементитом. Один из компонентов сплавов – железо – имеет несколько аллотропических модификаций:

- до 911°C железо имеет объемно-центрированную кубическую кристаллическую решетку (ОЦК) с периодом 0,286 нм;

- в интервале температур $911\ldots 1392^\circ\text{C}$ – гранецентрированную кубическую (ГЦК) кристаллическую решетку, а выше 1392°C – снова объемноцентрированную кубическую кристаллическую решетку, но с другим периодом – 0,293 нм.

В зависимости от содержания углерода железоуглеродистые сплавы подразделяются на техническое железо ($\leq 0,02\%$ C), углеродистые стали (от 0,02 до 2,14 % C) и чугуны (от 2,14 до 6,67 % C). Стали подразделяются на доэвтектоидные (0,02-0,8 % C), эвтектоидные (0,8 % C), заэвтектоидные (0,8...2,14 % C). Чугуны по содержанию углерода классифицируются на доэвтектические (2,14...4,3 % C), эвтектические (4,30 % C), заэвтектические (4,30...6,67 % C).

Процессы, происходящие в сплавах при их фазовых превращениях, подчинены общему закону равновесия, который носит название правила

фаз и выражает зависимость числа степеней свободы системы «с» от количества компонентов «к», фаз «ф» и внешних переменных факторов «п» в условиях равновесия:

$$c = k + p - f.$$

При рассмотрении равновесия в металлических сплавах, находящихся под воздействием атмосферного давления, единственным внешним переменным фактором является температура и поэтому $p = 1$. Система железо-цементит является двухкомпонентной, то есть $k = 2$. Отсюда следует, что

$$c = 2 + 1 - f = 3 - f.$$

Для построения кривой охлаждения (или нагрева) сплава, прежде всего, необходимо найти на концентрационной оси диаграммы состояния координату, соответствующую содержанию углерода в сплаве. Затем из найденной точки следует восставить перпендикуляр до области существования жидкой фазы. Кривая охлаждения (или нагрева) строится справа от диаграммы состояния в координатах температура (ось абсцисс) - время (ось ординат). Масштаб оси времени произвольный, а масштаб оси температуры такой же, как и на диаграмме состояния. Во время охлаждения сплава в нем происходят фазовые превращения. Каждое превращение протекает за определенный промежуток времени, поэтому соответствующие им участки кривой охлаждения имеют различные углы наклона по отношению к горизонтальной оси. Чем быстрее происходит превращение, тем круче кривая. Перитектическое и эвтектическое превращения идут во времени при постоянной температуре (так как $c = 0$), следовательно, им на кривой охлаждения будут соответствовать горизонтальные участки.

Построение кривой охлаждения рассмотрим на примере чугуна, содержащего 5 % углерода. Восстанавливаем перпендикуляр из отметки 5 % углерода на оси абсцисс до точки 1, находящейся в области жидкого состояния сплавов. Переносим пунктиром температуру точки 1 на ось температур нашего графика. В точке 1 рассматриваемый сплав находится в жидкий раствор-жидком состоянии (то есть существует только одна фаза углерода в железе), следовательно $c = 3 - 1 = 2$. При двух степенях свободы равновесие в системе не нарушается даже при одновременном изменении температуры и концентрации сплава в определенных пределах. При понижении температуры в сплаве не будет происходить никаких превращений, и температура будет падать быстро, кривая охлаждения идет круто вниз до точки 2. Точкой 2 обозначено пересечение нашей вертикали с линией CD диаграммы состояния, соответствующей началу кристаллизации цементит,-цементита. Следовательно, в сплаве появляется вторая фаза число степеней свободы уменьшается ($c = 3 - 2 = 1$), кривая охлаждения станет более пологой до температуры, соответствующей следующей критической точке 3. На участке кривой 1-2 указываем фазовое состояние сплава «ж» и число степеней свободы, равное 2, соответственно на участке 2-3 фазовое состояние «ж + ц», а

число степеней свободы $s = 1$. При изменении температуры в пределах точек 2 и 3 изменяется соотношение между жидкой и твердой фазами, но равновесие не нарушается.

Точка 3 (пересечение вертикали с линией ECF) соответствует эвтектическому превращению, то есть совместной кристаллизации цементита и аустенита с образованием ледебурита. При этом одновременно существуют три фазы: жидкость, цементит и аустенит, следовательно число степеней свободы $s = 3 - 3 = 0$, и система инвариантна, три фазы могут находиться в равновесии только при строго постоянной температуре. На кривой охлаждения это отражено отрезком 3-3*. Между точками 3 и 4 сплав имеет двухфазное состояние (аустенит и цементит) и $s = 3 - 2 = 1$. При температуре, соответствующей точке 4, в сплаве происходит эвтектоидное превращение,

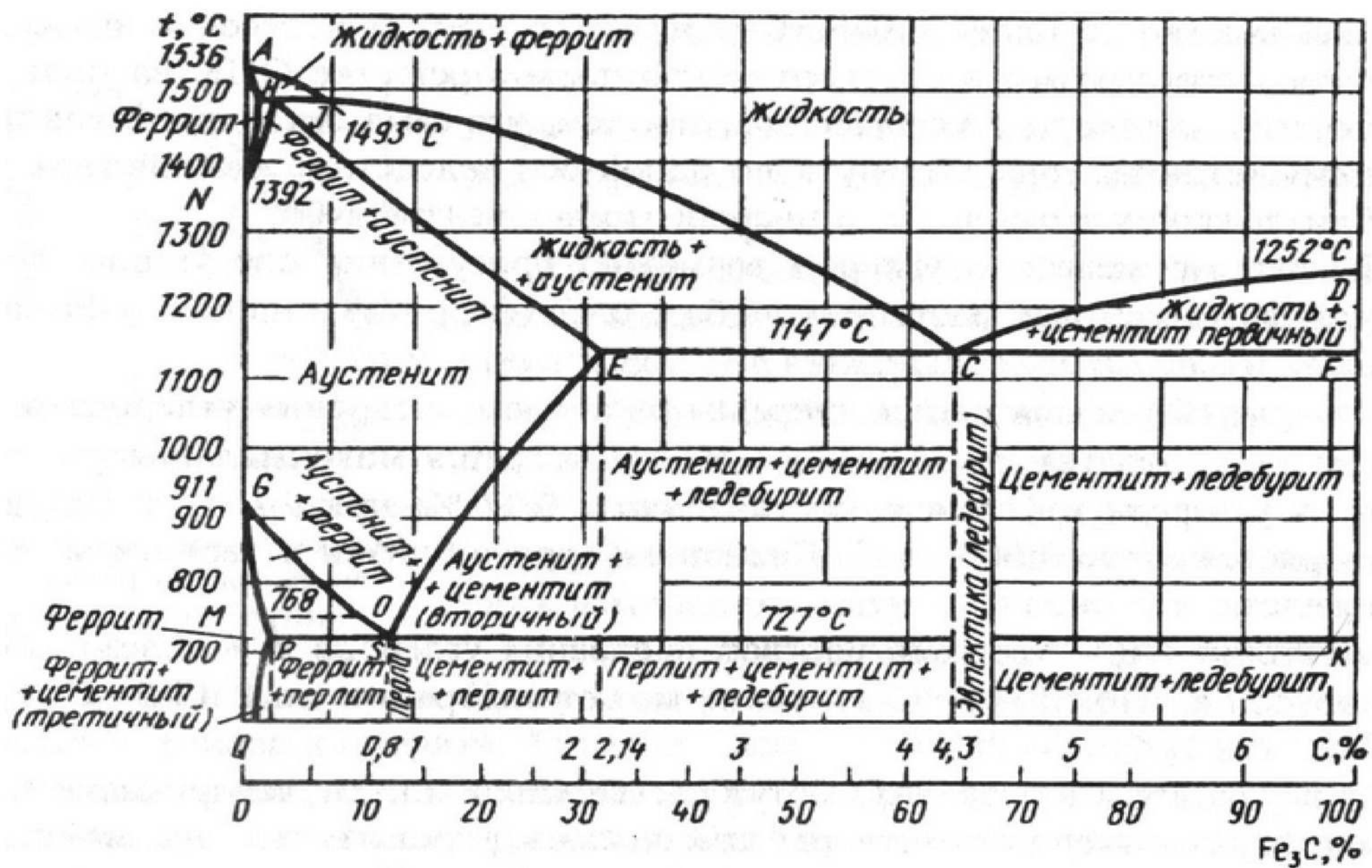


Рисунок 15 – Диаграмма состояния системы железо-цементит

аналогичное эвтектическому. Отличие только в том, что в нем участвуют только твердые фазы: аустенит, цементит и феррит. На кривой охлаждения делаем соответствующие записи.

Расчетная часть

Задание:

1) Вычертить диаграмму состояния Fe-Fe₃C с указанием температур превращений и концентраций углерода для характерных точек;

2) Указать фазы и структурные составляющие в различных областях диаграммы

3) Определить составы и весовое количество (%) фаз и структурных составляющих при температурах для соответствующего варианта.

Номер вариант а	Содержа -ние углерода, %	Температ у-ра, °С	Номер вариан та	Содержан ие углерода, %	Температура , °С
1	0,05	820	14	2,0	1100
		700			700
2	0,12	1480	15	2,3	1200
		650			800
3	0,16	1520	16	2,5	1300
		600			600
4	0,20	1470	17	2,8	1250
		650			800
5	0,35	1520	18	3,0	1200
		700			1000
6	0,40	750	19	3,5	1200
		600			600
7	0,50	1470	20	3,8	1170
		650			850
8	0,60	750	21	4,2	1150
		600			800
9	0,80	1450	22	4,5	1150
		650			700
10	1,0	1400	23	5,0	1200
		600			1000
11	1,2	760	24	5,5	1300
		700			600
12	1,4	800	25	6,0	1400
		650			800
13	1,6	900			
		600			

Вопросы для самоконтроля:

1. Почему диаграмма состояния железо-цементит является метастабильной системой?
2. Что называется ферритом, аустенитом, цементитом, перлитом, ледебуритом?
3. Укажите на диаграмме линию ликвидус, линию солидус, линии неинвариантных реакций.
4. Какую кристаллическую решетку имеет α -железо, γ -железо?
5. Опишите с помощью уравнений неинвариантные реакции.
6. Укажите фазовое состояние в различных областях диаграммы
7. Укажите структурное состояние при нормальной температуре доэвтектоидной, эвтектоидной, заэвтектоидной стали и доэвтектического, эвтектического, заэвтектического чугуна.
8. В чем заключается отличие цементита первичного от вторичного и третичного?
9. Определите количественное соотношение феррита и цементита в перлите и ледебурите

Тема №5 «Расчет конструктивной прочности материалов»

Теоретическая часть

Надежность и долговечность металлических конструкций во многом зависят от свойств материала. Наиболее важными для работы конструкций являются механические свойства: прочность, упругость, пластичность, склонность к хрупкому разрушению, ползучесть, твердость, а также свариваемость, коррозионная стойкость, склонность к старению и технологичность.

Прочность – способность конструкции в определенных пределах воспринимать воздействие внешних сил без разрушения.

Прочность материала при статическом нагружении, а также его упругие и пластические свойства определяются испытанием стандартных образцов (прямоугольного или круглого сечения) с записью диаграммы зависимости между напряжением и относительным удлинением.

В общем случае обоснование прочности материалов конструкций проводится сравнением напряжений, возникающих в конструкции от внешних воздействий, с значениями предела текучести и предела прочности с учетом коэффициентов запаса прочности.

Если материал подвергается действию циклически меняющихся напряжений, то при достаточно большом числе циклов разрушение может произойти при напряжениях меньше предела прочности (временного сопротивления) и даже предела текучести. Это явление называется усталостью металла. Обоснование прочности конструкции с учетом циклически меняющихся нагрузок проводится расчетом на циклическую прочность.

Для проведения испытаний на растяжение образец закрепляют в захватах испытательной машины и растягивают до разрыва, измеряя нагрузку и удлинение образца. Поэтому машины, предназначенные для испытаний на растяжение, устроены так, что расстояние от одного захвата образца до другого можно увеличивать, причем один из них непосредственно связан с динамометром, а другой — с движущейся траверсой. Для создания нагрузки применяют системы с механическим и гидравлическим приводами.

Движение осуществляется по отношению к станине, воспринимающей действующие нагрузки. В возникающую при этом силовую цепь включают электронный силоизмеритель. Удлинение измеряют или по движению траверсы, или с помощью соответствующего прибора прямо на образце.

Для гарантии воспроизводимости получаемых характеристик испытание на растяжение следует проводить с постоянной скоростью, так как соотношение между напряжением и деформацией зависит от скорости испытания.

При растяжении образца на испытательных машинах фиксируются зависимости между приложенной нагрузкой и абсолютным удлинением образца, графическое представление которых называется диаграммой растяжения. Так как и нагрузка, и абсолютное удлинение зависят от формы и размеров соответствующих образцов, то количественное сравнение различных материалов в этих координатах невозможно.

Если нагрузку F отнести к исходному поперечному сечению образца S_0 , а удлинение Δl — к начальной расчетной длине l_0 , то получим диаграмму «напряжение σ — относительное удлинение ε ». При этом нормальное напряжение, Па,

$$\sigma = F/S_0,$$

а относительное удлинение, доли ед.,

$$\varepsilon = \Delta l / l_0$$

Для сравнения характеристик прочности и пластичности конструкционных материалов используют диаграммы «напряжение — относительное удлинение», называемые диаграммами деформации (рисунок), при этом под деформацией понимают относительные удлинение или сужение.

При пересчете измеренных нагрузок и удлинений по формулам не учитывают, что по мере растяжения поперечное сечение образца постоянно уменьшается. Так как в результате этого при больших деформациях имеются значительные отклонения от рассчитанных по формулам напряжений и удлинений, действительно существующих в образце, то для этого случая используют термин «диаграмма условных напряжений — деформаций». Если же в каждый момент испытания действующую силу отнести к наименьшему, т.е. наиболее деформированному, поперечному сечению, то получим истинное напряжение.

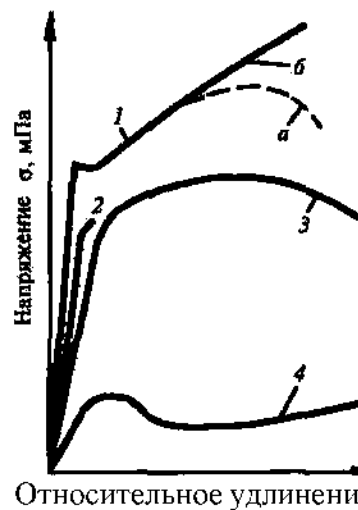


Рисунок 16 – Диаграммы деформаций «напряжение — относительное удлинение» для различных материалов: 1 – строительные стали (а – условная кривая; б – истинная кривая); 2 – чугун с пластинчатым графитом; 3 – алюминиевые сплавы; 4 – полиэтилен

Диаграммы истинных напряжений дают представление о физических процессах, протекающих в материале, и имеют особое значение для прочностных расчетов и технологии обработки материалов давлением.

Прямолинейные начальные участки диаграмм деформации характеризуют область упругих деформаций, в которой при условии квазиизотропности материалов справедлив закон Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

где E — модуль Юнга, Па.

В пластичных материалах при напряжениях выше определенного значения происходит постепенный или резкий переход в область пластических деформаций. Дальнейшее повышение напряжения для металлических материалов приводит к упрочнению в результате пластической деформации, а для эластмасс — ориентировке макромолекул, возникающей как следствие их вытягивания. Конечная точка диаграммы деформации соответствует разрушению образца.

При испытаниях на растяжение получают следующие характеристики материалов:

- предел пропорциональности $\sigma_{1ш}$;
- предел текучести (условный) $\sigma_{0,2}$;
- предел прочности σ_b ;
- удельная работа деформации образца W_s .

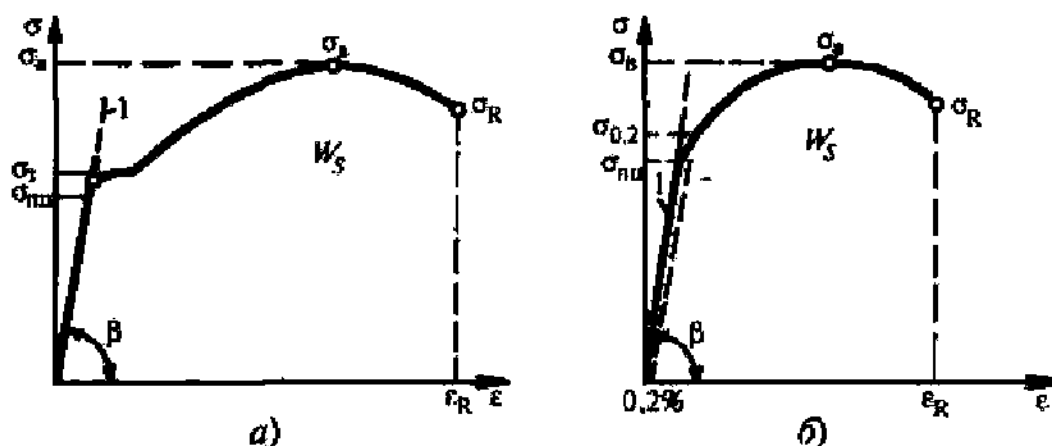


Рисунок 17 – Характеристики, определяемые по диаграммам «условное напряжение – относительное удлинение»: а – с четко выраженной площадкой текучести; б – без площадки текучести (1 – прямая Гука)

Предел пропорциональности. Предел пропорциональности (упругости) является максимальным напряжением, при котором после разгрузки образца остаточное изменение формы еще не возникает. Точно определить это значение практически невозможно. Установлены стандартные способы его нахождения экспериментальным и графическим путями. При экспериментальном определении устанавливают условные пределы упругости при допусках остаточной деформации 0,005 и 0,01% по специальным методикам. При графическом определении необходимо установить значение напряжения, при котором $\tan \beta$ уменьшается на 50 % своего максимального значения на линейном упругом участке. Для этой операции следует рассчитать:

$$\tan \beta_i = \frac{\Delta F_i}{\Delta(\Delta l_i)}$$

и проследить за его изменением.

Предел текучести. За пределом пропорциональности (упругости) в материалах начинается пластическая деформация, поэтому кривые «напряжение — деформация» отклоняются от прямой, т.е. увеличение напряжения отстает от роста деформации. Соответствующее напряжение называют пределом текучести.

Если во время испытания наблюдается падение нагрузки, различают, соответственно, верхний $\sigma_{тв}$ и нижний $\sigma_{тн}$ пределы текучести. Внезапное падение нагрузки на площадке текучести объясняют особенностями кинетики движения и размножения дислокаций в поликристаллических материалах.

Для материалов без четко выраженного предела текучести определяют условный предел текучести $\sigma_{0.2}$, который соответствует остаточной деформации 0,2 %.

Определение предела текучести требуется при выборе коэффициентов запаса, используемых в расчетах или эмпирических зависимостях. Для предотвращения выхода из строя конструкционных материалов вследствие пластической деформации или разрушения необходимо, чтобы действующие в конструкции напряжения были ниже предела текучести.

Предел прочности. Когда способность материала к деформации исчерпана, наступает разрушение, которое может происходить в зависимости от характера материала или в области поднимающейся части диаграммы «напряжение – деформация», или после превышения максимальной нагрузки F_{max} . Самые высокие нагрузки, определенные в обоих случаях и отнесенные к начальному поперечному сечению S_0 , называют пределом прочности σ_b , или временным сопротивлением разрушению.

Предел прочности на диаграмме деформации соответствует точке, в которой касательная параллельна оси абсцисс. Это условие позволяет графически найти величину предела прочности.

Удельная работа деформации образца до разрушения. Удельная работа деформации образца до разрушения W_s , Н · мм/мм², может быть определена путем планиметрирования площади, ограниченной кривой «напряжение — деформация»:

$$W_s = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\delta} \sigma d\varepsilon$$

Удельная работа деформации при испытании до разрушения, наряду с характеристиками пластичности (относительное удлинение, относительное сужение), используется в качестве показателя, определяющего в какой-то мере вероятность хрупкого разрушения, а также для оценки обрабатываемости материалов. Показатель W_s имеет большое значение для определения геометрических размеров нружин.

Расчетная часть

Для всех вариантов индивидуальных заданий приведенных ниже использовались стержни из сталей различных марок, подвергнутые химико-термической обработке. Химико-термическая (электроэрозионная) обработка выполнялась с целью упрочнения и новышения коррозионной стойкости изделий.

Задание:

1) В соответствии с индивидуальным заданием оформить Протокол испытания по следующему образцу

Вариант...

Протокол испытаний

Материал...

Режим электроэрозионной обработки:

сила тока $i = \dots$ А;

время воздействия $t = \dots$ с;

Начальные размеры образца:

площадь сечения $S_0 = \dots$ мм²;

длина $l_0 = \dots$ мм.

Номер испытания	Величина		Приращение		tgβ _i
	Нагрузка F, Н	Удлинение Δl, мм	Нагрузка F, Н	Удлинение Δl, мм	

3) заполнить Протокол испытаний, рассчитав ΔF_i, Δ(Δl_i) и tgβ_i по формуле:

$$tg\beta_i = \frac{\Delta F_i}{\Delta(\Delta l_i)}$$

4) Построить диаграмму растяжения анализируемого материала в координатах «нагрузка F – абсолютное удлинение Δl» на миллиметровой бумаге, а также построить диаграмму деформации материала в координатах $\sigma = f(\epsilon)$;

5) Определить графически по диаграмме деформации в зависимости от ее вида пределы текучести $\sigma_{ш}$, σ_T , $\sigma_{ТВ}$, $\sigma_{ш}$ или условный предел текучести $\sigma_{0,2}$;

6) Определить предел прочности σ_B по диаграмме деформации, используя графический метод;

7) Рассчитать площадь под кривой на диаграмме деформации, и установив масштаб, определить величину удельной работы деформации при испытании на растяжение W_s .

Материал – Сталь 45

Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3			Вариант 4		
Режим электроэрозионной обработки											
Сила тока i , А											
5			10			15			15		
Время воздействия t , с											
10			10			5			10		
Начальные размеры образца											
Площадь сечения S_0 , мм ²											
20,3			19,24			18,47			19,24		
Длина l_0 , мм											
25			25			25			25		
№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм
1	51	0,04	1	76	0,04	1	102	0,01	1	102	0,02
2	102	0,08	2	127	0,08	2	153	0,05	2	127	0,04
3	151	0,12	3	178	0,12	3	204	0,09	3	178	0,08
4	204	0,16	4	229	0,16	4	255	0,13	4	229	0,12
5	255	0,2	5	280	0,2	5	318	0,17	5	280	0,16
6	331	0,24	6	408	0,28	6	369	0,21	6	344	0,2
7	382	0,28	7	535	0,36	7	432	0,25	7	407	0,24
8	612	0,36	8	599	0,4	8	496	0,29	8	458	0,28
9	663	0,4	9	663	0,44	9	561	0,33	9	521	0,32
10	739	0,44	10	739	0,48	10	624	0,37	10	584	0,36
11	803	0,48	11	816	0,52	11	675	0,41	11	635	0,4
12	867	0,52	12	892	0,56	12	733	0,45	12	699	0,44

13	931	0,56	13	956	0,6	13	841	0,53	13	761	0,48
14	982	0,6	14	1020	0,64	14	969	0,61	14	824	0,52
15	1045	0,64	15	1096	0,68	15	1071	0,69	15	888	0,56
16	1096	0,68	16	1172	0,72	16	1147	0,77	16	926	0,6
17	1160	0,72	17	1262	0,84	17	1198	0,81	17	964	0,64
18	1211	0,76	18	1300	0,88	18	1275	0,89	18	1020	0,68
19	1262	0,8	19	1390	0,96	19	1326	0,97	19	1071	0,72
20	1313	0,84	20	1431	1,0	20	1364	1,05	20	1122	0,76
21	1351	0,88	21	1456	1,08	21	1377	1,09	21	1147	0,8
22	1390	0,92	22	1482	1,16	22	1383	1,13	22	1073	0,84
23	1415	0,96	23	1494	1,2	23	1390	1,17	23	1211	0,88
24	1441	1,0	24	1504	1,24	24	1399	1,21	24	1237	0,92
25	1460	1,04	25	1504	1,28	25	1402	1,25	25	1250	0,96
26	1473	1,08	26	1504	1,36	26	1402	1,33	26	1275	1,02
27	1473	1,12	27	1504	1,44	27	1402	1,41	27	1281	1,08
28	1479	1,16	28	1498	1,52	28	1402	1,45	28	1283	1,12
29	1479	1,2	29	1492	1,56	29	1392	1,49	29	1283	1,16
30	1479	1,24	30	1492	1,6	30	1389	1,53	30	1283	1,2
31	1479	1,28	31	1485	1,68	31	1389	1,57	31	1281	1,24
			32	1479	1,76	32	1388	1,61	32	1280	1,28
			33	1471	1,84	33	1384	1,65	33	1277	1,32
			34	1466	1,88	34	1380	1,69	34	1275	1,36
			35	1453	1,92	35	1377	1,73	35	1274	1,4
			36	1415	2,2	36	1371	1,77	36	1270	1,44
			37	1208	2,36	37	1364	1,81	37	1269	1,48
			38	1214	2,44	38	1351	1,89	38	1262	1,52
			39	1227	2,48	39	1345	1,97			
			40	1240	2,56	40	1341	2,01			
			41	1252	2,63						

Материал – Сталь 65Г

Вариант 5			Вариант 6			Вариант 7			Вариант 8		
Режим электроэрозионной обработки											
Сила тока i , А											
5			10			15			15		
Время воздействия t , с											
10			10			5			10		
Начальные размеры образца											
Площадь сечения S_0 , мм ²											
20,83			18,86			20,03			19,64		
Длина l_0 , мм											
23,5			24			24,5			25		
№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм
1	64	0,04	1	178	0,18	1	38	0,04	1	89	0,1
2	89	0,08	2	229	0,22	2	76	0,08	2	127	0,14
3	127	0,12	3	280	0,26	3	111	0,12	3	172	0,18

4	178	0,16	4	331	0,3	4	166	0,2	4	217	0,22
5	229	0,2	5	382	0,34	5	210	0,24	5	268	0,26
6	280	0,24	6	510	0,42	6	332	0,32	6	319	0,3
7	331	0,28	7	637	0,5	7	395	0,36	7	369	0,34
8	395	0,32	8	714	0,64	8	458	0,4	8	421	0,38
9	510	0,4	9	790	0,58	9	573	0,48	9	484	0,42
10	650	0,48	10	930	0,66	10	636	0,52	10	561	0,46
11	714	0,52	11	1007	0,7	11	712	0,56	11	612	0,5
12	854	0,6	12	1083	0,74	12	789	0,6	12	675	0,54
13	994	0,68	13	1160	0,78	13	865	0,64	13	752	0,58
14	1071	0,72	14	1198	0,825	14	942	0,68	14	816	0,62
15	1147	0,76	15	1236	0,86	15	1005	0,72	15	892	0,66
16	1211	0,8	16	1262	0,9	16	1071	0,76	16	969	0,68
17	1249	0,84	17	1274	0,94	17	1135	0,8	17	1020	0,74
18	1288	0,88	18	1281	0,98	18	1173	0,84	18	1071	0,78
19	1300	0,92	19	1288	1,02	19	1192	0,88	19	1122	0,82
20	1320	1,0	20	1285	1,06	20	1206	0,92	20	1160	0,86
21	1332	1,04	21	1300	1,1	21	1219	0,96	21	1186	0,9
22	1332	1,08	22	1326	1,14	22	1229	1,00	22	1198	0,98
23	1371	1,16	23	1358	1,18	23	1249	1,04	23	1224	1,02
24	1390	1,2	24	1415	1,3	24	1275	1,08	24	1237	1,06
25	1436	1,28	25	1504	1,46	25	1300	1,12	25	1224	1,1
26	1453	1,32	26	1543	1,54	26	1339	1,2	26	1250	1,12
27	1479	1,36	27	1581	1,62	27	1402	1,32	27	1268	1,14
28	1517	1,44	28	1619	1,7	28	1491	1,48	28	1288	1,18
29	1555	1,52	29	1683	1,86	29	1530	1,56	29	1326	1,26
30	1594	1,6	30	1708	1,94	30	1581	1,68	30	1337	1,34
31	1619	1,64	31	1734	2,02	31	1606	1,76	31	1415	1,42
32	1632	1,68	32	1762	2,1	32	1657	1,88	32	1453	1,5
33	1670	1,76	33	1785	2,18	33	1683	1,96	33	1491	1,58
34	1696	1,84	34	1810	2,26	34	1708	2,04	34	1530	1,66
35	1721	1,88	35	1823	2,34	35	1734	2,12	35	1562	1,74
36	1747	1,96	36	1844	2,42	36	1759	2,24	36	1589	1,82
37	1760	2,0	37	1881	2,58	37	1785	2,34	37	1619	1,9
38	1793	2,08	38	1938	3,02	38	1810	2,44	38	1645	1,98
39	1821	2,12	39	1946	3,1	39	1823	2,52	39	1670	2,06
40	1821	2,12	40	1951	3,14	40	1836	2,6	40	1683	2,1
			41	1953	3,18	41	1841	2,64	41	1691	2,11

Материал – Сталь ШХ15

Вариант 9	Вариант 10	Вариант 11	Вариант 12
Режим электроэрозионной обработки			
Сила тока i , А			
5	10	15	15
Время воздействия t , с			
10	10	5	10

Начальные размеры образца Площадь сечения S_0 , мм ²											
20,3			19,24			18,47			19,24		
Длина l_0 , мм											
25			25			25			25		
№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм
1	51	0,04	1	76	0,04	1	102	0,01	1	102	0,02
2	102	0,08	2	127	0,08	2	153	0,05	2	127	0,04
3	151	0,12	3	178	0,12	3	204	0,09	3	178	0,08
4	204	0,16	4	229	0,16	4	255	0,13	4	229	0,12
5	255	0,2	5	280	0,2	5	318	0,17	5	280	0,16
6	331	0,24	6	408	0,28	6	369	0,21	6	344	0,2
7	382	0,28	7	535	0,36	7	432	0,25	7	407	0,24
8	612	0,36	8	599	0,4	8	496	0,29	8	458	0,28
9	663	0,4	9	663	0,44	9	561	0,33	9	521	0,32
10	739	0,44	10	739	0,48	10	624	0,37	10	584	0,36
11	803	0,48	11	816	0,52	11	675	0,41	11	635	0,4
12	867	0,52	12	892	0,56	12	733	0,45	12	699	0,44
13	931	0,56	13	956	0,6	13	841	0,53	13	761	0,48
14	982	0,6	14	1020	0,64	14	969	0,61	14	824	0,52
15	1045	0,64	15	1096	0,68	15	1071	0,69	15	888	0,56
16	1096	0,68	16	1172	0,72	16	1147	0,77	16	926	0,6
17	1160	0,72	17	1262	0,84	17	1198	0,81	17	964	0,64
18	1211	0,76	18	1300	0,88	18	1275	0,89	18	1020	0,68
19	1262	0,8	19	1390	0,96	19	1326	0,97	19	1071	0,72
20	1313	0,84	20	1431	1,0	20	1364	1,05	20	1122	0,76
21	1351	0,88	21	1456	1,08	21	1377	1,09	21	1147	0,8
22	1390	0,92	22	1482	1,16	22	1383	1,13	22	1073	0,84
23	1415	0,96	23	1494	1,2	23	1390	1,17	23	1211	0,88
24	1441	1,0	24	1504	1,24	24	1399	1,21	24	1237	0,92
25	1460	1,04	25	1504	1,28	25	1402	1,25	25	1250	0,96
26	1473	1,08	26	1504	1,36	26	1402	1,33	26	1275	1,02
27	1473	1,12	27	1504	1,44	27	1402	1,41	27	1281	1,08
28	1479	1,16	28	1498	1,52	28	1402	1,45	28	1283	1,12
29	1479	1,2	29	1492	1,56	29	1392	1,49	29	1283	1,16
30	1479	1,24	30	1492	1,6	30	1389	1,53	30	1283	1,2
31	1479	1,28	31	1485	1,68	31	1389	1,57	31	1281	1,24
			32	1479	1,76	32	1388	1,61	32	1280	1,28
			33	1471	1,84	33	1384	1,65	33	1277	1,32
			34	1466	1,88	34	1380	1,69	34	1275	1,36
			35	1453	1,92	35	1377	1,73	35	1274	1,4
			36	1415	2,2	36	1371	1,77	36	1270	1,44
			37	1208	2,36	37	1364	1,81	37	1269	1,48
			38	1214	2,44	38	1351	1,89	38	1262	1,52
			39	1227	2,48	39	1345	1,97			
			40	1240	2,56	40	1341	2,01			

			41	1252	2,63						
Материал – 12X18H10T											
Вариант 13			Вариант 14			Вариант 15			Вариант 16		
Режим электроэрозионной обработки											
Сила тока i , А											
12			15			12,5			14		
Время воздействия t , с											
20			15			10			13		
Начальные размеры образца											
Площадь сечения S_0 , мм ²											
21,8			21,3			17,58			20,63		
Длина l_0 , мм											
23,2			24,5			24,7			24,9		
№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм
1	55	0,06	1	78	0,02	1	104	0,03	1	98	0,01
2	107	0,1	2	129	0,04	2	157	0,08	2	128	0,03
3	157	0,14	3	180	0,08	3	208	0,11	3	177	0,07
4	213	0,18	4	231	0,12	4	257	0,15	4	227	0,11
5	232	0,2	5	282	0,16	5	320	0,21	5	278	0,15
6	338	0,24	6	410	0,18	6	371	0,24	6	341	0,19
7	389	0,30	7	538	0,2	7	433	0,28	7	405	0,23
8	619	0,36	8	602	0,24	8	498	0,32	8	454	0,27
9	668	0,42	9	666	0,32	9	563	0,36	9	518	0,31
10	746	0,48	10	742	0,38	10	627	0,39	10	581	0,35
11	810	0,52	11	819	0,44	11	678	0,44	11	634	0,39
12	878	0,56	12	896	0,56	12	735	0,48	12	697	0,43
13	939	0,58	13	960	0,6	13	844	0,52	13	758	0,47
14	989	0,62	14	1025	0,64	14	972	0,64	14	822	0,53
15	1052	0,66	15	1111	0,68	15	1074	0,73	15	884	0,55
16	1113	0,68	16	1179	0,76	16	1151	0,81	16	922	0,59
17	1172	0,74	17	1268	0,88	17	1200	0,86	17	960	0,63
18	1208	0,78	18	1306	0,90	18	1276	0,91	18	1018	0,67
19	1269	0,82	19	1397	0,98	19	1329	0,97	19	1068	0,71
20	1320	0,86	20	1436	1,0	20	1367	1,06	20	1120	0,75
21	1359	0,9	21	1452	1,08	21	1379	1,10	21	1147	0,79
22	1396	0,94	22	1487	1,14	22	1387	1,17	22	1071	0,83
23	1416	0,98	23	1496	1,22	23	1394	1,21	23	1213	0,87
24	1448	1,01	24	1512	1,24	24	1402	1,26	24	1229	0,91
25	1466	1,04	25	1512	1,28	25	1409	1,29	25	1247	0,95
26	1480	1,08	26	1512	1,36	26	1409	1,35	26	1272	1,01
27	1480	1,15	27	1512	1,44	27	1409	1,44	27	1281	1,07
28	1487	1,19	28	1498	1,52	28	1409	1,49	28	1281	1,11
29	1487	1,22	29	1498	1,56	29	1398	1,52	29	1281	1,15
30	1487	1,26	30	1498	1,62	30	1392	1,56	30	1281	1,19
31	1487	1,30	31	1487	1,68	31	1392	1,61	31	1276	1,23

32	1487	1,34	32	1482	1,76	32	1390	1,63	32	1274	1,27
33	1487	1,36	33	1473	1,84	33	1386	1,68	33	1272	1,31
			34	1469	1,88	34	1382	1,73	34	1270	1,35
			35	1456	1,92	35	1379	1,78	35	1268	1,39
			36	1418	2,22	36	1373	1,82	36	1266	1,43
			37	1221	2,36	37	1367	1,86	37	1264	1,47
			38	1217	2,44	38	1353	1,93	38	1262	1,51
			39	1230	2,48	39	1348	2,03			
			40	1245	2,56						

Материал – КЧ35-10

Вариант 17			Вариант 18			Вариант 19			Вариант 20		
Режим электроэрозионной обработки											
Сила тока i , А											
7			12			17			13		
Время воздействия t , с											
12			13			8			7		
Начальные размеры образца											
Площадь сечения S_0 , мм ²											
19,3			20,8			21,4			22		
Длина l_0 , мм											
25,2			24,7			24,1			25		
№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм	№	F, кг	Δl , мм
1	66	0,05	1	180	0,16	1	40	0,02	1	84	0,12
2	91	0,09	2	230	0,20	2	78	0,06	2	122	0,16
3	129	0,13	3	283	0,24	3	111	0,10	3	167	0,18
4	180	0,17	4	335	0,28	4	168	0,18	4	212	0,20
5	231	0,21	5	386	0,32	5	212	0,22	5	263	0,22
6	282	0,25	6	517	0,40	6	334	0,30	6	314	0,26
7	333	0,29	7	639	0,48	7	397	0,34	7	365	0,32
8	397	0,33	8	714	0,62	8	460	0,38	8	418	0,36
9	512	0,41	9	792	0,56	9	575	0,46	9	479	0,40
10	652	0,49	10	933	0,64	10	638	0,50	10	554	0,44
11	716	0,53	11	1010	0,68	11	714	0,54	11	607	0,52
12	856	0,61	12	1086	0,72	12	781	0,58	12	670	0,54
13	996	0,69	13	1164	0,76	13	869	0,62	13	747	0,58
14	1073	0,73	14	1199	0,80	14	945	0,66	14	814	0,60
15	1149	0,77	15	1238	0,88	15	1008	0,70	15	887	0,66
16	1213	0,81	16	1266	0,92	16	1074	0,74	16	964	0,68
17	1251	0,85	17	1277	0,96	17	1139	0,78	17	1016	0,72
18	1290	0,89	18	1283	0,99	18	1178	0,82	18	1067	0,78
19	1302	0,93	19	1289	1,04	19	1196	0,86	19	1120	0,82
20	1322	1,02	20	1287	1,08	20	1209	0,90	20	1154	0,85
21	1334	1,05	21	1309	1,11	21	1224	0,94	21	1182	0,91
22	1334	1,09	22	1328	1,16	22	1233	1,01	22	1196	0,98
23	1376	1,17	23	1361	1,19	23	1253	1,03	23	1222	1,04

24	1392	1,21	24	1419	1,31	24	1279	1,06	24	1234	1,08
25	1438	1,29	25	1509	1,47	25	1311	1,10	25	1222	1,12
26	1455	1,33	26	1548	1,55	26	1341	1,18	26	1257	1,16
27	1482	1,37	27	1587	1,63	27	1409	1,30	27	1270	1,19
28	1519	1,45	28	1624	1,71	28	1493	1,46	28	1291	1,24
29	1557	1,53	29	1688	1,87	29	1534	1,54	29	1328	1,29
30	1596	1,61	30	1712	1,95	30	1586	1,66	30	1339	1,36
31	1620	1,65	31	1739	2,03	31	1609	1,74	31	1417	1,45
32	1636	1,69	32	1767	2,11	32	1663	1,86	32	1455	1,53
33	1672	1,77	33	1791	2,19	33	1687	1,94	33	1495	1,61
34	1699	1,85	34	1817	2,27	34	1714	2,02	34	1534	1,69
35	1724	1,89	35	1829	2,35	35	1736	2,10	35	1566	1,77
36	1749	1,97	36	1847	2,43	36	1762	2,22	36	1592	1,85
37	1762	2,01	37	1888	2,59	37	1789	2,32	37	1623	1,93
38	1795	2,09	38	1945	3,04	38	1815	2,42	38	1648	1,98
39	1823	2,13	39	1962	3,11	39	1829	2,50	39	1674	2,08
40	1823	2,13	40	1972	3,16	40	1838	2,58			
			41	1984	3,21						

Вопросы для самоконтроля:

1. Какой вид деформации стержня называется осевым растяжением или сжатием?
2. Что называется абсолютной деформацией? Относительной? Каковы их единицы измерения?
3. Что происходит с поперечными и продольными размерами стержня при растяжении или сжатии?
4. Как определяется коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона)? В каких пределах он изменяется для изотропных материалов?
5. Что называется модулем Юнга? В каких единицах он измеряется?
6. Что называется жесткостью стержня при растяжении – сжатии?
7. Как формулируется закон Гука?
8. Как распределяются нормальные напряжения по поперечному сечению стержня при растяжении (сжатии)?
9. Как вычисляются нормальные и касательные напряжения в наклонном сечении стержня при растяжении (сжатии)?
10. В каких сечениях растянутого стержня возникают наибольшие нормальные напряжения? Наибольшие касательные напряжения?
11. Как записывается условие прочности при растяжении (сжатии)?
12. Какие три характерные задачи встречаются при расчете на прочность при растяжении – сжатии?
13. Что называется продольной силой, и как она определяется в произвольном поперечном сечении стержня?
14. Что представляет собой эпюра продольных сил, и как она строится?
15. Какие сечения стержня считаются опасными?
16. Как определяется абсолютная продольная деформация?

17. Какие системы называются статически неопределимыми? Как определяется степень их статической неопределимости? Каков общий план решения статически неопределимых задач?

18. В каких координатах строится диаграмма растяжения?

19. Что называется пределом пропорциональности, пределом упругости, пределом текучести, пределом прочности?

20. Что такое площадка текучести?

21. Каковы отличия диаграмм растяжения пластичного и хрупкого материалов?

22. Как происходит разрушение при растяжении и сжатии пластичных и хрупких материалов?

23. Что называется остаточным относительным удлинением образца и остаточным относительным сужением шейки образца? Какое свойство материала характеризуют эти величины?

24. Чем отличается диаграмма истинных напряжений от диаграммы условных напряжений?

25. Как определить по диаграмме растяжения упругую и пластическую деформации?

26. Что принимается за предельное напряжение для пластичных материалов? Для хрупких?

27. Что называется допускаемым напряжением? Как оно вычисляется для пластичных и хрупких материалов? Что называется коэффициентом запаса прочности?

Тема №6 «Теоретические вопросы материаловедения. Выбор материала и способа его упрочнения с учетом производственного назначения»

Теоретическая часть

6.1 Термомеханическая обработка

ТМО – совокупность операций пластической деформации и термической обработки, совмещенных в одном технологическом процессе, который включает нагрев детали, пластическое деформирование и охлаждение.

Такое воздействие приводит к фазовым превращениям и образованию структурного состояния, которое обеспечивает высокий комплекс механических свойств.

Существует два вида ТМО: высокотемпературная и низкотемпературная.

При ВТМО деформация производится при температурах выше температур рекристаллизации металла. Степень деформации – от 20 % до 30 %. Во избежание рекристаллизации за деформацией незамедлительно следует закалка с последующим низкотемпературным отпуском.

Низкотемпературное ТМО применяется в основном для легированных сталей. При низкотемпературном ТМО деформация производится ниже температур рекристаллизации, при этом степень деформации – от 75 % до 95 %.

Закалку производят сразу после деформации. Затем низкотемпературный отпуск. Стали после низкотемпературного ТМО склонны к хрупкому разрушению.

ТМО в 1,5-2 раза увеличивает прочностные характеристики стали и в 2 раза ее пластические свойства.

6.2 Химико-термическая обработка

ХТО – процесс поверхностного насыщения материалов различными элементами для придания ей соответствующих свойств.

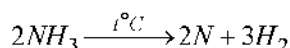
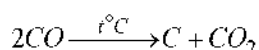
От других видов ТО она отличается тем, что кроме структурных изменений в ее поверхностном слое происходит изменение состава и строения поверхности за счет диффузии в нее элементов в атомарном состоянии из внешней среды при высоких температурах.

Основная цель ХТО: упрочнение поверхности детали, повышение твердости, износостойкости, а также повышение стойкости против агрессивных сред.

К процессам ХТО относятся цементация, азотирование, цианирование, металлизация (хромирование, алитирование, силицирование и т. д.).

Механизм ХТО характеризуется 4-мя одновременно протекающими процессами:

1. Диссоциация заключается в распаде молекул и образовании активных атомов. Степень распада молекул в процентах называется степенью диссоциации.



1. Адсорбция. Представляет собой взаимодействие на границе газ-металл с проникновением активного элемента в решетку металла.

2. Диффузия заключается в проникновении насыщаемого элемента в глубь металла.

3. Десорбция. Уход с поверхности продуктов реакции во внешнюю среду.

Виды ХТО:

1) Цементация – процесс насыщения поверхности углеродом. Цель: придание поверхности твердости при сохранении мягкой сердцевины. Цементации подвергают низкоуглеродистые стали с содержанием углерода не более 0,25 %. Температура цементации – 900 – 970°C 0,1-3,4 мм. Чем выше температура, тем больше толщина слоя, которая растет со временем по параболическому закону. Далее происходит охрупчивание. Цементацию проводят в твердых, жидких и газообразных средах, которые называются карбюризаторами. Твердый карбюризатор состоит из древесного угля с добавками от 10 % до 30 % $BaCO_3$, K_2CO_3 , Na_2CO_3 . Процесс длится несколько часов. Газовый карбюризатор – CO и предельные углеводороды с общей формулой CN , H_2N , пары бензола и т.д. Жидкие карбюризаторы – смесь цианистых солей и буры.

Структура цементированного слоя такова, что поверхностные слои имеют структуру перлит+цементит. Затем зона перлита. Феррит+перлит (доэвтектоидная сталь), которая затем постепенно переходит в сердцевину.

Цементации подвергают детали, которые работают в условиях переменных нагрузок, в условиях износа (зубчатые колеса, шестерни, втулки, норшневые кольца)

2) Азотирование – процесс насыщения стали (металлов) азотом. Цель азотирования – придание поверхности высокой твердости, износостойкости, устойчивости против коррозии, повышение прочности.

Газовое азотирование заключается в воздействии на сталь аммиака при температурах 500-600°C.

Атомарный азот, который образуется на поверхности, образует с составляющими стали нитриды с высокой твердостью. Толщина слоя 0,25-0,75 мм.

Азотированию подвергают в основном легированные стали. Азотирование в жидких средах производится при температурах относительно невысоких температурах в расплавленных цианистых солях. Толщина 150 микрон. Жидкое азотирование повышает сопротивление износу и предел выносливости. Недостаток: токсичность и высокая стоимость. Изготавливают детали автомобилей, штампы пресс-форм.

3) Цианирование – процесс насыщения поверхности одновременно углеродом и азотом в расплавленных цианистых солях при температурах 820 – 950°C. Толщина слоев 150-350 микрон, максимально 2000 микрон. После цианирования проводят ТО, закалку и низкий отпуск. Недостаток – токсичность цианистых солей.

4) Нитроцементация представляет собой процесс насыщения поверхностного слоя одновременно азотом и кислородом в газовой среде следующего состава: N_2 – 20%, H_2 – 40%, CO – 20% при температуре 850 – 870°C в течении 4-х – 10 часов. Цель – повышение износостойкости, твердости, коррозионной стойкости. После закалки и низкого отпуска толщина составляет 0,2 – 0,8 мм.

Широко применяется в автомобилестроении и тракторостроении. По сравнению с цементацией более низкие температуры процесса.

5) Металлизация, бывает следующих видов:

1) Борирование заключается в насыщении поверхностного слоя изделий из низкоуглеродистых сталей бором при температурах 850 – 950°C в течении 2 – 6 часов. Поверхностный слой состоит из боридов металлов. Толщина слоя 0,1 – 0,2 мм. Применяют для повышения твердости, коррозионной стойкости, упрочнения штампов, пресс-форм и т.д.

2) Силицирование. Насыщение поверхностей изделий кремнием с целью повышения коррозионной стойкости, жаростойкости, износостойкости при $T = 900 - 1000^\circ C$. Применяют для роторов, клапанов, вкладышей подшипников, труб судовых механизмов и т.д.

3) Алюминирование. Процесс насыщения поверхностного слоя алюминия для повышения жаростойкости, коррозионной и эрозионной стойкости стали, чугунов, медных сплавов.

Алитирование производится как в порошкообразных смесях, так и в ваннах с расплавленным алюминием в газовых средах и распылением жидкого алюминия. На поверхности образуется плотная пленка Al_2O_3 , которая предохраняет изделие от окисления. Температура алитирования 950-1050°C. Время 3-12 ч. Толщина слоя 0,3-0,8 мм.

Изготавливают чехлы термопар, ковши, клапаны и т.д. Вакуумное алитирование, которое позволяет получать зеркальную поверхность высокой чистоты.

4) хромирование – процесс насыщения поверхностного слоя стали хромом. При этом повышается коррозионная стойкость, твердость, износостойкость. Проводят обычно в порошковых смесях хрома или ферро-хрома, $T=1000 - 1050^\circ C$. Время 6-12 ч. Толщина 0,2 мм=200 микрон. Хромируют низкоуглеродистые стали. Содержание хрома в углеродистых сталях 30-40%. Хромируют клапаны компрессоров, матрицы штампов.

5) Цинкование. Наиболее широко применяется в технике жилого строительства. Используется в основном жидкостное цинкование. Цинковое покрытие хорошо защищает железо и его сплавы от коррозии на воздухе и в воде. Толщина – 6-40 микрон.

6.3 Легированные конструкционные стали и сплавы

6.3.1 Легированными называются стали, в которые кроме железа и углерода вводят легирующие добавки в определенных концентрациях для придания стали специальных физико-механических свойств.

Основными легирующими элементами являются марганец, кремний, хром, никель, вольфрам, молибден, кобальт, титан, ванадий, цирконий, ниобий и др.

По общему содержанию легирующих элементов легированные стали подразделяются на низколегированные (до 2,5% легирующих элементов); среднелегированные (2,5-10%); высоколегированные (более 10%).

Хром и кремний повышают твердость, прочность, жаростойкость, коррозионную стойкость. Никель и марганец повышают прочность, пластичность, электрическое сопротивление. Вольфрам и молибден уменьшают величину зерна в сталях, повышают твердость и прочность, улучшают режущие свойства и коррозионные свойства.

Маркировка легированных сталей: буквы и цифры, которые указывают на химический состав стали.

Первые две цифры указывают содержание углерода в сотых долях процента. Затем буква (легирующий элемент), цифра указывает на среднее значение химических элементов входящих в состав сплава. При содержании элемента менее или равного единице, цифра не ставится.

Легирующие элементы обозначаются следующими буквами: К (кобальт), В (вольфрам), Ю (Алюминий), Х (хром), Д (медь), Н (никель), М (молибден), П (фосфор), Ц (цирконий), Ч (редкоземельные элементы). Например, 12ХН3А (0,12 % С, 1 % Cr, 3 % Ni (высокое качество)).

Легированные стали классифицируют на 3 группы:

1. Конструкционные:

- а) цементуемые (подвергаемые насыщению углеродом);
 - б) улучшаемые (подвергаемые закалке и отпуску).
2. Инструментальные
3. Стали и сплавы с особыми свойствами:
- а) нержавеющие
 - б) жаропрочные
 - в) жаростойкие и т. д.

6.3.2 Цементуемые легированные стали

К этому типу сталей относятся низко- и среднелегированные стали с содержанием С от 0,1 до 0,3 %. (20Х, 15Х, 15ХФ, 30ХГТ)

После цементации последующей закалки с низким отпуском достигаются высокие поверхностная твердость и прочность при вязкой сердцевине.

Изготавливают стали, подвергнутые износу и ударным нагрузкам (кулачки, шестерни, поршневые кольца).

6.3.3 Улучшаемые легированные стали

Эти стали содержат от 0,3 до 0,5 % С и общую сумму легирующих элементов до 5 %. Эти стали подвергают улучшению путем термообработки, закалке при температуре и высокому отпуску.

Обладают высокой прочностью, пластичностью, хорошо работают в условиях циклических и ударных нагрузок до температур 450°С. Изготавливают ответственные детали машин. Марки этих сталей: 40Х, 40ХН, 38Х, НЗ, МА

6.3.4 Нержавеющие стали

Обладают высокой стойкостью против коррозии (влажная атмосфера, морская вода, растворы солей и щелочей). Для повышения антикоррозийных свойств в сталь добавляют хром 12-30 %, никель 3-10 %. Режимы термической обработки: закалка 1000 – 1100°С в масле; отпуск 700 – 750 °С. 12Х13 используется для изготовления деталей типа клапанов, предметов домашнего обихода. Для пищевой и химической промышленности применяют сталь 12Х13.

6.3.5 Легированные инструментальные стали

Получают на базе углеродистых инструментальных сталей путем легирования хромом, вольфрамом, марганцем, кремнием и т.д.

После закалки в масле и низкого отпуска имеют высокую твердость. Они меньше склонны к деформациям и образованию трещин. Примеры марки: 9ХС, ХВГ, ХВ5

Изготавливают различные режущие инструменты сложной конфигурации (в десятых долях процента).

6.3.6 Быстрорежущие стали

Для изготовления режущего инструмента. Обладают большой твердостью и работают при больших скоростях резания. Стали карбидного класса, так как в их состав входят карбидообразные элементы: хром, ванадий, молибден. Высокими режущими свойствами обладают быстрорежущие стали марок: Р6, Р18. Цифра – среднее процентное содержание вольфрама.

6.3.7 Жаростойкие и жаропрочные стали

Скорость металла сопротивляться окислению при высоких температурах называется жаростойкостью (окалиностойкостью). Окалиностойкость зависит от состава стали и мало от ее структуры. Для повышения прочности в стали добавляют хром, алюминий. Эти металлы обладают большим сродством к углероду и образуют на поверхности стали плотные оксидные пленки: SiO_2 , которые предохраняют металл от дальнейшего окисления. Примеры: 12Х18Н9Т. Нержавеющая сталь обладает высокими технологическими свойствами (хорошо сваривается, куется).

Многие стали работают при высокой температуре и испытывают при этом значительные нагрузки. Такие стали изготавливают из жаропрочных сплавов. Жаропрочность – способность материала противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах.

Поэтому для них обычно рассматривают не только влияние температур, но и продолжительность нагружения.

Для оценки механических свойств жаропрочных сплавов разработаны специальные виды испытаний, которые учитывают как фактор времени, так и температуры.

6.3.8 Клапанные стали

В таких условиях хорошо зарекомендовали себя силххромы. Например, 40Х. Важнейшими деталями реактивных двигателей являются лопатки. Их температура эксплуатации 700-800°C и высокие нагрузки давления. Для лопаток газовых турбин применяются стали с большим содержанием никеля, которое называется нимониками. Например, ХН70ВМТЮ.

6.4 Цветные металлы и их сплавы

6.4.1 Алюминий и его сплавы

Алюминий (Al) - металл серебристого цвета, плотность $\rho=2,7 \text{ г/см}^3$, $t_{\text{пл}}=660^\circ\text{C}$. Имеет ГЦК решетку без аллотропических превращений, обладает высокой электро- и теплопроводностью, хорошей коррозионной стойкостью за счет образования на его поверхности плотного окисла Al_2O_3 . Стоек к концентрированной HNO_3 (азотная кислота). Ввиду низкой прочности применяют в ненагруженных деталях (фольга, трубопроводы, теплообменники, провода и т.д.)

Алюминиевые сплавы нашли широкое применение в промышленности благодаря малой плотности при достаточно высоких характеристиках прочности, высокой стойкости против коррозии как в атмосферных средах, так и в других средах, хорошими технологическими свойствами (обрабатываемость, свариваемость).

В качестве основных легирующих элементов используется медь, магний, марганец, кремний, цинк.

По технологии изготовления изделий алюминиевые сплавы делят на 2 группы: деформируемые и литейные.

Деформируемые сплавы делятся на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой.

К термически неупрочняемым сплавам относятся системы Al – Mn (АМц) и Al – Mg (АМг). Эти сплавы хорошо обрабатываются давлением, хорошо свариваются, имеют высокую коррозионную стойкость. Сплавы групп АМц и АМг не упрочняются термической обработкой.

Их прочностные свойства повышают за счет холодного пластического деформирования или наклепа. Из таких сплавов изготавливают емкости, трубопроводы.

Из термически упрочняемых сплавов наибольшее применение получили дуралюмины – это высокопрочные алюминий – медные сплавы с содержанием меди 3 – 5 % с добавками Mg, Si и др. (по 1 %).

Упрочняющая термическая обработка (закалка) основана на изменении растворимости меди в алюминии при комнатной температуре составляет 0,5 %, а при температуре 550 °С максимальная растворимость составляет 5,5 %. Если сплав с максимальным содержанием меди нагреть и быстро охладить, то получим пересыщенный твердый раствор меди в алюминии.

Этот раствор является неустойчивым и распадается с выделением меди. Процесс распада пересыщенного раствора, который образуется в процессе закалки, называется старением.

В результате старения в сплаве образуются зоны, богатые медью, называются зонами Геньо – Престона. Выделение меди искажают кристаллическую решетку, в нем создаются напряжения, в результате твердость и прочность возрастает, а пластичность понижается.

Если выдержка закаленных сплавов происходит при нормальной температуре, то она называется естественной. Нагрев закаленных сплавов до 100 – 300 °С и выдержка при этой температуре некоторое время (несколько часов), называется искусственным старением. Естественное длится 4-5 суток. Существенным отличием естественного от искусственного проявляется в том, что старение не заканчивается на образовании зон Геньо – Престона, а происходит их образование во вторичную фазу CuAl_2 , которая называется θ фаза, которая и упрочняет сплав.

Наибольшее применение в технике получил дуралюмин Д16. Высокопрочные сплавы – сплавы системы Al – Zn – Mg – Cu, например В95. Прочностные свойства приобретаются после закалки 470°С и искусственного старения в течении 16 ч. Сплавы применяют для высоко нагруженных деталей.

6.4.2 Медь и ее сплавы

Медь – (Cu) - металл красного цвета $\rho=8,9 \text{ г/см}^3$ $t_{\text{пл}}=1083^\circ\text{C}$ Имеет ГЦК решетку без аллотропических превращений. Медь обладает высокой теплопроводностью, пластичностью, хорошей коррозионной стойкостью, текучестью, хорошо обрабатывается давлением, хорошо паяется. М0 – самая чистая медь (0,05% примесей), М1 – 0,1 % примесей, М2 – 0,2% примесей и т.д.

Медь широко используется для изготовления проводников тока, кабелей шин в электротехнике и т.д. Недостаток – малая прочность, поэтому медь легируют. Латунь – сплавы меди с цинком. Бывают однокомпонентные и многокомпонентные. Например, Л70 (70 % меди 30 % цинка). Если латунь

сложного состава, то после буквы Л ставят условное обозначение этих элементов, цифры.

Обозначение элементов: С (свинец), Ж (железо), А (алюминий), Мц (марганец), Н (никель), К (кремний). Пример, ЛАЖМЦ 66-6-3-2.

Для повышения прочности латуни легируют кремнием, марганцем, железом (от 1 до 3 %), добавляют 1-2 % свинца.

Медный сплав с содержанием 20 % цинка и 15 % никеля, называют нейзильбером. Медный сплав (25-35 % никеля) – никелин. Обладает высоким электросопротивлением. Применяется в производстве реостатов. Сплав меди с 30% никеля и по 1 % железа и марганца называется мельхиором. Обладает хорошей пластичностью, коррозионной стойкостью. Изготавливают детали, работающие в морской воде. Изготавливают детали, работающие на трение, контакты электрооборудования.

Бронзы – сплавы меди со всеми другими элементами, кроме цинка, однако цинк может быть легирующей добавкой. Названия по основным легирующим элементам: оловянистые, алюминиевые, бериллистые и т.д. Бр – затем буквы и цифры, обозначающие название и содержание в процентах легирующих элементов. Например, БрОЦС 6-63 (Sn – 6 %, Zn – 6 %, Pb – 3 %, Cu – 8,5 %).

Из этих бронз изготавливают особо ответственные детали, которые работают при больших скоростях, высоких давлениях, температурах. Однако они дорогостоящи.

6.5 Титан и его сплавы

Титан (Ti) – металл серебристо-белого цвета. $\rho=4,54 \text{ г/см}^3$ $t_{\text{пл}}=1672^\circ\text{C}$

Сочетание легкости и тугоплавкости делают титан очень полезным материалом. При обычных температурах титан является коррозионной стойкостью. Однако нагрев его до температуры 500°C делают его активным металлом, что является неплохой предпосылкой для легирования металла. Особо опасен для титана водород, который охрупчивает его. Элементы, слабоявляющие на температуру полиморфного превращения. Их называют нейтральными упрочнителями, такими как свинец, цирконий, германий, торий.

Титановые сплавы подразделяются на 3 группы:

1 группа α – сплавы (BT4, BT5, BT 18 и другие – высокопрочный титановый сплав);

2 группа $\alpha+\beta$ сплавы (BT8, BT6, BT14 содержат Al, V, Mo. Они характеризуются более высокой прочностью. Но более хрупкие, чем α -сплавы);

3 группа β сплавы – BT22, BT15 наиболее пластичны и достаточно прочные.

Титановые сплавы применяют в технической промышленности, судостроении, авиационной техники.

Титан сильно упрочняют такие элементы как алюминий, кобальт, молибден, марганец, хром. Сумма легирующих элементов не должна превышать 25-30 %.

6.6 Магний и его сплавы

Магний является самым легким конструкционным металлом. $\rho=1,74 \text{ г/см}^3$
 $t_{\text{пл}}=650^\circ\text{C}$. Имеет ГПУ решетку без аллотропических превращений. Обладают высокой удельной прочностью. При нагревании магний легко окисляется и воспламеняется. К основным легирующим элементам относятся алюминий, цинк, марганец.

Сплавы МА-8, МА-10 обладают высокой коррозионной стойкостью за счет легирования марганцем. Применяют для малонагруженных деталей: топливные баки, детали самолетов и машин.

Некоторые высокопрочные сплавы (МА-5) подвергают термической обработке. Применяют такие сплавы для сильно нагруженных деталей. К литейным сплавам относятся магний-алюминий-цинк. МЛ-3, МЛ-5 Из этих сплавов изготавливают детали методом литья. При замене алюминиевых сплавов магниевыми снижаются масса детали, вибрационная прочность в 20 раз больше, чем у легированных сплавов.

Расчетная часть

Вариант 1

1. Как можно устранить крупнозернистую структуру ковanej стали 30? Используя диаграмму состояния «Железо – цементит», обоснуйте выбор режима термической обработки для исправления структуры. Опишите структурные превращения и характер изменения свойств.

2. Укажите температуры, при которых производится процесс прочностного азотирования. Объясните, почему азотирование не производится при температурах ниже 500°C и выше 700°C (используя диаграмму состояния «Железо – азот»). Назовите марки сталей, применяемых для азотирования и опишите полный цикл их термической и химико-термической обработки.

3. Для изготовления штампов выбрана сталь 6ХС. Укажите состав и определите группу сталей по назначению. Назначьте режим термической обработки, приведите его обоснование. Опишите микроструктуру и свойства сталей после термической обработки.

4. Назначьте марку жаропрочной стали (силхром) для клапанов автомобильных двигателей небольшой мощности. Укажите состав, назначьте и обоснуйте режим термической обработки стали. Опишите микроструктуру и основные свойства стали после термической обработки.

5. Для изготовления токопроводящих упругих элементов выбрана бронза БрБНТ-1,7. Приведите химический состав, режим термической обработки и получаемые механические свойства сплава. Опишите процессы, происходящие при термической обработке, и объясните природу упрочнения в связи с диаграммой состояния «Медь–бериллий».

Вариант 2

1. Используя диаграмму состояния «Железо – цементит», определите температуру полного и неполного отжига и нормализации для сталей 15. Охарактеризуйте эти режимы термической обработки и опишите микроструктуру и свойства сталей.

2. В результате термической обработки некоторые детали машин должны иметь твёрдый износоустойчивый поверхностный слой при вязкой сердцевине. Для изготовления их выбрана сталь 15ХФ. Укажите состав и определите группу стали по назначению. Назначьте режим термической обработки, приведите его обоснование, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие на всех этапах термической обработки данной стали. Опишите структуру и свойства стали после термической обработки.

3. В результате термической обработки коленчатые валы судовых и автомобильных двигателей должны получить повышенную прочность по всему сечению (твёрдость 3000–3500 НВ). Для изготовления их выбрана сталь 40ХФА. Укажите состав и определите группу стали по назначению. Назначьте и обоснуйте режим термической обработки, объяснив влияние легирования на превращения при термической обработке данной стали. Опишите структуру и свойства стали после термической обработки.

4. Для деталей, работающих в слабых агрессивных средах, применяется сталь 30Х13. Укажите состав и определите группу стали по структуре. Объясните назначение хрома в данной стали, назначьте и обоснуйте режим термической обработки.

5. Для изготовления токопроводящих уругих элементов выбран сплав БрБНТ–1,9. Приведите химический состав, режим термической обработки и получаемые механические свойства сплава. Опишите процессы, происходящие при термической обработке и объясните природу упрочнения в связи с диаграммой состояния «Медь – бериллий».

Вариант 3

1. Используя диаграмму состояния «Железо – цементит», определите температуру полного и неполного отжига и нормализации для стали 10. Охарактеризуйте эти режимы термической обработки и опишите структуру и свойства стали.

2. Назначьте режим термической обработки слабонагруженных деталей из стали 45. Приведите его обоснование и опишите структуру и механические свойства деталей. Объясните, почему удовлетворительные свойства на изделиях из данной стали могут быть получены в небольших сечениях?

3. Для изготовления деталей штампов, обрабатывающих металл в холодном состоянии, выбрана сталь ХГЗСВ. Укажите состав, назначьте и обоснуйте режим термической обработки стали, объяснив влияние легирования на превращения при термической обработке. Опишите микроструктуру и свойства штампов после термической обработки.

4. Для реостатных элементов сопротивления выбран сплав марганца МНМц3–12. Расшифруйте состав, опишите структуру и электротехнические характеристики этого сплава.

5. Для поршней двигателя внутреннего сгорания, работающих при температурах 200–250°C, используется сплав АЛ1. Расшифруйте состав и укажите способ изготовления деталей из данного сплава. Опишите режим упрочняющей термической обработки и кратко объясните природу упрочнения.

Вариант 4

1. Вычертите диаграмму состояния изотермического превращения аустенита для стали У8, нанесите на нее кривую режима изотермической обработки, обеспечивающей получение твердости 5000 НВ. Укажите, как этот режим называется, опишите сущность превращений и какая структура получается в данном случае.

2. Назначьте температуру закалки, охлаждающую среду, температуру отпуска напильников из стали У13. Опишите сущность происходящих превращений, микроструктуру и твердость инструмента после термической обработки.

3. Для изготовления обрезных штампов выбрана сталь Х12М. Укажите состав, назначьте и обоснуйте режим термической обработки стали, объяснив влияние легирования на все превращения, происходящие при термической обработке. Опишите микроструктуру и свойства стали после термической обработки.

4. В теплоэнергетике используется сталь 12Х2МФСР. Укажите состав и определите группу стали по назначению. Назначьте режим термической обработки и приведите его обоснование. Объясните влияние легирующих элементов на превращения при термической обработке стали. Опишите влияние температуры на механические свойства стали.

5. Для изготовления деталей путем глубокой вытяжки применяется латунь Л70. Укажите состав и опишите структуру сплава. Назначьте режим промежуточной термической обработки, применяемой между отдельными операциями вытяжки, обоснуйте выбранный режим и приведите общую характеристику механических свойств сплава.

Вариант 5

1. Используя диаграмму состояния «Железо – цементит», укажите температуру нагрева под закалку стали 40 и У10. Опишите превращения, происходящие в сталях при выбранном режиме обработки, получаемую структуру и свойства.

2. Назначьте температуру закалки, охлаждающую среду и температуру отпуска пружин из стали 70. Опишите сущность происходящих превращений, микроструктуру и свойства стали после термической обработки.

3. Для изготовления резцов выбрана сталь Р6М5. Укажите состав и определите группу стали по назначению. Назначьте режим термической обработки, приведите его обоснование, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие при термической обработке данной стали. Опишите микроструктуру и главные свойства резцов после термической обработки.

4. Для некоторых деталей (шеки барабанов, шары дробильных мельниц и т. и.) выбрана сталь 110Г13. Укажите состав и определите группу стали по назначению. Назначьте режим термической обработки, приведите его обоснование. Опишите микроструктуру стали и причины ее высокой износостойчивости.

5. Для изготовления деталей в авиастроении применяется сплав МЛ5. Рас-

шифруйте состав сплава, укажите способ изготовления деталей из данного сплава и опишите характеристики механических свойств сплава.

Вариант 6

1. Доэвтектоидная углеродистая сталь имеет крупнозернистую структуру перегрева. Какой вид термической обработки следует применять для устранения состояния перегрева? Нанесите на диаграмму состояния «Железо – цементит» ординату любой доэвтектоидной стали и объясните, какие изменения происходят в структуре стали при этой термообработке.

2. Назначьте температуру закалки, охлаждающую среду, температуру отпуска гладких и резьбовых калибров из стали У12А. Опишите сущность происходящих превращений, микроструктуру и твердость инструмента после термической обработки.

3. В результате термической обработки пружины должны получить высокую упругость. Для изготовления их выбрана сталь 63С2А. Укажите состав, назначьте и обоснуйте режим термической обработки. Опишите микроструктуру и свойства стали после термической обработки.

4. Объясните природу жаропрочности сплавов на никелевой основе в связи с их составом, термической обработкой и получаемой структурой. Приведите примеры этих сплавов и укажите область применения.

5. В качестве материала для ответственных подшипников скольжения выбран сплав БрС30. Укажите состав и определите группу сплава по назначению. Опишите основные свойства и требования, предъявляемые к сплавам этой группы.

Вариант 7

1. Изделия из стали 50 закалены: первое – от температуры 740 °С, а второе – от температуры 820 °С. Используя диаграмму состояния «Железо – цементит», укажите выбранные температуры нагрева и объясните, какое из этих изделий имеет более высокую твердость и лучшие эксплуатационные свойства и почему.

2. Назначьте режим термической обработки штампов холодной штамповки из стали У10А. Приведите его обоснование и опишите структуру и свойства штампов. Объясните, почему из данной стали изготавливают штампы небольшого сечения.

3. В результате термической и химико-термической обработки червяки должны получить твердый износостойчивый поверхностный слой при вязкой сердцевине. Для их изготовления выбрана сталь 12Х2Н4ВА. Укажите состав и определите группу стали по назначению. Назначьте режим термической обработки, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие на всех этапах обработки данной стали. Опишите структуру и свойства червяков в готовом виде.

4. Назначьте нержавеющую сталь для изготовления деталей, работающих в среде уксусной кислоты при температуре 40 °С. Приведите химический состав стали, необходимую термическую обработку и получаемую структуру. Объясните коррозионную устойчивость материала и роль каждого легирующего элемента.

5. Назначьте марку алюминиевой бронзы для изготовления мелких ответственных деталей (втулок, фланцев и т. п.). Укажите ее состав, опишите

структуру, используя диаграмму состояния «Медь–алюминий» и основные свойства бронзы.

Вариант 8

1. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8, нанесите на нее кривую режима термической обработки, обеспечивающей получение твердости 60 – 63 HRC. Укажите, как этот режим называется. Опишите сущность превращений и структуру, получаемую при этом.

2. Назначьте режим термической обработки рессор из стали 65 и приведите его обоснование. Опишите сущность происходящих превращений, микроструктуру и свойства стали после термической обработки.

3. Для изготовления плит высокого класса точности выбрана сталь 12X1. Определите состав и группу стали по назначению. Назначьте и обоснуйте режим термической обработки стали, объяснив влияние легирования на все превращения, происходящие при термической обработке данной стали. Опишите структуру и свойства стали после термической обработки.

4. Для изготовления деталей, работающих в окислительной атмосфере при 800 °С, выбрана сталь 12X18H9T. Укажите состав, обоснуйте выбор стали для данных условий работы и объясните, для чего вводится хром в эту сталь?

5. Для изготовления деталей двигателей внутреннего сгорания выбран сплав АК8. Расшифруйте состав, укажите способ изготовления деталей из данного сплава и приведите характеристики механических свойств сплава при повышенных температурах.

Вариант 9

1. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8, нанесите на нее кривую режима термической обработки, обеспечивающей твердость 3500 НВ. Опишите сущность превращений и структуру, получаемую при этом.

2. Режущий инструмент требуется обработать на максимальную твердость. Для его изготовления выбрана сталь У13А. Назначьте режим термической обработки, опишите сущность происходящих превращений, структуру и свойства данной стали.

3. Для изготовления молотовых штампов выбрана сталь 5ХНСВ. Укажите состав и группу стали по назначению. Назначьте режим термической обработки стали, приведите его обоснование, объяснив влияние легирования на превращения при термической обработке этой стали. Укажите структуру, свойства и требования, предъявляемые к штампам горячей штамповки.

4. Дайте общую характеристику магнитомягких материалов, укажите их состав, свойства и область применения в машино- и приборостроении.

5. Для обшивки летательных аппаратов использован сплав ВТ6. Приведите состав сплава, режим упрочняющей термической обработки и получаемую структуру. Опишите процессы, протекающие при термической обработке, и преимущества сплава ВТ6 по сравнению с ВТ5.

Вариант 10

1. Используя диаграмму состояния «Железо – цементит», опишите

структурные превращения, происходящие при нагреве стали У10. Укажите критические точки и выберите оптимальный режим нагрева этой стали под закалку. Охарактеризуйте этот вид термической обработки и опишите получаемую структуру и свойства стали.

2. Выберите легированную сталь для изготовления сверл. Назначьте режим термической обработки, опишите сущность происходящих превращений, структуру и свойства инструмента.

3. Коширы должны иметь минимальную деформацию и высокую износоустойчивость поверхностного слоя при твердости 7500–10000 НV. Для их изготовления выбрана сталь 38ХВФЮА. Укажите состав и определите группу стали по назначению. Назначьте режим термической и химико-термической обработки, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие на всех этапах обработки данной стали. Опишите структуру и свойства стали после обработки.

4. Для изготовления деталей, работающих в активных коррозионных средах, выбрана сталь 08Х18Н12Т. Укажите состав и объясните причину введения легирующих элементов в эту сталь. Назначьте и обоснуйте режим термической обработки и опишите микроструктуру данной стали после термической обработки.

5. Укажите марки, состав, свойства и способ изготовления металлокерамических твёрдых сплавов для режущего инструмента.

Вариант 11

1. Используя диаграмму состояния «Железо – цементит», укажите температуру нагрева под закалку стали 50 и У12. Опишите превращения, происходящие в сталях при выбранном режиме обработки, получаемую структуру и свойства.

2. Назначьте температуру закалки, охлаждающую среду, температуру отпуска различных приспособлений из стали 45, которые должны иметь твердость 28–35 HRC. Опишите микроструктуру и свойства стали после термической обработки.

3. Для изготовления высадочных и чеканочных штампов выбрана сталь 4ХВС. Укажите состав и определите группу стали по назначению. Назначьте и обоснуйте режим термической обработки, объяснив влияние легирования на превращения при термической обработке этой стали. Опишите структуру и свойства штампов после термической обработки.

4. Для деталей, работающих в слабых коррозионных средах, используется сталь 20Х13. Укажите состав и объясните причину введения хрома в эту сталь. Назначьте и обоснуйте режим термической обработки и опишите микроструктуру после обработки.

5. Для изготовления ответственных деталей (штулки, клапаны, зубчатые колеса и т.п.) выбран сплав БрАЖН10–4–4. Расшифруйте состав, укажите режим термической обработки, механические свойства и опишите структуру, используя диаграмму состояния «Медь – алюминий».

Вариант 12

1. С помощью диаграммы состояния «Железо – цементит» определите температуру нормализации, отжига и закали для стали 30. Охарактеризуйте эти режимы термической обработки, опишите структуру и свойства стали после каждого вида обработки.

2. Назначьте температуру закали, охлаждающую среду, температуру отпуска деталей из стали 40ХГ, которые должны иметь твердость 2300–2500 НВ. Опишите микроструктуру и свойства стали после термической обработки.

3. Для изготовления режущего инструмента выбрана сталь Р6М5К5. Укажите состав и определите группу стали по назначению. Назначьте режим термической обработки, приведите его обоснование, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие на всех этапах термической обработки данной стали. Опишите микроструктуру и свойства стали после термической обработки.

4. Для некоторых деталей точных приборов выбран сплав элинвар. Укажите состав и определите группу, к которой относится данный сплав по назначению. Опишите влияние легирующих элементов на основную характеристику сплава и причины выбора данного состава сплава.

5. Для изготовления деталей двигателя внутреннего сгорания выбран сплав АК4–1. Укажите состав и способ изготовления деталей из этого сплава. Приведите характеристики механических свойств сплава при повышенных температурах и объясните, за счет чего они достигаются.

Вариант 13

1. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8, нанесите на нее кривую режима термической обработки, обеспечивающей получение твердости 1500 НВ. Укажите, как этот режим называется, опишите сущность превращений и какая структура получается в данном случае?

2. Требуется произвести поверхностное упрочнение изделий из стали 15Х. Назначьте вид обработки, опишите его технологию, происходящие в стали превращения, структуру и свойства поверхности и сердцевины.

3. В результате термической обработки оправки должны получить повышенную прочность по всему сечению (твердость 3000–3500 НВ). Для их изготовления выбрана сталь 40ХН. Укажите состав и определите группу стали по назначению. Назначьте и обоснуйте режим термической обработки, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие при термической обработке этой стали. Опишите структуру и свойства оправок после термической обработки.

4. Для нагревательных элементов сопротивления выбран сплав хромаль Х23Ю5. Расшифруйте состав и укажите требования, предъявляемые к сплавам этого типа, температурные границы применения этого сплава.

5. Опишите металлокерамические твердые сплавы группы ТТК. Укажите их состав, свойства и область применения в машиностроении.

Вариант 14

1. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8. Нанесите на нее кривую режима изотермической обработки,

обеспечивающей получение твердости 2500 НВ. Укажите, как этот режим называется, какая структура получается в этом случае?

2. На изделиях из стали 15 требуется получить поверхностный слой высокой прочности. Приведите обоснование выбора метода химико-термической обработки, опишите его технологию и структуру изделия после окончательной термической обработки.

3. В результате термической обработки рессоры должны получить повышенную упругость. Для их изготовления выбрана сталь 60С2ВА. Укажите состав, назначьте и обоснуйте режим термической обработки. Опишите микроструктуру и свойства рессор после термической обработки.

4. Для обшивки скоростных самолетов применяются сплавы на основе титана. Обоснуйте причины применения этих сплавов взамен алюминиевых. Приведите примеры титановых сплавов и сравните их механические характеристики с характеристиками алюминиевых сплавов при температуре 200–500 °С.

5. Для изготовления деталей путем глубокой вытяжки применяется латунь Л96. Укажите состав и опишите структуру сплава и назначьте режим промежуточной термической обработки, применяемой между отдельными операциями вытяжки, обоснуйте выбранный режим. Приведите общую характеристику механических свойств сплава.

Вариант 15

1. Используя диаграмму состояния «Железо – цементит» и кривую изменения твердости в зависимости от температуры отжига, назначьте для углеродистой стали 40 температуру закалки и температуру отжига, необходимые для обеспечения твердости 4500 НВ. Опишите превращения, которые совершались в стали в процессе закалки и отжига и полученную после термической обработки структуру.

2. Изделия из стали 40Х требуется подвергнуть улучшению. Назначьте режим термической обработки, опишите сущность происходящих превращений, структуру и свойства данной стали.

3. Для изготовления обрезных штампов выбрана сталь Х6ВФ. Укажите состав, назначьте и обоснуйте режим термической обработки, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие при термической обработке этой стали. Опишите структуру и свойства штампов после термической обработки.

4. Для нагревательных элементов сопротивления выбран сплав никром Х20Н80. Укажите состав и требования, предъявляемые к сплавам этого типа. Приведите температурные границы применимости сплава.

5. Для отливок сложной конфигурации используется бронза БрО10Ф1. Укажите состав сплава, его структуру и назначьте режим термической обработки для снятия внутренних напряжений, возникающих после отливки.

Вариант 16

1. После закалки углеродистой стали была получена бейнитная структура. Проведите на диаграмме термокинетического превращения переохлажденного аустенита кривую охлаждения, обеспечивающую получение такой структуры.

Опишите превращения, которые совершились в стали при нагреве и охлаждении, ее твердость.

2. Назначьте режим термической и химико-термической обработки шестерен из стали 20ХН с твердостью зуба 58–62 HRC. Опишите микроструктуру и свойства поверхности зуба и сердцевины шестерен после термической обработки.

3. Для изготовления молотовых штампов выбрана сталь 5ХНВ. Расшифруйте состав и определите группу стали по назначению. Назначьте режим термической обработки, приведите его обоснование, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие при термической обработке данной стали. Опишите микроструктуру и свойства штампов после термической обработки.

4. Для изготовления обшивки скоростных самолетов применяются сплавы на основе титана. Обоснуйте причины применения этих сплавов взамен алюминиевых. Приведите примеры титановых сплавов и сравните их механические характеристики с характеристиками алюминиевых сплавов при температуре 200–500 °С.

5. Для изготовления режущего инструмента используются сплавы Т5К10 и Т15К6. Укажите состав сплавов, способ изготовления и область применения. Объясните причины высокой теплостойкости этих сплавов в сравнении с углеродистыми и быстрорежущими сталями.

Вариант 17

1. Углеродистые стали 45 и У8 после закалки и отпуска имеют структуру мартенсит отпуска и твердость: первая – 50 HRC, вторая – 60 HRC. Используя диаграмму состояния «Железо – цементит» и учитывая превращения, происходящие в этих сталях при отпуске, укажите температуру закалки и температуру отпуска для каждой стали. Опишите превращения, происходящие в этих сталях в процессе закалки и отпуска и объясните, почему сталь У8 имеет большую твердость, чем сталь 45?

2. Назначьте температуру закалки, охлаждающую среду, температуру отпуска зенкеров из стали У12А. Опишите сущность происходящих превращений, микроструктуру и твердость инструмента после термической обработки.

3. В результате термической обработки валы должны получить повышенную прочность по всему сечению (твердость 3000–3500 НВ). Для их изготовления выбрана сталь 30ХГС. Укажите состав и определите группу стали по назначению. Назначьте и обоснуйте режим термической обработки, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие при термической обработке. Опишите структуру и свойства стали после термической обработки.

4. Назначьте нержавеющую сталь для изготовления деталей, работающих в среде уксусной кислоты при температуре не выше 40 °С. Приведите химический состав стали, необходимую термическую обработку и получаемую структуру. Объясните физическую природу коррозионной устойчивости стали и роль каждого легирующего элемента.

5. Для заливки вкладышей ответственных подшипников скольжения

выбран сплав Б83. Укажите состав сплава и определите группу сплава по назначению. Зарисуйте и опишите микроструктуру сплава. Приведите основные требования, предъявляемые к баббитам.

Вариант 18

1. Используя диаграмму состояния «Железо – цементит», опишите структурные превращения, происходящие при нагреве стали У11. Укажите критические точки и назначьте температуру нагрева этой стали под закалку и под нормализацию. Охарактеризуйте эти виды термической обработки, опишите получаемую структуру и свойства.

2. Пружина из стали 65 после правильно выполненной закалки и последующего отпуска имеет твердость значительно ниже, чем это требуется по техническим условиям. Чем вызван этот дефект и как можно его исправить? Укажите, какая твердость и структура обеспечивает упругие свойства пружин.

3. Для изготовления штампов горячей штамповки выбрана сталь 4Х3ВМФ. Назначьте и обоснуйте режим термической обработки, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие при термической обработке данной стали. Укажите микроструктуру и свойства штампов после термической обработки.

4. Для изготовления деталей подшипников качения выбрана сталь ШХ15СГ. Укажите состав стали, назначьте режим термической обработки и приведите свойства стали после термической обработки.

5. Опишите тугоплавкие металлы и сплавы на их основе. Приведите общую характеристику этих сплавов и укажите область их применения.

Вариант 19

1. С помощью диаграммы состояния «Железо – цементит» определите температуру нормализации, отжига и закалки для стали У10. Охарактеризуйте эти режимы термической обработки, опишите структуру и свойства стали после каждого вида обработки.

2. Выберите марку чугуна для изготовления ответственных деталей машин (коленчатые валы, шатуны и т. п.). Укажите состав, обработку, структуру и основные механические свойства деталей из этого чугуна.

3. В результате термической обработки зубчатые колеса должны получить твердый износостойчивый поверхностный слой при вязкой сердцевине. Для их изготовления выбрана сталь 18ХНМФА. Расшифруйте состав и определите группу стали по назначению. Назначьте режим термической и химико-термической обработки, приведите его обоснование, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие при термической обработке данной стали. Опишите микроструктуру и свойства стали после термической обработки.

4. Для деталей, работающих в окислительной атмосфере, применяется сталь 08Х18Н12Т. Расшифруйте состав и объясните назначение хрома в данной стали. Обоснуйте выбор стали для данных условий работы.

5. Для червячных пар выбирается бронза БрОЦС4–4–17. Расшифруйте состав и объясните назначение легирующих элементов и высокие антифрикционные свойства этой бронзы.

Вариант 20

1. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8, нанесите на нее кривую режима термической обработки, обеспечивающей получение твердости 1500 НВ. Укажите, как этот режим называется, опишите сущность превращений и какая структура получается в данном случае.

2. Назначьте режим термической обработки слабонагруженных деталей из стали 40. Приведите его обоснование и опишите структуру и свойства деталей. Объясните, почему удовлетворительные свойства на изделиях из данной стали могут быть получены в небольшом сечении?

3. Для изготовления матриц холодной штамповки выбрана сталь Х12Ф1. Укажите состав, назначьте и обоснуйте режим термической обработки, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие при термической обработке данной стали. Опишите микроструктуру и свойства матриц после термической обработки.

4. Для изготовления деталей, работающих в контакте с крепкими кислотами, выбрана сталь 15Х28. Укажите состав стали, объясните причину введения хрома и обоснуйте выбор этой стали для условий работы.

5. Для деталей арматуры выбрана бронза БрОФ10–1. Укажите состав и опишите структуру сплава. Объясните назначение легирующих элементов. Приведите механические свойства сплава.

Вариант 21

1. С помощью диаграммы «Железо – цементит» определите температуру нормализации, отжига и закалки для стали У10. Охарактеризуйте эти режимы термической обработки, опишите структуру и свойства стали после каждого вида обработки.

2. Для изготовления метчиков выбрана сталь У10. Назначьте режим термической обработки и приведите его обоснование. Укажите структуру и свойства метчиков в готовом виде.

3. Для изготовления обрезаемых матриц и пуансонов выбрана сталь 9ХФ. Расшифруйте состав и определите группу стали по назначению. Назначьте режим термической обработки, приведите его обоснование, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие при термической обработке данной стали. Опишите микроструктуру и свойства инструмента после термической обработки.

4. В авиационной и ракетной технике, а также в судостроении и приборостроении применяются высокопрочные мартенситно-старяющие стали Н18К8МЗТ, Н18К12М5Т и др. Укажите состав, термическую обработку, структуру и свойства этих сталей. Опишите природу упрочнения.

5. Для заготовок используется сплав БрОФ4–0,25. Расшифруйте состав сплава, его структуру, основные механические свойства и назначьте режим термической обработки для улучшения обрабатываемости.

Вариант 22

1. Используя диаграмму состояния железо-цементит, определите температуру полного и неполного отжига и нормализации для стали 25.

Охарактеризуйте эти режимы термической обработки и опишите микроструктуру и свойства стали.

1. Выберите сталь для изготовления рессор. Назначьте режим термической обработки, опишите сущность происходящих превращений, микроструктуру и главные свойства рессор после обработки. Каким способом можно повысить усталостную прочность рессор?

2. В результате термической и химико-термической обработки валы коробки передач автомобиля должны получить твёрдый износостойкий поверхностный слой при вязкой сердцевине. Для их изготовления выбрана сталь 15ХГН2ТА. Расшифруйте состав стали и определите группу стали по назначению. Назначьте и обоснуйте режим термической обработки, приведите его обоснование, объяснив влияние легирования на превращения, происходящие при термической обработке. Опишите микроструктуру и свойства стали после термической обработки.

3. Для изготовления прошивочных пуансонов выбрана сталь Р18. Укажите состав и определите группу данной стали по назначению. Назначьте режим термической обработки, приведите его обоснование, объяснив влияние легирующих элементов на превращения, происходящие при термической обработке данной стали. Опишите микроструктуру, свойства пуансонов после термической обработки.

4. Для поршней двигателя внутреннего сгорания выбран сплав АК4–1. Расшифруйте состав сплава, укажите способ изготовления деталей, режим термической обработки и природу упрочнения. Опишите характеристики механических свойств сплава.

Вопросы для самоконтроля:

1. Приведите определения основных процессов термической обработки: отжига, нормализации и заковки.

2. Какие вам известны разновидности процесса отжига и для чего они применяются?

3. Какова природа фазовых и термических напряжений?

4. Какие вам известны разновидности заковки и в каких случаях они применяются?

5. Каковы виды и причины брака при заковке?

6. Какие Вам известны группы охлаждающих сред и каковы их особенности?

7. От чего зависит прокаливаемость стали и в чем ее технологическое значение?

8. Какие вам известны технологические приемы уменьшения деформации при термической обработке?

9. Для чего и как производится обработка холодом?

10. Как изменяются скорость и температура нагрева изделий из легированной стали по сравнению с углеродистой?

11. В чем сущность и особенности термомеханической обработки?

12. Как влияет поверхностная закалка на эксплуатационные характеристики изделия?

13. Как регулируется глубина закаленного слоя при нагреве токами высокой частоты?

14. Каковы сущность и назначение диаграмм допустимых и преимущественных режимов нагрева под закалку токами высокой частоты?

15. Каковы преимущества поверхностной индукционной закалки?

Тема №7 «Коррозия металлов и сплавов и методы борьбы с ней»

Теоретическая часть

Коррозией металлов называют самопроизвольное разрушение металла вследствие химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой.

Под воздействием внешней среды многие металлы и сплавы постепенно окисляются и разрушаются. Разрушение начинается с поверхности и с течением времени распространяется в глубь металлического изделия. Коррозионно-стойкими называют металлы и сплавы, которые способны сопротивляться коррозионному воздействию среды. Процессы коррозии в таких металлах протекают с малой скоростью. Антикоррозионная защита металлов имеет большое народнохозяйственное значение, поскольку обуславливает надежность и долговечность эксплуатации машин, механизмов, различных металлических сооружений (нефте- и газопроводов, железнодорожных мостов, опор линий электропередач и др.).

Практически все металлы (кроме золота, платины и серебра) под действием влаги, воздуха, газов, растворов кислот и щелочей корродируют и разрушаются. Различают два основных вида коррозии — электрохимическую и химическую.

Электрохимической коррозией называют процесс самопроизвольного взаимодействия металла с коррозионной средой, в ходе которого последовательно протекают окисление металла и восстановление окислительного компонента. Она развивается во влажной атмосфере и почве, в морской и речной воде, водных растворах солей, щелочей и кислот. При электрохимической коррозии возникает коррозионный ток и происходит растворение металла вследствие его электрохимического взаимодействия с электролитом. Электролитами при этом могут быть любые жидкости, проводящие электрический ток.

Коррозия большинства металлов протекает по электрохимическому механизму. Примерами могут быть ржавление металлических конструкций в атмосфере, корпусов судов в речной и морской воде, коррозия оборудования химических предприятий, стальной арматуры гидросооружений.

При соприкосновении металла с электролитом положительно заряженные ионы металла с поверхности переходят в электролит. При этом электролит становится положительно заряженным, а поверхность металла — отрицательно. Между металлом и электролитом возникает электродвижущая сила. Вследствие

постоянного перехода ионов с поверхности металла в электролит будет происходить его постепенное растворение, т.е. коррозия.

Количество электролита при коррозии может быть весьма незначительным. Например, для начала процесса коррозии достаточно конденсации влаги из воздуха на поверхности металла, поэтому электрохимическая коррозия наблюдается и в закрытых помещениях.

В зависимости от условий, в которых протекают коррозионные процессы, различают атмосферную, морскую, почвенную, кислотную и щелочную, по характеру разрушения — равномерную и местную коррозию. Кроме того, выделяют другие виды коррозионного разрушения.

Кавитационная коррозия — это разрушение металла в результате электрохимической коррозии и ударного воздействия кавитационных пузырьков электролита при его движении с большой скоростью.

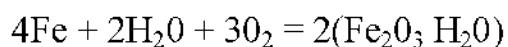
Точечная коррозия — вид местной коррозии в электрохимически неоднородной коррозионной среде. Это наиболее опасный вид коррозии, так как распространяется на значительную глубину и быстро приводит изделие в негодность. Чаще всего точечная коррозия наблюдается в местах механических повреждений поверхности изделия (риски, царапины, задиры), поэтому она особенно опасна для герметичных конструкций (трубопроводы, емкости, аппараты химической промышленности и т.п.), поскольку контроль за состоянием их поверхностей затруднен.

Межкристаллитная коррозия представляет собой хрупкое коррозионное разрушение по границам кристаллов, возникающее в результате структурных превращений в процессе эксплуатации.

Коррозия начинается с поверхности и распространяется в глубь изделия, в основном по границам зерен. Этот вид коррозии имеет место также при термической обработке стали или при обработке давлением, если неправильно выбраны режимы нагрева. Такая коррозия мало заметна при визуальном осмотре, поэтому представляет определенную опасность.

Коррозионная усталость — это разрушение металла при одновременном воздействии циклических нагрузок и агрессивной среды. Установлено, что разрушение металлов при коррозионной усталости более значительно, чем при раздельном воздействии циклических нагрузок и коррозионной среды. Вследствие этого выносливость металлов в коррозионной среде существенно уменьшается.

Химическая коррозия — разрушение металла вследствие химического взаимодействия с внешней коррозионной средой. Продуктами химической коррозии являются химические соединения металла с окислительными компонентами среды, например образование ржавчины, вызванное действием кислорода и влаги:



Химическая коррозия развивается при воздействии на металл сухих газов (например, продуктов сгорания топлива), сухого водяного пара, кислорода, а также жидкостей, не проводящих электрический ток.

В чистом виде химическая коррозия наблюдается, например, при высокотемпературном нагреве сталей для горячей обработки давлением или термической обработки (образование окалины), на деталях топок и котлов, тепловых двигателей, газо- и нефтепроводов.

В отдельных случаях пленки из образовавшихся при химической коррозии соединений предохраняют металлы от дальнейшего разрушения. Например, плотная оксидная защитная пленка образуется на поверхности алюминия, никеля, хрома и некоторых других металлов. Пленки оксидов железа на стальных деталях непрочные, они неплотно прилегают к поверхности металла и не препятствуют распространению коррозии в глубь деталей.

Для оценки степени разрушения металлов в процессе коррозии принят показатель, называемый коррозионной стойкостью. Коррозионную стойкость металлов можно оценить внешним осмотром, при этом определяют характер распространения коррозии, особенности продуктов коррозии, прочность их сцепления с поверхностью металла и т.п.

Мерой коррозионной стойкости металлов может быть скорость коррозии, которую определяют по изменению массы металла в результате коррозии, отнесенной к единице площади поверхности, в единицу времени. В частности, скорость коррозии выражают массой (в граммах) металла, превращенного в продукты коррозии за единицу времени (1 ч) и отнесенной к единице его поверхности (1 м^2).

На скорость коррозии влияет состав металлов, их механическая и термическая обработка, состояние поверхности, а также температура, характер среды и нагрузки. С повышением температуры скорость коррозионных процессов возрастает. Полированные поверхности окисляются медленнее, так как пленка оксидов более равномерна по толщине и поэтому более прочно сцеплена с поверхностью металла.

По способности противостоять коррозионному воздействию внешней среды металлы подразделяют:

- на коррозионно-стойкие, обладающие стойкостью к электрохимической коррозии (например, высоколегированные хромистые стали);
- жаростойкие, способные сопротивляться коррозионному воздействию агрессивных газов в незагруженных или слабо нагруженных конструкциях, при высоких температурах (выше 550°C);
- жаропрочные, работающие в нагруженных узлах машин и длительно сохраняющие работоспособность при высоких температурах;
- кислотостойкие, не разрушающиеся в агрессивных кислотных средах.

Все конструкционные и инструментальные материалы в большей или меньшей степени подвержены коррозионному воздействию внешней среды. Большая часть изделий в машиностроении изготовлена из сталей и чугунов, поэтому их защита от коррозии представляет наибольший интерес.

Существует много способов защиты металлов от коррозии. Выбор того или иного способа определяется конкретными условиями работы или хранения изделия. В настоящее время с целью увеличения срока службы изделий и

обеспечения надежности их работы используют следующие способы защиты от коррозии: нанесение металлических и неметаллических покрытий, применение ингибиторов коррозии, химическая и электрохимическая защита.

Металлические покрытия применяют для защиты от коррозии деталей машин и приборов, а также различных металлоконструкций. При этом выбирают металл, обладающий достаточной коррозионной стойкостью в данной среде. В ряде случаев нанесенные покрытия могут повысить износостойкость не только отдельных деталей, но и изделия в целом.

Различают два типа металлических покрытий — анодное и катодное. При анодном покрытии изделие защищают металлом с большим отрицательным электродным потенциалом. Срок службы анодных покрытий возрастает при увеличении их толщины. Анодное покрытие защищает основной металл готовых изделий электрохимически. Для железоуглеродистых сплавов в качестве анодного покрытия может быть использован цинк или кадмий. Покрытие из цинка наносят также на медь, латунь, алюминий. Цинковые покрытия широко применяют для защиты листовой стали, а также водопроводных труб и различных резервуаров от действия воды и других жидкостей.

Катодные покрытия производят металлами, электродный потенциал которых в данном электролите выше потенциала основного металла. Катодные покрытия создают механическую защиту основного металла. Нарушение сплошности покрытия (например, механическое повреждение) приводит к усилению электрохимической коррозии основного металла. Для сталей катодным покрытием может быть олово, медь, никель.

Металлические покрытия наносят различными способами. Наиболее часто применяют горячий способ, гальванизацию, а также напыление и плакирование.

При горячем способе получения покрытия изделие погружают в расплавленный металл, который смачивает поверхность и покрывает ее тонким слоем. Затем изделие вынимают из ванны и охлаждают. Горячий способ применяют для нанесения тонкого слоя олова (лужение) или цинка (цинкование).

Лужение применяется в производстве белой жести, для покрытия внутренних поверхностей пищевых котлов и для других целей, цинкование — для защиты проволоки, кровельного железа, труб.

Гальванизация, т.е. нанесение металлических покрытий гальваническим путем, основана на физических законах о прохождении постоянного электрического тока через жидкую среду — электролит. При этом в качестве анода применяют металл, который необходимо нанести в качестве покрытия. Катодом служит изделие. При пропускании тока через электролит анод растворяется в электролите и наполняет его катионами, которые затем разряжаются на катоде (изделии). Гальванизация обеспечивает нанесение покрытия практически из любого металла на заготовки также из любого металла. Толщину гальванического покрытия можно регулировать в достаточно широких пределах.

Напылением плазменной струей наносят антикоррозионные покрытия из расплавленного металла (металлизация), оксидов, боридов, нитридов и других соединений. Они могут применяться в виде проволоки, прутков или порошков.

Аппараты для напыления называются металлизаторами. Преимуществом плазменного напыления является формирование покрытий высокой плотности при хорошей сцепляемости с основанием.

Плакирование (термомеханическое покрытие) заключается в совместной горячей прокатке основного и защитного металлов. Сцепление между металлами осуществляется в результате диффузии под влиянием совместной деформации горячей заготовки. Защищаемый металл покрывают с одной или с обеих сторон медью, медными сплавами, алюминием или нержавеющей сталью.

Неметаллические покрытия выполняются из лаков, красок, эмалей, смазок, пластмасс и других органических и неорганических веществ.

Наиболее распространенным способом защиты металлоконструкций, машин и механизмов от воздействия различных агрессивных сред являются лакокрасочные покрытия, которые имеют значительные преимущества перед металлическими. Они легко наносятся на изделие, хорошо закрывают поры, не влияют на свойства металла и являются сравнительно недорогими. При правильном подборе лаков и красок и соблюдении технологии их нанесения срок службы покрытий около 5 лет.

Технологический процесс нанесения лакокрасочного покрытия включает подготовку поверхности, приготовление лакокрасочных материалов, нанесение покрытий и их сушку.

При длительном хранении и транспортировке металлические изделия покрывают специальными консервационными смазками и жирами. При необходимости смазки периодически обновляют.

Ингибиторы коррозии — это органические и неорганические соединения, которые вводят в небольших количествах в агрессивную среду для предотвращения коррозии или уменьшения ее скорости. Ингибиторы коррозии используют, например, для защиты различных трубопроводов, теплообменных аппаратов, нефтедобывающего и химического оборудования.

Химическая защита заключается в искусственном создании на поверхности изделия защитных пленок. Защитные пленки получают при воздействии на металл сильных химических реагентов. Наведение оксидных пленок называют оксидированием. Наиболее широко применяют оксидирование для защиты от коррозии алюминия, магния и их сплавов.

На стальных изделиях наводят также пленки из фосфатов марганца и железа. Этот процесс называют фосфатированием. Получаемые при этом пленки прочнее оксидных.

Электрохимическая защита — защита металлов от коррозии при помощи протекторов. Протекторы применяют для защиты конструкций, соприкасающихся с электролитом. Протекторы — пластины из металла, имеющего в данной среде меньший электродный потенциал, чем потенциал основного металла. Протекторы прикрепляют к поверхности защищаемого изделия, в результате образуется гальваническая пара, в которой анодом является протектор, а катодом — изделие. В таких условиях протектор будет постепенно разрушаться, защищая основной металл. После полного разрушения протектор заменяют. Таким способом за-

щищают, например, подводные части морских судов, прикрепляя к ним цинковые протекторы.

Катодную защиту применяют для защиты подземных металлических сооружений (трубопроводов, кабелей и др.), которые присоединяют к отрицательному полюсу источника постоянного тока, а положительный полюс заземляют. Следует заметить, что значительное повышение антикоррозионных свойств сталей достигается введением в их состав некоторых легирующих элементов. При оптимальном сочетании таких элементов можно создать композиции, практически не корродирующие в данной среде.

Расчетная часть

1 Составьте уравнение реакции, протекающей при химической коррозии металла, рассчитайте α , ΔG_T ; по таблицам ΔG_{298}^0 выберите металл, которым можно легировать данный металл. Начальное давление кислорода $P_{O_2} = 101325$ Па.

Вариант	Металл	Оксид	Температура	Вариант	Металл	Оксид	Температура
1	Nb	Nb ₂ O ₅	750	11	Sb	Sb ₂ O ₃	500
2	Cr	Cr ₂ O ₃	750	12	Pd	PdO	500
3	Ta	Ta ₂ O ₅	500	13	Mo	MoO ₃	500
4	Ru	RuO ₂	450	14	Cd	CdO	1000
5	W	WO ₃	750	15	Ge	GeO ₂	1000
6	Fe	FeO	750	16	Cu	Cu ₂ O	850
7	Sc	Sc ₂ O ₃	500	17	Zn	ZnO	960
8	Tl	Tl ₂ O ₃	400	18	Zr	ZrO ₂	765
9	Bi	Bi ₂ O ₃	500	19	Te	TeO ₃	970
10	Co	CoO	750	20	Y	Y ₂ O ₃	930

2 Нанесите уравнение электрохимических реакций и уравнения реакций побочных процессов при коррозии данного металла с водородной и кислородной деполяризацией. Укажите термодинамическую возможность коррозионного процесса. Рассчитайте разность потенциалов под током при коррозии с учетом перенапряжения.

Вариант	Металл	Среда	Вариант	Металл	Среда
1	Ni	pH < 7	11	Mo	pH < 7
2	Mn	pH ≥ 7	12	Nb	pH ≥ 7
3	Al	pH < 7, pH = 7	13	Ta	pH ≥ 7
4	Zn	pH < 7	14	V	pH < 7, pH = 7
5	Cr	pH < 7	15	Ti	pH < 7
6	Co	pH < 7	16	Y	pH < 7
7	Cd	pH < 7	17	Zr	pH < 7
8	In	pH < 7	18	Te	pH < 7, pH = 7

9	Ga	$\text{pH} < 7, \text{pH} = 7$	19	Bi	$\text{pH} \geq 7$
10	Hf	$\text{pH} < 7$	20	Sc	$\text{pH} < 7$

Необходимые справочные данные приведены в приложении В.

Вопросы для самоконтроля:

1. Что такое коррозия металлов?
2. Что такое ржавление?
3. Что такое ржавчина?
4. Какие процессы происходят при химико-термической обработке металлов?
5. Каковы экономические последствия коррозии?
6. Как различается коррозия по месту распределения?
7. Как различается коррозия по физико-химическим процессам?
8. Как возникает химическая коррозия?
9. Что такое цвета побежалости?
10. Что называется электрохимической коррозией?
11. Какие виды коррозии наиболее распространены?
12. Почему возникает электрохимическая коррозия?
13. Как в окружающей среде проявляется электролит?
14. Поясните принцип возникновения электрохимической коррозии?
15. Защита от коррозии легированием.
16. Защита от коррозии неметаллическими пленками.
17. Защита от коррозии металлическими покрытиями, перечислите виды защит.
18. Защита от коррозии методами погружения и распыления.
19. Защита от коррозии гальваническим методом?
20. Защита от коррозии диффузионным методом.
21. Защита от коррозии методом плакирования?
22. Защита от коррозии протекторами.
23. Защита от коррозии неметаллическими покрытиями.
24. Защита от коррозии с помощью ингибиторов.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЭБС«Znanium.com» Сироткин О.С. Основы современного материаловедения: Учебное пособие / О.С. Сироткин. - М.: ИНФРА-М, 2015. - 364 с. - Режим доступа: <http://znanium.com/>
2. ЭБС«Znanium.com» Фетисов Г.П. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебное пособие / Г.П. Фетисов, А.Г. Фаат. - М.: ИНФРА-М, 2014. - 397 с. - Режим доступа: <http://znanium.com/>
3. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебное пособие для студентов ВУЗов / А.В. Шишкин и др.; под ред. В.С. Чередниченко. – 3-е изд., стер. – М.: ОМЕГА-Л, 2007. – 751с.
4. Технология конструкционных материалов. Учебник для студентов ВУЗов в 4 ч. Под ред. Д.М. Соколова, С.А. Васина, Г.Г Дубенского. – Тула. Изд-во ТулГУ. – 2007.
5. Бондаренко, Г.Г. Материаловедение : учебник для бакалавров / Г.Г. Бондаренко, Т.А. Кабанова, В.В. Рыбалко ; под ред. Г.Г. Бондаренко. - 2-е изд. - Москва : Юрайт, 2012. - 359 с.
6. Материаловедение в машиностроении : учебник для бакалавров / А.М. Адаскин [и др.]. - Москва : Юрайт, 2012. - 535 с.
7. Колесник, П.А. Материаловедение на автомобильном транспорте : учебник для студентов вузов / П.А. Колесник, В.С. Кланица. - 4-е изд., стер. - М. : Академия, 2010. - 320 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Металлические атомные радиусы элементов, Å

H	0,78	S	1,27	Zn	1,394	Ru	1,339	Ce	1,715	Yb	1,940	Pb	1,750
Li	1,562	K	2,376	Ga	1,411	Rh	1,345	Pr	1,828	Lu	1,734	Bi	1,70
Be	1,128	Ca	1,974	Ge	1,369	Pd	1,376	Nd	1,821	Hf	1,580	Po	1,76
B	0,98	Sc	1,641	As	1,39	Ag	1,445	Pm	1,810	Ta	1,467	Fr	2,80
C	0,916	Ti	1,462	Se	1,40	Cd	1,568	Sm	1,802	W	1,408	Ra	2,26
N	0,88	V	1,346	Rb	2,546	In	1,663	Eu	2,042	Re	1,375	Ac	1,878
O	0,89	Cr	1,360	Sr	2,151	Sn	1,623	Gd	1,802	Os	1,353	Th	1,798
Na	1,911	Mn	1,304	Y	1,801	Sb	1,59	Tb	1,782	Ir	1,357	Pa	1,63
Mg	1,602	Fe	1,274	Zr	1,602	Te	1,60	Dy	1,773	Pt	1,387	U	1,56
Al	1,432	Co	1,252	Nb	1,468	Cs	2,731	Ho	1,766	Au	1,442	Np	1,555
Si	1,319	Ni	1,246	Mo	1,400	Ba	2,243	Er	1,757	Hg	1,573	Pu	1,58
P	1,28	Cu	1,278	Tc	1,360	La	1,877	Tm	1,746	Tl	1,716	Am	1,81

Атомные радиусы приведены для координационного числа 12 (R_{12}). Переход к другим координационным числам: $R_8 = 0,973 \cdot R_{12}$; $R_6 = 0,96 \cdot R_{12}$; $R_4 = 0,88 \cdot R_{12}$.

Атомные массы и кристаллические структуры элементов

		A , г/мо	Решётки и температуры фазовых превращений, °С	Параметры решётки, Å
1	H	1,00	ГЦК (–272) ГПУ (–259) (–253)	(3,776; 6,162)
2	He	4,00	ГПУ (–271) (–269)	(3,470; 5,540)
3	Li	6,9	9R (–199) ОЦК (181) (1342)	3,5093
4	Be	9,01	ГПУ (1270) ОЦК (1289) (2472)	2,2859; 3,5845
5	B	10,8	ромбоэдрич. (2092) (4002)	10,17; $\alpha=65,12^\circ$
6	C	12,0	графита (4492)	2,4612; 6,709
7	N	14,0	кубич. (–238) гексаг. (–210) (–196)	(4,050; 6,604)
8	O	15,9	монокл. (–249) ромбоэдрич. (–229) кубич. (–219) (–183)	(6,83)
9	F	18,9	монокл. (–228) кубич. (–220) (–188)	(6,67)
10	Ne	20,1	ГЦК (–249) (–246)	(4,462)
11	Na	22,9	ГПУ (–241) ОЦК (98) (883)	4,2906
12	Mg	24,3	ГПУ (650) (1090)	3,2094; 5,2107
13	Al	26,9	ГЦК (660) (2520)	4,0496
14	Si	28,0	алмаза (1414) (3267)	5,4306
15	P	30,9	кубич. (44) (277)	7,18
16	S	32,0	ромбич. (96) монокл. (115) (445)	10,464; 12,866;
17	Cl	35,4	ромбич. (–101) (–34)	(6,24; 4,48; 8,26)
18	Ar	39,9	ГЦК (–189) (–186)	(5,3109)
19	K	39,0	ОЦК (64) (759)	5,321

20	Ca	40,0	ГЦК (443) ОЦК (842) (1484)	5,5884
21	Sc	44,9	ГПУ (1337) ОЦК (1541) (2831)	3,3088; 5,2680
22	Ti	47,8	ГПУ (882) ОЦК (1670) (3289)	2,9506; 4,6835
23	V	50,9	ОЦК (1910) (3409)	3,0240
24	Cr	51,9	ОЦК (1863) (2672)	2,8848
25	Mn	54,9 28	кубич. (727) кубич. (1100) ГЦК (1138) ОЦК (1246) (2062)	8,9126
26	Fe	55,8	ОЦК (912) ГЦК (1394) ОЦК (1538) (2862)	2,8665
27	Co	58,9	ГПУ (422) ГЦК (1495) (2928)	2,5071; 4,0686
28	Ni	58,6	ГЦК (1455) (2914)	3,5240
29	Cu	63,5	ГЦК (1085) (2563)	3,6146
30	Zn	65,	ГПУ (420) (907)	2,6650; 4,9470
31	Ga	69,7	ромбич. (30) (2205)	4,5186; 7,6570;
32	Ge	72,	алмаза (938) (2834)	5,6574
33	As	74,9	ромбоэдрич. (614)	4,1319; $\alpha=54,12^\circ$
34	Se	78,	гексаг. (221) (685)	4,3659; 4,9537
35	Br	79,9	ромбич. (-7) (+59)	(6,68; 4,49; 8,74)
36	Kr	83,7	ГЦК (-157) (-153)	(5,810)
37	Rb	85,4	ОЦК (39) (688)	5,705
38	Sr	87,	ГЦК (547) ОЦК (769) (1382)	6,084
39	Y	88,9	ГПУ (1478) ОЦК (1522) (3338)	3,6482; 5,7318
40	Zr	91,2	ГПУ (863) ОЦК (1855) (4409)	3,2316; 5,1475
41	Nb	92,9	ОЦК (2469) (4744)	3,3004
42	Mo	95,	ОЦК (2623) (4639)	3,1470
43	Tc	[97,	ГПУ (2204) (4265)	2,738; 4,393
44	Ru	101,	ГПУ (2334) (4150)	2,7058; 4,2816
45	Rh	102,	ГЦК (1963) (3697)	3,8032
46	Pd	106,	ГЦК (1555) (2964)	3,8903
47	Ag	107,	ГЦК (962) (2163)	4,0857
48	Cd	112,	ГПУ (321) (767)	2,9793; 5,6196
49	In	114,	тетр. (157) (2073)	3,253; 4,9470
50	Sn	118,	алмаза (13) тетр. (232) (2603)	5,8318; 3,1818
51	Sb	121,	ромбоэдрич. (631) (1587)	4,5067; $\alpha=57,11^\circ$
52	Te	127,	гексаг. (450) (988)	4,4566; 5,9264
53	I	126,	ромбич. (114) (185)	7,2697; 4,7903;
54	Xe	131,	ГЦК (-112) (-108)	(6,350)
55	Cs	132,	ОЦК (28) (671)	6,141
56	Ba	137,	ОЦК (727) (1898)	5,0227
57	La	138,	дв. ГПУ (310) ГЦК (865) ОЦК (918)	3,7740; 12,171
58	Ce	140, 12	ГЦК (-177) дв. ГПУ (61) ГЦК (726) ОЦК (798) (3426)	3,6810; 11,857
59	Pr	140,	дв. ГПУ (795) ОЦК (931) (3512)	3,6721; 11,8326
60	Nd	144,	дв. ГПУ (863) ОЦК (1021) (3068)	3,6582; 11,7966

61	Pm	[14	дв. ГПУ (890) ОЦК (1042) (2600)	3,65; 11,65
62	Sm	150,	9R (734) ГПУ (922) ОЦК (1074) (1791)	3,6290; 26,207
63	Eu	151,	ОЦК (822) (1597)	4,5827
64	Gd	157,	ГПУ (1235) ОЦК (1313) (3266)	3,6336; 5,7810
65	Tb	158, 02	ромбич. (-53) ГПУ (1289) ОЦК (1356) (3223)	3,6055; 5,6966
66	Dy	162, 50	ромбич. (-187) ГПУ (1381) ОЦК (1412) (2562)	3,5915; 5,6501
67	Ho	164,	ГПУ (1474) (2695)	3,5778; 5,6178
68	Er	167,	ГПУ (1529) (2863)	3,5592; 5,5850
69	Tm	168,	ГПУ (1545) (1947)	3,5375; 5,5540
70	Yb	173,	ГПУ (-3) ГЦК (795) ОЦК (819) (1194)	5,4848
71	Lu	174,	ГПУ (1663) (3395)	3,5052; 5,5494
72	Hf	178,	ГПУ (1743) ОЦК (2231) (4603)	3,1946; 5,0510
73	Ta	180,	ОЦК (3020) (5458)	3,3030
74	W	183,	ОЦК (3422) (5555)	3,1652
75	Re	186,	ГПУ (3186) (5596)	2,7609; 4,458
76	Os	190,	ГПУ (3033) (5012)	2,7341; 4,3198
77	Ir	192,	ГЦК (2447) (4428)	3,8392
78	Pt	195,	ГЦК (1769) (3827)	3,9236
79	Au	196,	ГЦК (1064) (2857)	4,0782
80	Hg	200,	ромбоэдрич. (-39) (+357)	(3,005; $\alpha=70,53^\circ$)
81	Tl	204,	ГПУ (230) ОЦК (304) (1473)	3,4566; 5,5248
82	Pb	207	ГЦК (328) (1750)	4,9502
83	Bi	208,	ромбоэдрич. (271) (1564)	4,7460; $\alpha=57,23^\circ$
84	Po	[20	кубич. (54) ромбоэдрич. (254) (962)	3,366
85	At	[21	? (302) (334)	
86	Rn	[22	ГЦК (-71) (-62)	
87	Fr	[22	ОЦК (27) (677)	
88	Ra	[22	ОЦК (700) (1320)	5,148
89	Ac	[22	ГЦК (1051) (3200)	5,311
90	Th	232,	ГЦК (1360) ОЦК (1755) (4788)	5,0842
91	Pa	231,	тетр. (1170) ОЦК (1572) (3780)	3,921; 3,235
92	U	238,	ромбич. (668) тетр. (776) ОЦК (1135)	2,8537; 5,8695;
93	Np	[23	ромбич. (280) тетр. (576) ОЦК (639)	6,663; 4,723; 4,887
94	Pu	[24 41	монокл. (125) монокл. (215) ромбич. (320) ГЦК (463) тетр. (483) ОЦК (640) (3230)	6,183; 4,822; 10,963; $\beta=101,97^\circ$
95	Am	[24	дв. ГПУ (769) ГЦК (1077) ОЦК (1176)	3,4681; 11,241
96	Cm	[24	дв. ГПУ (1277) ГЦК (1345)	3,496; 11,331
97	Bk	[24	дв. ГПУ (977) ГЦК (1050)	3,416; 11,069
98	Cf	[25	дв. ГПУ (590) ГЦК (900)	3,39; 11,015
99	Es	[25	дв. ГПУ (?) ГЦК (860)	

A — атомная масса (в квадратных скобках — для наиболее стабильного изотопа). Решётки обозначены сокращёнными наименованиями: ОЦК, ГЦК, ГПУ, дв. ГПУ («двойная ГПУ» с чередованием слоёв $ABCB$), 9R (девятислойная плотноупакованная с чередованием $ABCBCACAB$), графита, алмаза; для остальных решёток указана только сингония. Жирным шрифтом выделена решётка при комнатной температуре. Между обозначениями решёток приведены температуры полиморфных переходов, после них — температуры плавления и кипения. Параметры решётки даны для комнатной температуры; для элементов с температурой плавления ниже комнатной указаны параметры решётки наиболее высокотемпературной модификации (в скобках).

Свойства элементов

		ρ , г/см ³	G , ГПа	ν	ε_v , эВ	ε_m , эВ	T_D , К	γ , мДж/м	Наиболее долго- живущий изотоп
1	H						110		
2	He								
3	Li	0,534	3,90	0,35	0,34	0,21	448		
4	Be	1,848	148	0,034			1031	α :	
5	B	2,34					1250		
6	C	2,26					1860		
7	N						79		
8	O						46		
9	F								
10	Ne						63		
11	Na	0,971	2,11	0,36	0,38		155		
12	Mg	1,738	17,3	0,29	0,58	0,82	330		
13	Al	2,689	26,4	0,35	0,66	0,65	390	1140	
14	Si	2,33	66,5	0,22			645		
15	P	1,82							
16	S	2,07							
17	Cl								
18	Ar						85		
19	K	0,862	1,04	0,36			100		
20	Ca	1,55	7,5	0,31			230		
21	Sc	2,989	29,5	0,28			476		
22	Ti	4,505	43,4	0,32			380	β :	
23	V	5,96	47,5	0,36	2,1	1,2	390		
24	Cr	7,19	115	0,21	2,27	2,23	424	2090	
25	Mn	7,44	83	0,32			363		
26	Fe	7,874	79,7	α : 0,29	α : 1,6 γ : 1,6	α : 1,28	373	γ : 2170	
27	Co	8,90	74,8	0,34	β : 1,62	β : 1,07	386	α : 1500	
28	Ni	8,91	86,2	0,30	1,72	1,30	345	1940	
29	Cu	8,96	47,7	0,35	1,22	0,78	310	1520	
30	Zn	7,133	39,6	0,26	0,51	0,44	237	868	
31	Ga	5,904					240	767	
32	Ge	5,323	54,8	0,21			373	820	
33	As	5,73					285		
34	Se	4,79	19	0,45			150		
35	Br	(3,119)							
36	Kr						73		

37	Rb	1,532	0,80	0,36			59		
38	Sr	2,63	5	0,28			148		
39	Y	4,469	25,4	0,25			214		
40	Zr	6,45	36,0	0,33			250	β:	
41	Nb	8,57	37,5	0,40	2,5	0,95	260	2210	
42	Mo	10,22	124	0,30	3,15	1,32	377	2630	
43	Tc	11,49	123	0,31			422		⁹⁸ Tc: 6,6 млн лет
44	Ru	12,41	191	0,25			415		
45	Rh	12,41	149	0,26			350		
46	Pd	12,02	50,0	0,38	1,85	0,91	275		
47	Ag	10,50	29,6	0,37	1,10	0,65	221	1205	
48	Cd	8,65	24,2	0,30	0,42	0,38	321	675	
49	In	7,31	5,07	0,44	0,52	0,27	129	633	
50	Sn	7,29	18,2	0,35	0,53	0,59	254	β: 673	
51	Sb	6,691	20	0,33			200		
52	Te	6,24					135		
53	I	4,93							
54	Xe								
55	Cs	1,873	0,70	0,36			43		
56	Ba	3,594	6,2	0,28			116		
57	La	6,145	13,6	0,29			135		
58	Ce	6,77	12,8	0,25			138		
59	Pr	6,773	14,8	0,28			138		
60	Nd	7,007	18,5	0,28			148		
61	Pm	7,22							¹⁴⁵ Pm: 17,7 года
62	Sm	7,536	13	0,35			184		
63	Eu	5,243	6,2	0,25			127		
64	Gd	7,895	21,8	0,26			184		
65	Tb	8,272	22,7	0,26			158		
66	Dy	8,550	24,6	0,25			158		
67	Ho	8,795	26,3	0,23			161		
68	Er	9,066	28,3	0,24			163		
69	Tm	9,321	23,8	0,28			167		
70	Yb	6,965	9,9	0,35			118		
71	Lu	9,840	27,1	0,26			116		
72	Hf	13,31	55,8	0,28			213		
73	Ta	16,654	69,1	0,34	2,5	1,1	225	2480	
74	W	19,35	160	0,28	3,2	1,78	312	2690	

75	R	21,0	179	0,29			275	2200	
76	O	22,5	225,	0,26			400		
77	I	22,4	216,	0,25			228		
78	P	21,4	65,8	0,39	1,33	1,43	225	1950	
79	A	19,3	27,8	0,42	0,97	0,81	178	1410	
80	H	(13,5					100		
81	T	11,8	5,35	0,43			91	β : 562	
82	P	11,3	8,51	0,41	0,53	0,55	87	560	
83	B	9,7	12	0,33	0,35		120	501	
84	P	9,3	$E=2$						²⁰⁹ Po: 102 года
85	A								²¹⁰ At: 8,1 часа
86	R								²²² Rn: 3,823 суток
87	F	2,4					77		²²³ Fr: 22,0 мин
88	R	5,0					85		²²⁶ Ra: 1599 лет
89	A	10,0					118		²²⁷ Ac: 21,77 года
90	T	11,7	27,7	0,30			100		²³² Th: 14,0 млрд
91	P	15,3					262		²³¹ Pa: 32,5 тыс.
92	U	19,0	80,5	0,16	γ : 1,2		300		²³⁸ U: 4,468 млрд
93	N	20,2	76	0,22			163		²³⁷ Np: 2,14 млн
94	P	19,8	~40	0,21			176		²⁴⁴ Pu: 80,0 млн
95	A	13,6							²⁴³ Am: 7,37 тыс.
96	C								²⁴⁷ Cm: 15,6 млн
97	B	14,7							²⁴⁷ Bk: 1,4 тыс. лет
98	C								²⁵¹ Cf: 0,90 тыс.
99	E	8,8							²⁵² Es: 472 суток

ρ — плотность при комнатной температуре (для твёрдых тел; в скобках — для жидкостей).

G — модуль сдвига при комнатной температуре; ν — коэффициент Пуассона.

Модуль Юнга E можно найти по формуле $E = 2G(1 + \nu)$.

ϵ_V и ϵ_m — энергии образования и миграции вакансии.

T_D — температура Дебая.

γ — поверхностная энергия (поверхностное натяжение) в твёрдом состоянии.

В последней колонке для радиоактивных элементов приведена атомная масса наиболее долгоживущего изотопа элемента и период его полураспада.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Формулы для расчета объема элементарной ячейки

Кубическая сингония — $V = a^3$.

Тетрагональная сингония — $V = a^2c$.

Ромбическая сингония — $V = abc$.

Ромбоэдрическая сингония — $V = a^3 \sqrt{1 - 3 \cos^2 \alpha + 2 \cos^3 \alpha}$.

Гексагональная сингония — $V = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 c = 0,866 a^2 c$.

Моноклинная сингония — $V = abc \sin \beta$.

Триклинная сингония —

$$V = abc \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Перенапряжения катодного восстановления некоторых ионов

(при $i = 0,01 \text{ A/cm}^2$), pH < 7, E = 298 К

Ион	$\eta_k, \text{В}$		$\eta_k, \text{В}$		$\eta_k, \text{В}$		$\eta_k, \text{В}$
Zn^{2+}	0,03	Re^{3+}	0,65	H^+ (на	0,47	H^+ (на Re)	0,6
Ag^+	0,18	Pd^{2+}	0,48	(на	0,24	(на Pd)	0,3
Pb^{2+}	0,04	Sn^{4+}	0,35	(на Zn)	0,72	(на Mn)	0,45
Cr^{3+}	0,41	Cr^{2+}	0,22	(на	0,98	(на Co)	0,50
Mn^{2+}	0,5	Ni^{2+}	0,11	(на Sn)	0,86	(на Au)	0,3
Co^{2+}	0,5	In^{3+}	0,18	(на Pb)	0,92		
Fe^{2+}	0,11	Fe^{3+}	0,3	(на Cr)	0,5	(на In)	0,26
Cd^{2+}	0,03	Sn^{2+}	0,01	(на Fe)	0,5	(на Sb)	0,5
Cu^{2+}	0,06	Sb^{3+}	0,6	(на Ni)	0,63		
Au^{3+}	0,35			(на	0,48		

*Примечание: Часть данных, в частности, по перенапряжениям катодного восстановления некоторых ионов, анодного окисления металлов, ионизации кислорода на пассивных металлах получена пересчетом из поляризационных кривых или полярографических данных (Справочник по электрохимии /Под ред. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1981. – 488 с; с.210-246.)

Таблица упругости диссоциации оксидов

Оксид		P_O , равновесн., Па			P_O , равновесн., Па
Fe_2O_3	500	$1,013 \cdot 10^{-45}$		750	$1 \cdot 10^{-42}$
Ag_2O	600	$3,6 \cdot 10^7$	CoO	750	$1 \cdot 10^{-32}$
Cu_2O	500	$5,6 \cdot 10^{-26}$	Sb_2O_3	500	$1 \cdot 10^{-36}$
PbO	1600	$4,4 \cdot 10^{-2}$	PdO	500	$1 \cdot 10^{-10}$
NiO	2000	$9,3 \cdot 10^{-1}$	MoO_3	500	$1 \cdot 10^{-39}$
ZnO	1800	$6,8 \cdot 10^{-9}$	CdO	1000	$1 \cdot 10^{-19}$
Al_2O_3	1600	$1,5 \cdot 10^{-22}$	GeO_2	1000	$1 \cdot 10^{-18}$
V_2O_3	500	$1 \cdot 10^{-70}$	WO_3	750	$1 \cdot 10^{-37}$
TiO_2	1000	$1 \cdot 10^{-40}$	SnO_2	1000	$1 \cdot 10^{-21}$

ZrO ₂	1000	$1 \cdot 10^{-42}$	In ₂ O ₃	450	$1 \cdot 10^{-55}$
BeO	1000	$1 \cdot 10^{-44}$	Mn ₃ O ₄	1000	$1 \cdot 10^{-37}$
MgO	1000	$1 \cdot 10^{-50}$	Nb ₂ O ₅	750	$1 \cdot 10^{-43}$
Sc ₂ O ₃	500	$1 \cdot 10^{-110}$	Cr ₂ O ₃	750	$1 \cdot 10^{-44}$
Tl ₂ O ₃	400	$1 \cdot 10^{-20}$	Ta ₂ O ₅	500	$1 \cdot 10^{-70}$
Bi ₂ O ₃	500	$1 \cdot 10^{-35}$	RuO ₂	450	$1 \cdot 10^{-21}$
			CuO	750	$1 \cdot 10^{-20}$

Электродные потенциалы водородного и кислородного электродов в различных средах

pH < 7		pH = 7		pH > 7	
Электрохимическая система	$\varphi^0, \text{В}$	Электрохимическая система	$\varphi^0, \text{В}$	Электрохимическая система	$\varphi^0, \text{В}$
2H ⁺ /H ₂	0	H ₂ O/OH ⁻ , H ₂	-0,414	H ₂ O/OH ⁻ , H ₂	-0,8281
O ₂ /H ⁺ , H ₂ O	1,229	O ₂ , H ₂ O/OH ⁻	0,815	O ₂ , H ₂ O/OH ⁻	0,400

Стандартные электродные потенциалы и перенапряжения анодного окисления металлов при $i = 0,001 \text{ А/см}^2$; pH < 7, T = 298 К

Электрохимическая система	$\varphi^0, \text{В}$	η_{Me}	Электрохимическая система	$\varphi^0, \text{В}$	η_{Me}
Fe ²⁺ /Fe ⁰	-0,44	0,01		0,300	0,65
Ni ²⁺ /Ni ⁰	-0,25	0,51		0,987	0,48
Mn ²⁺ /Mn ⁰	-1,180	0,5		-0,343	0,18
Ag ⁺ /Ag ⁰	0,7991	0,18		0,2	0,1
Al ³⁺ /Al ⁰	-1,662	0,20		-0,45	0,3
Zn ²⁺ /Zn ⁰	-0,763	0,03		0,0	0,1
Pb ²⁺ /Pb ⁰	-0,126	0,4		-1,70	0,4
Cr ³⁺ /Cr ⁰	-0,744	0,41		1,0	0,2
Co ²⁺ /Co ⁰	-0,277	0,5		-0,200	0,3
Cd ²⁺ /Cd ⁰	-0,4029	0,03		-1,099	0,2
Cu ²⁺ /Cu ⁰	0,337	0,06		0,7	0,1
Sn ²⁺ /Sn ⁰	-0,136	0,01		0,80	0,54
Sb ³⁺ /Sb ⁰	0,24	0,6		-1,12	0,5
Tc ²⁺ /Tc ⁰	0,400	0,1		-2,372	0,9

Ti^{2+}/Ti^0	-1,626	0,4		-1,186	0,35
Ti^{3+}/Ti^0	0,71	0,1			

Перенапряжения выделения водорода и ионизации кислорода
на различных металлах при $i = 0,001 \text{ A/cm}^2$; pH<7; T=298 K)

	pH < 7		pH = 7		pH > 7	
	$\eta_{H_2}, \text{В}$	$\eta_{O_2}, \text{В}$	$\eta_{H_2}, \text{В}$	$\eta_{O_2}, \text{В}$	$\eta_{H_2}, \text{В}$	$\eta_{O_2}, \text{В}$
Fe	0,2	0,3	0,1	0,6	0,4	0,6
Ni	0,2	1,01	0,63	1,09	0,4	0,9
Mn	0,3	0,3	0,45	0,4	0,4	0,4
Ag	0,4	0,9	0,47	0,97	0,5	0,9
Al	0,4	2,0	0,80	2,5	0,6	1,6
Zn	0,3	1,5	0,72	1,75	0,5	1,4
Pb	0,5	1,2	0,52	1,445	0,5	1,1
Cr	0,4	1,1	0,5	1,205	0,6	1,2
Co	0,4	1,2	0,50	1,25	0,7	1,2
Cd	0,8	1,1	0,98	1,2	0,7	1,0
Cu	0,5	1,0	0,48	1,05	0,6	1,0
Sn	0,5	1,1	0,86	1,215	0,9	1,2
Sb	0,4	0,9	0,5	1,0	0,5	1,1
Re	0,6	0,9	0,6	1,02	0,5	0,9
Pd	0,4	0,8	0,3	0,8	0,6	0,8
In	0,2	0,8	0,26	0,9	0,3	0,9
Re	0,6	0,9	0,78	0,91	0,7	0,9
Ga	0,3	0,7	0,3	0,72	0,2	0,7
Ge	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,3
Hf	0,4	0,6	0,3	0,6	0,4	0,5
Ir	0,2	0,7	0,2	0,8	0,2	0,7
Mo	0,5	0,8	0,4	0,7	0,4	0,8
Nb	0,8	0,7	0,7	0,79	0,7	0,8
Os	0,2	0,8	0,2	0,81	0,1	0,8
Rh	0,2	0,82	0,2	0,90	0,2	0,81

Ta	0,1	1,2	0,3	1,50	0,1	1,4
Tc	0,3	0,9	0,4	0,92	0,3	0,9
Ti	0,4	0,69	0,5	0,70	0,4	0,78
V	0,4	0,6	0,6	0,61	0,5	0,65
Tl	0,5	0,55	0,6	0,59	0,7	0,60
Y	0,1	0,61	0,3	0,62	0,1	0,63

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Методическое пособие

Составитель: Хрисониди В.А.

Редактор	В.А. Хрисониди
----------	----------------

Компьютерная верстка	В.А. Хрисониди
----------------------	----------------

Подписано в печать	Формат 60x84/16
--------------------	-----------------

Бумага высшая №1	Изд. №1
------------------	---------

Печ.л.	Тираж 15 экз.
--------	---------------

Усл.печ.л.	Заказ №
------------	---------

Уч.-изд. л.	
-------------	--

Издательство: филиал ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет» в пос. Яблоновском, кафедра ИДиТД