

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 16:42:08

Уникальный программный ключ: «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ

по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Содержание

№ п/п		Стр.
	Введение	3
1.	Практическая работа №1 Способы упрочнения металлов и сплавов	4
2.	Практическая работа №2 Диаграммы состояния сплавов	14
3.	Практическая работа №3 Термическая обработка углеродистых сталей	19
4.	Практическая работа №4 Сплавы цветных металлов	34
5.	Практическая работа №5 Расчет опорно-стержневого изолятора наружной установки	55
6.	Практическая работа №6 Расчет свинцового высоковольтного кабеля	59
7.	Практическая работа №7 Расчет питающей линии Электрической установки	62

Введение

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение», использование специального лабораторного оборудования и технических средств. Практические занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Практические занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью практических занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

Практическая работа №1

Тема: Способы упрочнения металлов и сплавов

Цель: получить представление о способах упрочнения металлов и количественной зависимости предела текучести от параметров структуры.

Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:

Обучающийся должен:

знать:

– способы упрочнения металлов;

уметь:

– определять предел текучести от параметров структуры металлов.

Актуальность темы:

Заключается в необходимости получения представления о способах упрочнения металлов

Теоретическая часть:

Значительная пластическая деформация деталей машин и конструкций при эксплуатации недопустима. Поэтому повышение прочности металлов и сплавов означает, прежде всего, повышение предела текучести.

Область II на диаграмме растяжения является областью борьбы за прочность (рис. 1.1). Здесь происходит пластическая деформация, т. е. движение дислокаций

Чтобы затруднить перемещение дислокаций, нужно создать препятствия для их движения – или избавиться от дислокаций совсем.

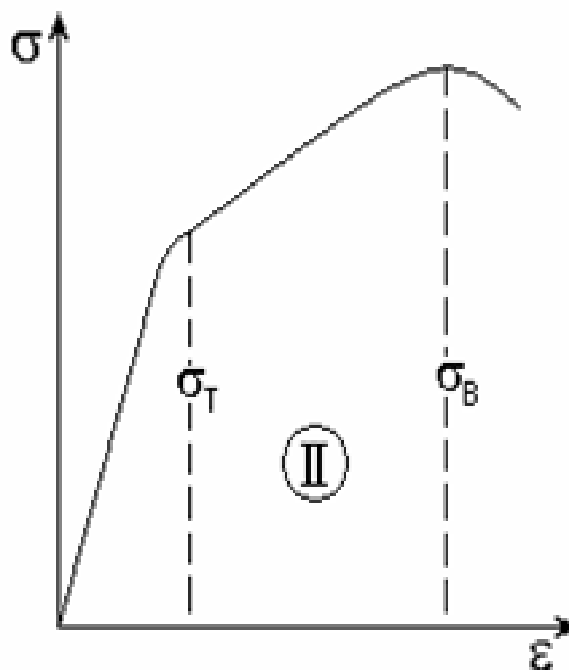


Рисунок 1.1 – Область пластической деформации

Упрочнение за счёт создания бездефектных кристаллов

Бездефектные кристаллы удастся вырастить в виде тонких нитей, или «усов» (их длина несколько миллиметров, толщина до 20 мкм). Их прочность действительно близка к теоретически рассчитанной.

Кристаллы крупных размеров вырастить без дефектов не удаётся.

Не совсем ясно, играет в прочности «усов» главную роль отсутствие дефектов или поверхностное натяжение. Изделия, содержащие такие кристаллы, высокой прочностью не обладают.

Можно сказать, что пока этот путь создания высокопрочных материалов не реализован.

Упрочнение за счёт торможения движущихся дислокаций

1) Упрочнение самими дислокациями

В ходе пластической деформации создается такая высокая плотность дислокаций, что они сами начинают взаимно тормозить скольжение друг друга. Возникает так называемый «лес дислокаций». При повторном испытании уже продеформированного образца предел текучести оказывается больше: $\sigma_{T2} > \sigma_{T1}$ (рис. 1.2).

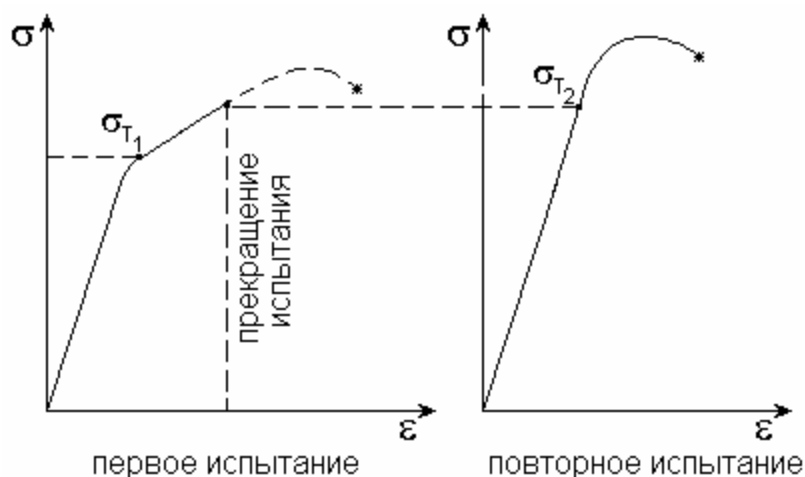


Рисунок 1.2 – Упрочнение металла при повторном испытании на растяжение

Увеличение предела текучести связано с плотностью дислокаций зависимостью

$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho},$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; α – коэффициент, зависящий от природы металла; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями), ρ – плотность дислокаций.

Примерами использования такого механизма упрочнения являются дробеструйный наклёп пружин, рессор и штампов, патентирование проволоки, чистовая обработка поверхностным пластическим деформированием (обкатка роликами, дорнование отверстий).

2) Упрочнение границами зёрен

В мелкозернистом металле площадь поверхности зёрен в единице объёма больше, чем в крупнозернистом (рис. 1.3). Мелкозернистый металл прочнее, так как на пути скольжения дислокаций встречается больше барьеров – границ зёрен: $\sigma_{T2} > \sigma_{T1}$.

Зависимость предела текучести от размера зерна описывается отношением Холла–Петча:

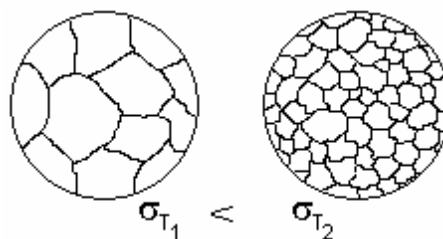


Рисунок 1.3 – Упрочнение границами зерен

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d^{1/2},$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; k – постоянная для данного металла, d – диаметр зерна.

Примеры: модифицирование сплавов при выплавке и литье, рекристаллизация сильно наклёпанного металла, измельчение зерна при фазовых превращениях.

3) Упрочнение растворёнными атомами примесей

Искажения решётки, вызванные атомами примесей, мешают дислокациям свободно скользить (рис. 1.4).

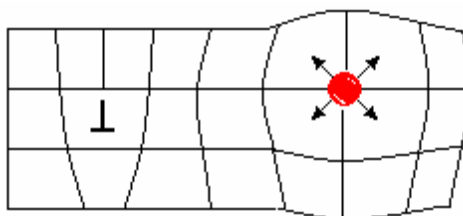


Рисунок 1.4 – Упрочнение твёрдым раствором

В первом приближении упрочнение при образовании твёрдого раствора можно определить по формуле Мотта-Набарро в зависимости от количества примеси:

$$\sigma_T = G \cdot \varepsilon^2 \cdot C,$$

где G – модуль сдвига, ε – параметр, зависящий от различия размеров атомов растворённого компонента r и растворителя r_0 , C – атомная концентрация растворённого компонента. Можно принять параметр $\varepsilon = (r - r_0)/r_0$.

Примерами применения такого механизма упрочнения являются практически все сплавы в современной технике. Все они являются твёрдыми растворами. При закалке сплавов создают пересыщенные твёрдые растворы, добиваясь значительного упрочнения.

4) Упрочнение дисперсными частицами второй фазы

Дисперсные, т. е. очень мелкие, частицы имеют размеры порядка 100 нм. Более крупные частицы не являются таким эффективным препятствием для дислокаций.

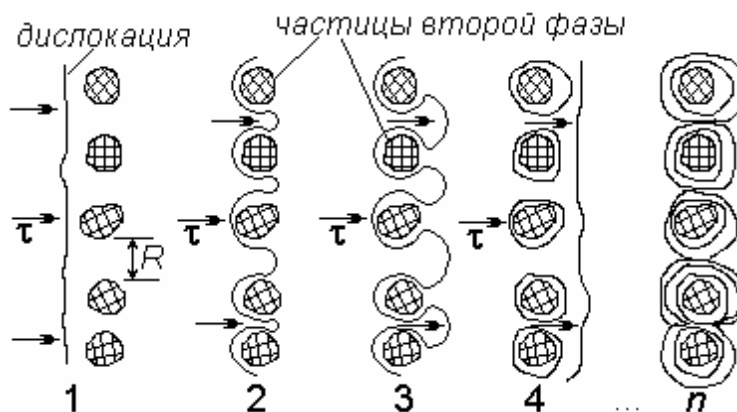


Рисунок 1.5 – Упрочнение дисперсными частицами второй фазы

Огибая мелкие частицы (рис. 1.5, 2), дислокации замыкаются вокруг них (3), при этом возникают дислокационные петли (4), или кольца. Прохождение множества дислокаций приводит к образованию так называемых колец Орована (n).

Дальнейшее скольжение дислокаций на этом участке затруднено.

Если частицы второй фазы не округлые, а игольчатые, то дислокации «наматываются» на них, как нитки на веретено.

Упрочнение дисперсными частицами зависит от расстояния между ними L :

$$\sigma_T = \sigma_0 + (G \cdot b) / L,$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

По такому механизму упрочняются очень многие сплавы: дуралюмины, бронзы, сплавы титана, некоторые стали.

В большинстве современных высокопрочных материалов используются несколько способов упрочнения одновременно: твёрдый раствор и мелкие частицы химического соединения, твёрдый раствор с высокой плотностью дислокаций и т. п.

По такому механизму упрочняются очень многие сплавы: дуралюмины, бронзы, сплавы титана, некоторые стали.

В большинстве современных высокопрочных материалов используются несколько способов упрочнения одновременно: твёрдый раствор и мелкие частицы химического соединения, твёрдый раствор с высокой плотностью дислокаций и т. п.

Вопросы и задания

1. Объясните следующие явления на основе представлений о дислокациях:

- а) холодная механическая обработка повышает твёрдость алюминия;
- б) сплав, состоящий из 20 % цинка и 80 % меди, твёрже чистой меди;
- в) твёрдость никеля возрастает при введении в него частиц окислителя.

2. Необходимо получить сплав:

а) с большим сопротивлением деформации, твёрдостью, прочностью, имеющий высокую долговечность и работоспособность при работе в условиях износа и значительных механических нагрузок;

б) с высокой пластичностью, низкими значениями твёрдости и сопротивления деформации, имеющий хорошую обрабатываемость резанием и давлением.

Опишите структуру сплава, которая обеспечит требуемые свойства в обоих случаях.

3. Определить предел текучести и величину упрочнения металла после холодной пластической деформации, в результате которой плотность дислокаций увеличилась до 10^{10} см^{-2} .

Металл	σ_0 , МПа	b , нм	α	G , ГПа
Алюминий	40	0,404	0,3	27
железо	130	0,286	0,2	77

Связь между пределом текучести и плотностью дислокаций описывается уравнением

$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho},$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; α – коэффициент, зависящий от природы металла; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

4. Сплав железа с 0,8 % углерода имеет структуру твёрдого раствора с дисперсными частицами карбида железа Fe_3C , очень твёрдыми и прочными. Определить предел текучести сплава, если расстояние между частицами Fe_3C составляет: а) 20 нм, б) 40 нм, в) 60 нм, г) 80 нм, д) 100 нм.

Считать, что дислокации проходят между частицами. Предел текучести зависит от расстояния между частицами следующим образом:

$$\sigma_T = \sigma_0 + (G \cdot b) / L,$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

Металл	σ_0 , МПа	b , нм	G , ГПа
железо	130	0,286	77

Построить график зависимости $\sigma_T = f(L)$ и проанализировать его.

5. Определить предел текучести железа с величиной зерна 100, 50, 30, 10 и 5 мкм, используя отношение Холла–Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d^{1/2},$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения (130 МПа для железа); k – постоянная для данного металла (129 МПа·мм^{1/2} для железа).

Построить график зависимости $\sigma_T = f(d)$ и проанализировать его.

6. Сплав алюминия с 4 % меди имеет структуру твёрдого раствора с дисперсными частицами интерметаллического соединения CuAl₂, имеющими повышенную прочность. Определить предел текучести сплава, если расстояние между частицами CuAl₂ составляет: а) 24 нм, б) 40 нм, в) 60 нм, г) 80 нм, д) 100 нм.

Считать, что дислокации проходят между частицами. Предел текучести зависит от расстояния между частицами следующим образом:

$$\sigma_T = \sigma_0 + (G \cdot b) / L,$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

Металл	σ_0	b	G
алюмин	40	0,40	27

Построить график зависимости $\sigma_T = f(L)$ и проанализировать его.

7. Определить напряжение сдвига τ , необходимое, чтобы выгнуть линию дислокации в полуокружность между мелкими твердыми частицами, расположенными на расстоянии L друг от друга.

8. Предел текучести крупнозернистой латуни 20 МПа. При величине зерна 4 мкм – 120 МПа. Чем объясняется такое увеличение и чему равен коэффициент β для латуни? ($\sigma_T = \beta \cdot d^{-1/2}$.)

9. Определить предел текучести и величину упрочнения металла после холодной пластической деформации, в результате которой плотность дислокаций увеличилась до 10^{10} см^{-2} .

Металл	σ_0 , МПа	b , нм	α	G , ГПа
титан	450	0,296	0,4	44
никель	150	0,352	0,3	73

Связь между пределом текучести и плотностью дислокаций описывается уравнением

$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho},$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; α – коэффициент, зависящий от природы металла; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

10. Два образца из одного и того же металла были пластически деформированы с уменьшением площади поперечного сечения. Один образец представляет собой цилиндр, а второй – прямоугольный параллелепипед; форма поперечного сечения в ходе деформации не изменилась.

Исходные и конечные размеры образцов следующие:

	Цилиндрический (диаметр, мм)	Призматический (мм)
Исходные размеры	15,2	125/175
Конечные размеры	11,4	75/200

Какой из образцов приобрёл наибольшую твёрдость после деформации? Объясните ответ.

11. Недеформированный металл имеет средний размер зерна 40 мкм. Можно ли добиться уменьшения величины зерна до 10 мкм?

Если да, то объясните, каким способом это можно сделать и какие процессы произойдут в структуре металла. Если нет – объясните, почему.

Список литературы:

Перечень основной литературы

1. Электроматериаловедение: учеб. Пособие / А.С. Красько, С.Н. Павлович, Е.Г. Понаморенко. – 2-изд., стер. – Минск : РИПО, 2015. – 212 с.

Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=463625

2. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения: учебное пособие / Е.Е. Привалов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 266 с. Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=436753

Перечень дополнительной литературы

1. Основы материаловедения: учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 152 с.

Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=364047

Практическая работа №2

Тема: Диаграммы состояния сплавов

Цель: Изучить основные разновидности диаграмм состояния двойных сплавов; научиться анализировать диаграммы состояния: определять температуры начала и окончания плавления сплавов, находить области равновесного существования твёрдых растворов, обосновывать возможность проведения упрочняющей термической обработки сплавов, оценивать их технологические свойства.

Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:

Обучающийся должен:

знать:

– основные разновидности диаграмм состояния двойных сплавов;

уметь:

– анализировать диаграммы состояния и оценивать их технологические свойства.

Актуальность темы:

Заключается в определении определять температуры начала и окончания плавления сплавов

Теоретическая часть:

Для практической работы с двойными сплавами необходимо знать их структуру, возможность её изменения с изменением температуры и состава сплава и, таким образом, судить о свойствах сплавов и о возможностях изменения свойств в нужном направлении. Необходимость изменить структуру и свойства сплавов может возникнуть, если при получении детали методом литья произошла внутрикристаллическая ликвация, если нужно упрочнить сплав термической обработкой, и в некоторых других случаях.

Для определения возможности проведения термической обработки и назначения её температурного режима нужно знать закономерности изменения фазового состава в зависимости от температуры и химического состава сплава в данной системе. Графическая зависимость, содержащая эту информацию, называется диаграммой состояния. Диаграммы состояния позволяют получать разностороннюю информацию о сплавах. С их помощью можно судить о литейных свойствах сплавов и, соответственно, о возможности получения из них отливок, о склонности сплавов к внутрикристаллической ликвации и ликвации по удельному весу при кристаллизации, о пластичности различных сплавов и возможности их пластического деформирования при изготовлении изделий.

Чаще всего для построения диаграмм состояния металлических систем используют термический анализ, основанный на том, что плавление, кристаллизация и все структурные изменения сплавов в твёрдом состоянии происходят с тепловыми эффектами (с поглощением или выделением тепла). Следовательно, снимая кривые нагрева или охлаждения сплавов разного состава какой-либо системы, можно зафиксировать температуры, при которых происходят те или иные изменения в структуре. Если затем эту информацию представить графически в координатах «температура - состав сплава», то получится диаграмма состояния системы. На диаграмме состояния будут, по крайней мере, две линии: начала кристаллизации (ликвидус) и окончания кристаллизации (солидус). У многих сплавов, кроме того, происходят различные превращения в твёрдом состоянии, что тоже отражается линиями на диаграмме.

В зависимости от характера взаимодействия компонентов в сплаве, соответствия или различия в их атомно-кристаллическом строении возможно образование различных фаз: твёрдых растворов, механической смеси кристаллов отдельных компонентов, химических соединений и др. Это взаимодействие описывается различными видами диаграмм состояния с

разными возможностями изменения структуры и проведения термической обработки сплавов.

Вопросы и задания

1. Зарисовать, соблюдая масштаб, приведенную ниже диаграмму состояния медь-серебро и выполнить следующие задания:

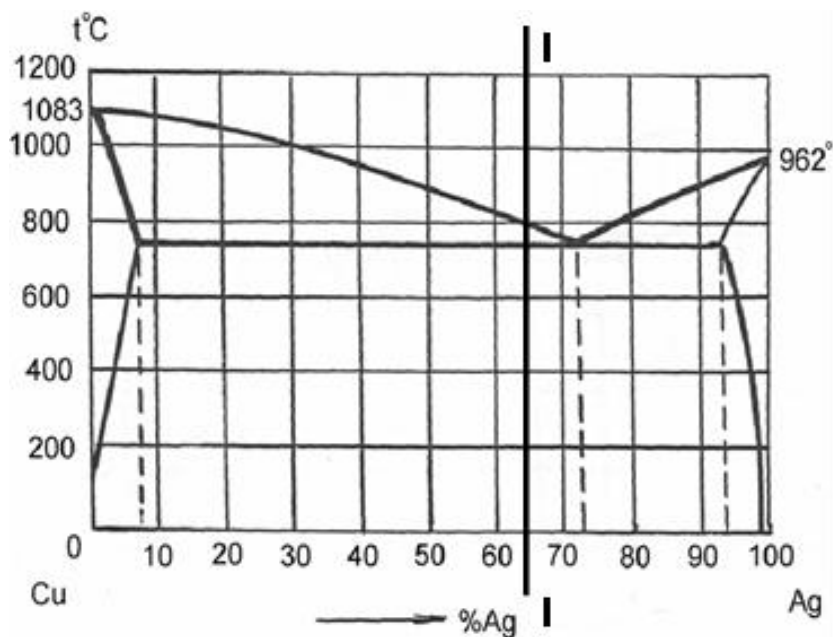


Рисунок 2.1 – Диаграмма медь-серебро

- 1) Установить тип диаграммы состояния.
- 2) Каков физический смысл температур 1083 и 962 °C?
- 3) Укажите линии ликвидус и солидус и объясните их физический смысл.
- 4) Заполнить все области на диаграмме состояния буквенными обозначениями. Дать определения сплавам, соответствующим этим обозначениям.
- 5) Указать химический состав сплава, обладающего минимальной температурой плавления. Какова эта температура? Как называется такой сплав?
- 6) Определить химический состав сплава по заданной на диаграмме линии I-I и охарактеризовать его структуру при комнатной температуре.

7) Определить, используя правило рычага (отрезков), для сплава, содержащего 30 % Ag, концентрацию Ag в жидкой фазе при 900 °С и отношение масс жидкой и твёрдой фаз.

8) Дать заключение о возможностях использования диаграмм состояния для практической работы со сплавами.

2. Зарисовать, соблюдая масштаб, приведенную ниже диаграмму состояния магний-германий и выполнить следующие задания:

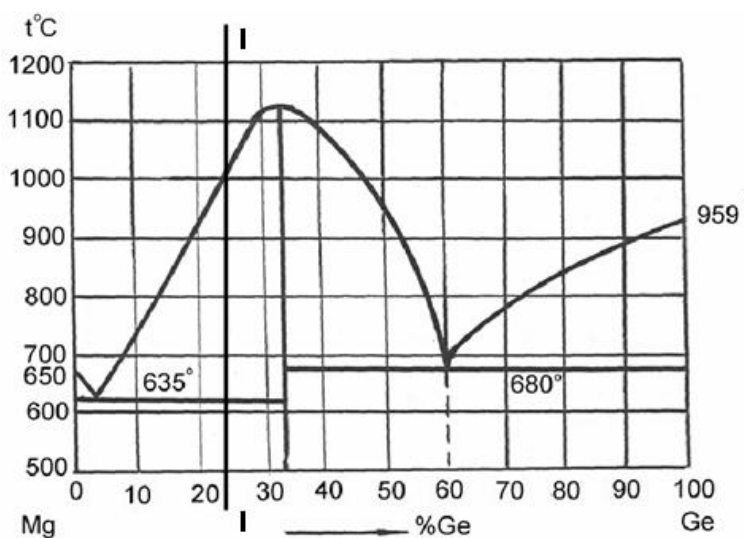


Рисунок 2.2 – Диаграмма магний германий

- 1) Установить тип диаграммы состояния.
- 2) Каков физический смысл температур 650, 1110 и 959 °С?
- 3) Укажите линии ликвидус и солидус и объясните их физический смысл.
- 4) Заполнить все области на диаграмме состояния буквенными обозначениями. Дать определения сплавам, соответствующим этим обозначениям.
- 5) Указать химический состав сплава, обладающего минимальной температурой плавления. Какова эта температура? Как называется такой сплав?

6) Определить химический состав сплава по заданной на диаграмме линии I-I и охарактеризовать его структуру при комнатной температуре.

7) Определить, используя правило рычага (отрезков), для сплава, содержащего 80 % Ge, концентрацию Ge в жидкой фазе при 800 °С и отношение масс жидкой и твёрдой фаз.

8) Дать заключение о возможностях использования диаграмм состояния для практической работы со сплавами.

Список литературы:

Перечень основной литературы:

1. Электроматериаловедение: учеб. Пособие / А.С. Красько, С.Н. Павлович, Е.Г. Понаморенко. – 2-изд., стер. – Минск : РИПО, 2015. – 212 с.

Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=463625

2. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения: учебное пособие / Е.Е. Привалов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 266 с. Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=436753

Перечень дополнительной литературы:

1. Основы материаловедения: учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 152 с.

Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=364047

Практическая работа №3

Тема: Термическая обработка углеродистых сталей

Цель: Получить представление об операциях термической обработки, применяемых для упрочнения и разупрочнения углеродистых сталей. Изучить взаимосвязь между содержанием углерода в стали, структурой и механическими свойствами стали после термической обработки; научиться выбирать режим термической обработки стали для получения необходимых в эксплуатации свойств.

Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:

Обучающийся должен:

знать:

- основные операции термической обработки;
- взаимосвязь между содержанием углерода в стали;

уметь:

- выбирать режимы термической обработки.

Актуальность темы:

Заключается в изучении термической обработки применяемых для упрочнения и разупрочнения углеродистых сталей

Теоретическая часть:

Термическая обработка – совокупность операций нагрева и охлаждения с целью изменить структуру и свойства сплава в нужном направлении.

Любую операцию термической обработки можно представить графически в виде кривой в координатах «температура – время», включающей участки нагрева, выдержки и охлаждения. Главные параметры, определяющие результат термической обработки, – температура нагрева t_n , время выдержки τ_v и скорость охлаждения $v_{охл.}$ (рис. 3.1).

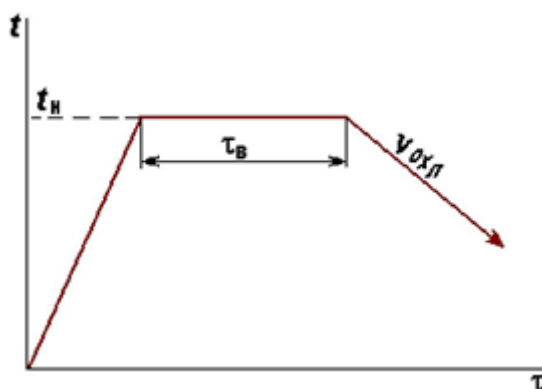


Рисунок 3.1 – Графическое изображение режима термической обработки

Различают упрочняющую термическую обработку, при которой повышаются твёрдость, прочность и износостойкость, и разупрочняющую обработку, повышающую пластические свойства и вязкость, но снижающую твёрдость и сопротивление деформации и разрушению.

Для стальных изделий широко применяются оба варианта термической обработки.

Термическая обработка стали основана на фазовых превращениях, происходящих при её нагреве выше критических температур и охлаждении с различными скоростями. Благодаря разной растворимости углерода в железе с ОЦК и ГЦК решёткой, существует возможность значительного упрочнения стали в результате закалки. Получаемый при закалке пересыщенный твёрдый раствор углерода в α -железе можно подвергнуть отпуску для получения более равновесных структур. При этом в зависимости от режима отпуска можно получить широкий спектр механических характеристик стали, что обуславливает её применение для деталей и конструкций, работающих в разных условиях нагружения.

Превращения при нагреве стали

Температуры превращений, или критические точки, при нагреве стали принято обозначать (рис. 3.2):

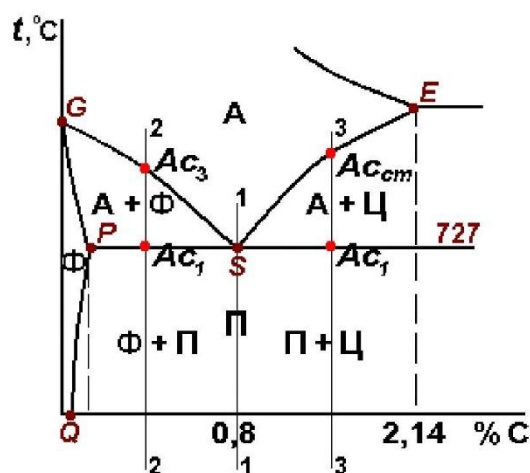


Рисунок 3.2 – Критические точки при нагреве стали

Основные виды термообработки стали – отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжиг

Отжиг является разупрочняющей термической обработкой.

Отжигом I рода называют, нагрев стали с неравновесной в результате предшествующей обработки структурой до (или ниже) температуры фазового превращения.

Обычно причиной появления неравновесной структуры является холодная обработка давлением или ускоренное охлаждение после горячей обработки. Температурный режим отжига I рода не связан с фазовыми превращениями в стали.

Цель: Перевести сталь в более устойчивое, равновесное состояние. Пример: рекристаллизационный отжиг для снятия наклёпа; смягчающий отжиг для улучшения обрабатываемости резанием (его ещё называют низким).

Отжигом II рода называют нагрев стали выше температуры фазового превращения с последующим медленным охлаждением (вместе с печью).

Цель: Получить устойчивое, равновесное состояние (как на диаграмме).

Разновидности:

Полный отжиг доэвтектоидных (конструкционных) сталей выполняется

с целью полной фазовой перекристаллизации.

Для этого сталь нагревают на 30-50° выше критической точки A_{c3} (т. е. линии GS) и после небольшой выдержки медленно охлаждают.

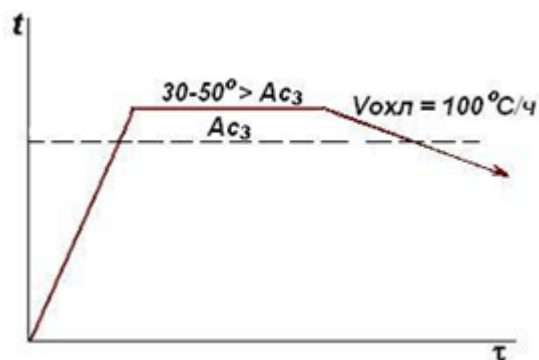


Рисунок 3.3 – Режим полного отжига

Практически детали охлаждаются вместе с печью со скоростью 30–100 С/ч (рис. 3.3). При нагревании феррит и перлит доэвтектоидной стали превращаются в аустенит. Затем, при медленном охлаждении, распад аустенита происходит в верхней части С-образной диаграммы с образованием новых зёрен феррита и перлита. Таким образом, если структура была дефектная (крупные зёрна, зёрна искажённой формы и т. п.), то при полном отжиге она исправляется, получается однородной и мелкозернистой.

Сталь после отжига имеет хорошие пластические свойства и низкую твёрдость. Это обеспечивает хорошую обрабатываемость стали резанием и давлением.

Нормализация является разновидностью отжига II рода с ускоренным охлаждением.

Нормализация заключается в нагреве стали до температур на 50– 70 С выше линии GSE и в охлаждении на воздухе после небольшой выдержки. В этом случае распад аустенита происходит в верхней части С-образной диаграммы, но при несколько меньших температурах, чем при отжиге. Это связано с более быстрым охлаждением.

Поэтому при нормализации получается более мелкая перлитная структура, чем при полном отжиге. Может даже образоваться сорбит – более мелкая, чем перлит, феррито-цементитная смесь.

Для доэвтектоидных сталей нормализация часто заменяет полный отжиг как более производительная и экономичная операция.

После нормализации сталь твёрже и прочнее, чем после полного отжига. Микроструктура тоже отличается от равновесной: феррит образует сетку вокруг участков перлита. (Кажется, что в стали больше углерода, чем есть на самом деле.)

Закалка

Закалка – это упрочняющая термическая обработка, которая таким образом изменяет структуру стали, чтобы максимально повысить твёрдость и прочность.

Закалка заключается в нагреве стали выше температуры фазового превращения с последующим достаточно быстрым охлаждением (со скоростью больше критической).

Цель: получение неравновесной структуры – пересыщенного твёрдого раствора углерода в -железе – мартенсита. Практическая цель – получение максимальной твёрдости, возможной для данной марки стали.

Быстрое охлаждение при закалке необходимо, чтобы углерод не успел выделиться из твёрдого раствора – аустенита – и остался в решётке железа после охлаждения (рис. 3.4).

Чтобы закалить сталь, необходимо правильно выбрать температуру нагрева и скорость охлаждения. Эти два параметра являются определяющими при проведении закалки.

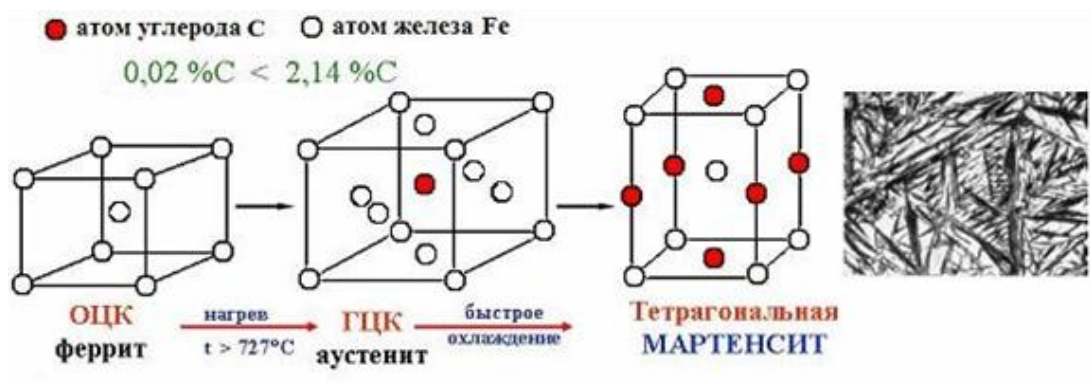


Рисунок 3.6 – Схема образования структуры, закаленной стали – мартенсита

Чтобы закалить сталь, необходимо правильно выбрать температуру нагрева и скорость охлаждения. Эти два параметра являются определяющими при проведении закалки.

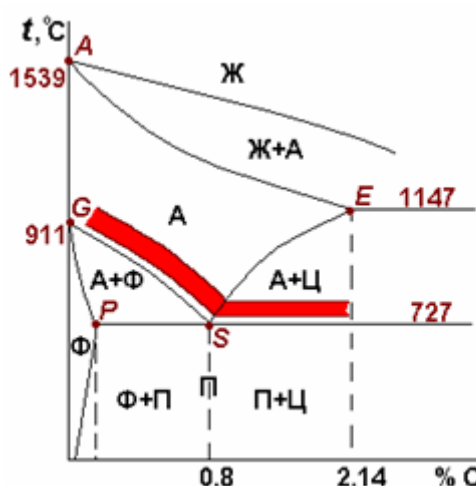


Рисунок 3.7 – Температурный интервал нагрева стали под закалку

При выборе температуры нагрева действует следующее правило: доэвтектоидные стали нагреваются под закалку на 30–50 С выше критической точки A_{c3} , а заэвтектоидные – на 30–50 С выше точки A_{c1} (рис. 3.7).

Небольшое превышение критической точки необходимо, так как в печах для термообработки неизбежны некоторые колебания температуры относительно заданного значения.

Почему закалочная температура выбирается для доэвтектоидных и

заэвтектоидных сталей по-разному?

В структуре доэвтектоидных сталей ниже линии GS присутствует феррит. Если закалить сталь из этой температурной области, то аустенит превратится в твёрдый и прочный мартенсит, а феррит не изменится, так как он является равновесной фазой. Поскольку феррит очень мягкий, то его присутствие в закалённой стали снижает ее твёрдость. Цель закалки не будет достигнута. Поэтому необходим нагрев до более высоких температур (выше линии GS), где феррит уже отсутствует.

Закалка из однофазной (аустенитной) области, с температур выше A_{c3} , называется полной. Так закалывают доэвтектоидные (конструкционные) стали.

Для заэвтектоидных сталей такой высокий нагрев не требуется, так как выше точки A_1 , но ниже линии SE структура состоит из аустенита и цементита. При закалке из этой области аустенит превратится в мартенсит, а цементит сохранится, так как он является равновесной фазой. Наличие в закалённой стали такой твёрдой структурной составляющей полезно, потому что мелкие частицы цементита являются дополнительными препятствиями для движения дислокаций, повышают твёрдость и износостойкость.

Закалка из двухфазной области, где присутствуют аустенит и цементит, или аустенит и феррит, называется неполной. Такой закалке подвергают заэвтектоидные (инструментальные) стали.

Закалённая сталь очень твёрдая, но она хрупкая, у неё низкая пластичность и большие внутренние напряжения. В таком состоянии изделие не работоспособно, не надёжно в эксплуатации. Поэтому для уменьшения внутренних напряжений и повышения пластичности после закалки всегда следует ещё одна операция термической обработки, которая называется отпуск.

Отпуск – это нагрев закалённой стали до температур ниже критических с последующим охлаждением, обычно на воздухе.

Цель отпуска – создание требуемого комплекса эксплуатационных

свойств стали, получение более устойчивой, чем после закалки, структуры, уменьшение внутренних напряжений.

Отпуск – последняя операция в технологической цепочке термообработки стали, поэтому полученная при отпуске структура должна обеспечивать свойства, необходимые при работе детали.

В процессе отпуска происходит распад мартенсита за счет выделения из него углерода, тем более полный, чем больше температура и время выдержки. Поэтому уменьшаются внутренние напряжения и плотность дислокаций. Остаточный аустенит при отпуске превращается в мартенсит.

При *низкотемпературном* (или *низком*) *отпуске* (150–200 °С) из мартенсита выделяется часть избыточного углерода с образованием мельчайших карбидных частиц. Но поскольку скорость диффузии здесь еще мала, некоторая часть углерода в мартенсите остается.

Такая структура представляет собой малоуглеродистый мартенсит и очень мелкие карбидные частицы. Ее называют *отпущенный мартенсит*.

В результате низкого отпуска уменьшаются внутренние напряжения, немного увеличивается вязкость и пластичность, твёрдость почти не снижается. Детали могут работать в условиях, где необходима высокая твёрдость и износостойкость.

Низкий отпуск применяют для режущего и мерительного инструмента, деталей подшипников качения.

Среднетемпературный (или средний) отпуск проводится при более высоких температурах – 300–450 °С. При этом из мартенсита уже выделяется весь избыточный углерод с образованием цементитных частиц. Тетрагональные искажения кристаллической решетки железа снимаются, она становится кубической. Мартенсит превращается в феррито-цементитную смесь с очень мелкими, в виде иголок, частицами цементита, которая называется трооститом отпуска.

Средний отпуск ещё уменьшает внутренние напряжения, увеличивает вязкость, при этом прочность остается высокой, а предел текучести и предел

выносливости достигают максимума. Такому отпуску подвергают рессоры, пружины и другие упругие элементы, а также штамповый инструмент.

В интервале 500–650 °С скорость диффузионных процессов уже настолько возрастает, что при распаде мартенсита образуется феррито-цементитная смесь с более крупными, сферической формы, зёрнами цементита. Такой отпуск называется высокотемпературным (или высоким); получаемая структура – сорбит отпуска.

В результате высокого отпуска сильно возрастают вязкость и пластичность стали, внутренние напряжения снимаются почти полностью, твёрдость и прочность снижаются, но все же остаются достаточно высокими.

Закалка с высоким отпуском называется термическим улучшением стали. Такой обработке подвергают детали машин, работающие в условиях знакопеременных и ударных нагрузок: валы, рычаги, шестерни и др.

Для некоторых деталей при эксплуатации необходима высокая твёрдость и износостойкость поверхности в сочетании с хорошей вязкостью в сердцевине. Это касается деталей, работающих в условиях износа с одновременным действием динамических нагрузок (например, шестерни, пальцы, скрепляющие звенья трака гусеничных машин).

В таких случаях подвергают упрочнению не всю деталь, а только тонкий (несколько мм) поверхностный слой.

Поверхностная закалка – это нагрев до закалочных температур только поверхностного слоя детали с последующим быстрым охлаждением и образованием мартенситной структуры только в этом слое.

Осуществляют такую закалку быстрым нагревом поверхности, при котором сердцевина не успевает прогреваться за счет теплопроводности. При таком нагреве температура по сечению детали резко падает от поверхности к центру.

После охлаждения в сечении детали получаются три характерных зоны с разной структурой и свойствами (см. рис. 3.8).

В зоне I после закалки получается мартенситная структура с

максимальной твёрдостью, так как эта зона нагревалась выше критической температуры A_{c3} .

В зоне II после заковки в структуре, кроме мартенсита, будет присутствовать и феррит. Следовательно, твёрдость там будет ниже.

В зоне III нагрев и охлаждение не приводят к каким-либо изменениям структуры. Значит, здесь сохраняется исходная феррито- перлитная структура с низкой твёрдостью, но высокими пластическими свойствами.

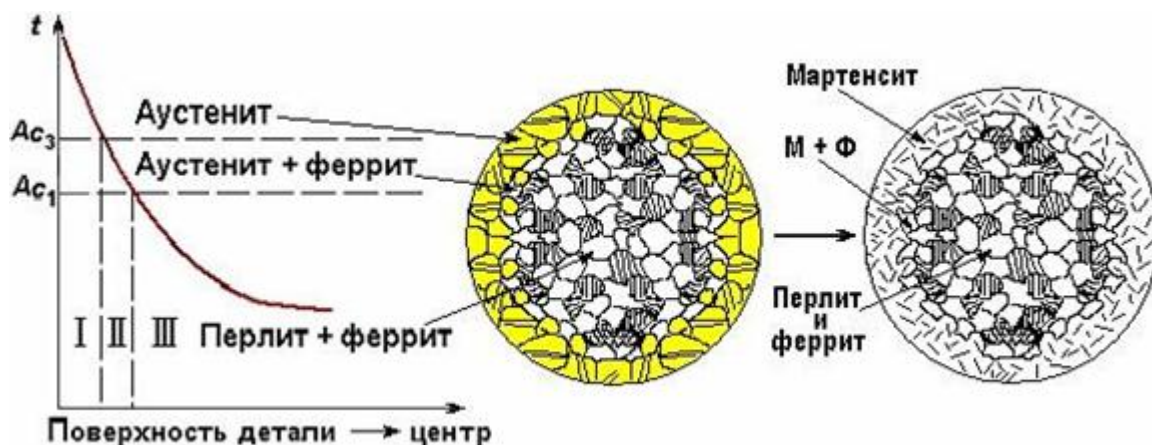


Рисунок 3.8 – Поверхностная заковка стали

а – распределение температур по сечению; б – структура при
поверхностном нагреве; в – структура после заковки

После поверхностной заковки деталь может сопротивляться динамическим нагрузкам за счет вязкой сердцевины и хорошо работать в условиях износа благодаря твёрдой поверхности.

Быстрый нагрев поверхности, необходимый при такой технологии, осуществляется чаще всего индукционным способом (заковка ТВЧ). Деталь помещается в индуктор, подключённый к генератору тока высокой частоты. Переменное магнитное поле высокой частоты наводит в тонком поверхностном слое металла вихревые токи, и нагрев осуществляется за счет сопротивления металла протеканию этих токов. Немедленно после нагрева, который длится секунды, деталь помещают в спрейер для охлаждения.

Поверхностная заковка должна сопровождаться низким отпуском.

Чем выше частота внешнего переменного магнитного поля, тем тоньше

слой, в котором сосредоточены вихревые токи. Поэтому глубина закалённого слоя может легко регулироваться и составляет от десятых долей миллиметра до 3–5 мм. Операцию закалки ТВЧ можно полностью автоматизировать. Способ очень производительный; коробление и окисление поверхности детали при этом минимально.

Иногда для поверхностной закалки используют и другие способы нагрева: газопламенный, лазерный, в расплавах солей, в электролитах.

Для такого способа термообработки специально созданы стали пониженной прокаливаемости, например, 55ПП (0,55 % С и не более 0,5 % примесей).

Вопросы и задания

1. Используя диаграмму состояния железо – цементит, определите температуру полной и неполной закалки для стали 40.
2. Дайте описание структуры и свойств стали после каждого вида термической обработки.
3. Что такое отжиг? Используя диаграмму состояния железо – цементит, назначьте температуру отжига для сталей 35 и У10.
4. Опишите превращения, происходящие в сталях при выбранном режиме обработки, получаемую структуру и свойства.
5. Режущий инструмент из стали У12 был перегрет при закалке. Чем вреден перегрев, и как можно исправить этот дефект?
6. Назначьте режим термической обработки для исправления структуры, обеспечивающий нормальную работу инструмента.
7. Опишите структуру и свойства стали после правильной термообработки.
8. Используя диаграмму состояния железо – цементит и график зависимости твёрдости от температуры отпуска, назначьте режим термической обработки (температуру закалки, охлаждающую среду и

температуру опуска) втулок из стали 45, которые должны иметь твёрдость HRC 28–30.

9. Опишите превращения, происходящие на всех этапах термической обработки, и получаемую структуру.

10. С помощью диаграммы состояния железо – цементит определите температуру нормализации, отжига и закалки для стали 30.

11. Охарактеризуйте эти режимы термической обработки и опишите структуру и свойства стали после каждого вида обработки.

12. После закалки углеродистой стали была получена структура, состоящая из феррита и мартенсита.

13. Проведите на диаграмме состояния железо – цементит примерную ординату, соответствующую составу заданной, стали, укажите принятую в данном случае температуру нагрева под закалку.

14. Как называется такая обработка? Какие превращения произошли при нагреве и охлаждении стали?

15. Сталь 40 закалили от температур 760 и 840 °С. Укажите на диаграмме состояния железо – цементит выбранные температуры нагрева и опишите превращения, которые произошли при двух режимах закалки.

16. Какому режиму следует отдать предпочтение и почему?

17. Углеродистые стали 45 и У8 после закалки и отпуска имеют структуру мартенсит отпуска. Твёрдость первой – HRC 50, второй – HRC 60.

18. Используя диаграмму состояния железо – карбид железа и учитывая превращения, происходящие в этих сталях при отпуске, укажите температуру закалки и температуру отпуска для каждой стали.

19. Опишите превращения, происходящие в этих сталях в процессе закалки и отпуска, и объясните, почему сталь У8 имеет большую твёрдость, чем сталь 45.

20. Изделия из стали 50 требуется подвергнуть улучшению.

21. Назначьте режим термической обработки, опишите сущность происходящих превращений, структуру и свойства стали после обработки.

22. Что такое нормализация?
23. Используя диаграмму состояния железо – цементит, назначьте температуру нормализации любой доэвтектоидной стали.
24. Опишите превращения, происходящие в стали при выбранном режиме обработки, получаемую структуру и свойства.
25. На изделиях из стали 20 требуется получить поверхностный слой высокой твёрдости. Выберите способ химико-термической обработки и обоснуйте выбор.
26. Какая структура будет на поверхности стали и в сердцевине после окончательной термообработки?
27. Требуется произвести поверхностное упрочнение изделий из стали 15.
28. Назначьте вид обработки, опишите технологию, происходящие в стали превращения, структуру и свойства поверхности и сердцевины изделия.
29. Валики из стали 40 закалены: один – от температуры 760 °С, а другой – от температуры 840 °С.
30. Нанесите выбранные температуры нагрева на диаграмму состояния железо – цементит и объясните, какой из этих валиков имеет более высокую твёрдость и лучшие эксплуатационные свойства и почему.
31. В структуре углеродистой стали 30 после закалки остаточный аустенит не обнаруживается, а в структуре стали У12 наблюдается до 3 % остаточного аустенита. Объясните причину этого явления. Какой обработкой можно устранить остаточный аустенит?
32. Как можно устранить крупнозернистую структуру в ковanej стали 30?
33. Используя диаграмму состояния железо – цементит, обоснуйте выбор режима термической обработки для исправления структуры. Опишите структурные превращения и изменение свойств стали.

34. Шестерни из стали 45 закалены: первая – от температуры 750 С. а вторая – от 850 °С.

35. Нанесите выбранные температуры нагрева на диаграмму состояния железо – цементит, и объясните, какая из этих шестерен имеет более высокую твёрдость и лучшие эксплуатационные свойства и почему.

36. В чем преимущества и недостатки поверхностного упрочнения стальных изделий при нагреве токами высокой частоты по сравнению с упрочнением методом цементации? Назовите марки стали, применяемые для этих видов обработки.

37. Для каких сталей применяется отжиг на зернистый перлит? Объясните выбор режима и цель этого вида обработки.

38. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8. Нанесите на нее кривую режима изотермической обработки, обеспечивающей получение твёрдости HB 150. Укажите, как этот режим называется, и какая структура получается в данном случае.

39. После термической обработки углеродистой стали получена структура цементит и мартенсит отпуска. Нанесите на диаграмму состояния железо – цементит примерную ординату заданной стали и обоснуйте выбор температуры нагрева этой стали под закалку. Укажите температуру отпуска и опишите превращения, которые произошли при термической обработке.

40. При непрерывном охлаждении стали У8 получена структура троостит. Нанесите на диаграмму изотермического превращения аустенита кривую охлаждения, обеспечивающую получение данной структуры. Укажите температурный интервал превращения и опишите его характер.

41. Используя диаграмму состояния железо – цементит, установите температуры нормализации, отжига и закалки для стали 50. Охарактеризуйте эти режимы термической обработки и опишите структуру и свойства стали после каждого вида обработки.

42. Углеродистые стали 35 и У8 после закалки и отпуска имеют структуру мартенсит отпуска и твердость: первая HRC 45, вторая HRC 60.

43. Используя диаграмму состояния железо – карбид железа и учитывая превращения, происходящие при отпуске, укажите температуру закалки и отпуска для каждой стали, объясните, почему сталь У8 имеет большую твёрдость, чем сталь 35.

44. С помощью диаграммы состояния железо – цементит установите температуру полного и неполного отжига и нормализации для стали 20. Охарактеризуйте эти режимы термической обработки и опишите структуру и свойства стали в каждом случае.

Список литературы:

Перечень основной литературы:

1. Электроматериаловедение: учеб. Пособие / А.С. Красько, С.Н. Павлович, Е.Г. Понаморенко. – 2-изд., стер. – Минск : РИПО, 2015. – 212 с.
Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=463625

2. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения: учебное пособие / Е.Е. Привалов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 266 с. Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=436753

Перечень основной литературы:

1. Основы материаловедения: учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 152 с.
Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=364047

Практическая работа №4

Тема: Сплавы цветных металлов

Цель: Получить представление о сплавах на основе алюминия, меди, титана и других цветных металлов. Ознакомиться с возможностями термической обработки цветных сплавов. Усвоить маркировку сплавов на основе алюминия и меди. Освоить основы выбора сплавов с необходимыми свойствами для конкретных условий эксплуатации.

Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:

Обучающийся должен:

знать:

– сплавы на основе меди, алюминия, титана и других цветных металлов;

уметь:

– выбирать сплавы с необходимыми свойствами для конкретных условий эксплуатации.

Актуальность темы:

Заключается в получении представления о сплавах на основе алюминия, меди, титана и других цветных металлов, а также ознакомлении с возможностями термической обработки цветных сплавов.

Теоретическая часть:

Сталь – почти идеальный металлический материал, но она имеет существенный недостаток: детали и конструкции, сделанные даже из высокопрочной, стали, тяжелы. Во многих отраслях техники, особенно в самолётостроении, необходимы такие же прочные, но более лёгкие материалы. Лёгкими принято считать все металлы и сплавы, плотность которых составляет меньше половины плотности железа, т. е. не превышает

3,5 г/см³. К ним относятся алюминий Al ($\gamma = 2,7$ г/см³), магний Mg ($\gamma = 1,74$ г/см³), бериллий Be ($\gamma = 1,82$ г/см³). Наибольшее применение из этих металлов в качестве конструкционного материала имеет алюминий.

Алюминий и его сплавы

Алюминий – серебристо-белый металл с матовым оттенком. Кристаллическая решётка алюминия – гранецентрированный куб с периодом, $a = 0,4041$ нм. Полиморфных превращений алюминий не имеет. Температура плавления – 660 °С. Чистый отожжённый алюминий непрочен: $\sigma_B = 50\text{--}60$ МПа, $\sigma_{0,2} = 15\text{--}20$ МПа, твёрдость 20–25 *НВ*, зато пластичность у него высокая: удлинение при разрыве составляет 30– 50 %, относительное сужение – 80–95 %.

Чистый алюминий применяют в электротехнике для изготовления проводников тока, его электропроводимость 37,6 м/Ом·мм². Он уступает только серебру с проводимостью 63,0 м/Ом·мм² и меди – 60,1 м/Ом·мм². Все примеси, присутствующие в алюминии (постоянными являются Fe и Si), ухудшают его тепло- и электропроводимость. Алюминий устойчив к коррозии на воздухе, а также в среде многих газов и жидкостей благодаря защитному действию плотной пленки оксида Al₂O₃. Чем чище металл, тем выше его коррозионная стойкость.

Алюминий допускает глубокую вытяжку, хорошо сваривается газовой и контактной сваркой, плохо обрабатывается резанием, имеет низкие литейные качества.

Из алюминия высокой чистоты получают фольгу для электрических конденсаторов. Токоведущие детали изготавливают из алюминия технической чистоты.

Основная масса алюминия расходуется на производство алюминиевых сплавов. Предел прочности алюминиевых сплавов достигает 500–700 МПа при плотности не более 2,85 г/см³. По удельной прочности некоторые алюминиевые сплавы соответствуют высокопрочным сталям: $\sigma_B/(\rho \cdot g) = 23$.

В зависимости от способа изготовления деталей и изделий сплавы

алюминия делятся на деформируемые и литейные.

Деформируемые сплавы легко поддаются обработке давлением и предназначены для прокатки,ковки, прессования. Литейные сплавы отличаются жидкотекучестью, хорошо заполняют форму, малочувствительны к литейным трещинам; их используют для изготовления фасонных отливок при помощи литья в землю или в металлические формы.

Деформируемые сплавы, в зависимости от химического состава, делятся на сплавы с естественной твёрдостью, т. е. не поддающиеся упрочнению термической обработкой, и термически упрочняемые сплавы. Сплавы, *не упрочняемые термической обработкой*, содержат мало легирующих элементов и применяются вместо чистого алюминия в тех случаях, когда его прочность недостаточна. Они легированы магнием в количестве 0,5–5 %, а также марганцем (до 1,2 %). Их прочность можно повысить путём холодной обработки давлением (явление наклёпа). Например, деформируемый алюминиевый сплав АМг3 ($\approx 3\%$ Mg) в отожжённом состоянии имеет прочность на разрыв 180 МПа и удлинение 15 %, при небольшом наклёпе – 230 МПа и 8 %, после сильного наклёпа – 260 МПа и 3 %. Как видно из этих данных, в результате холодной деформации прочность сплава возрастает, а пластичность снижается.

Эти сплавы предназначены для работы в коррозионных средах, так как и марганец, и магний увеличивают коррозионную стойкость алюминиевых сплавов.

Применяют сплавы, не упрочняемые термической обработкой, для изготовления оконных рам вагонов, кузовов автомобилей, трубопроводов для бензина и масла, сварных баков и т. д.

Большая часть деформируемых алюминиевых сплавов – это сплавы, упрочняемые термической обработкой, значительно повышающей прочностные свойства. Прочность возрастает в результате дисперсионного твердения, или старения, после закалки. Это многокомпонентные сплавы, в которые входят различные элементы для повышения прочности (Cu, Mg, Zn),

жаропрочности (Fe), антикоррозионных свойств (Mn, Mg).

Химический состав некоторых алюминиевых сплавов, упрочняемых термической обработкой, приводится в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Химический состав термически упрочняемых алюминиевых сплавов (ГОСТ 4784-97)

Сплавы	Марка	Химический состав, %							
		Cu	Mg	Si	Zn	Fe	Mn	Ni	Cr
Дуралюмины	Д1	3,8–4,8	0,4–0,8	□0,7	□0,3	□0,7	0,4–0,8	□0,1	–
	Д16	3,8–4,9	1,2–1,8	<0,5	<0,3	<0,5	0,3–0,9	0,1	–
	Д18	2,2–3	0,2–0,5	0,8	0,25	0,7	0,2	–	0,1
Авиаль	АВ	0,2–0,6	0,45–0,9	0,5–1,2	<0,2	<0,5	0,15–0,3	–	–
Ковочные	АК6 (АК8)	1,8–2,6	0,4–0,8	0,7–1,2	<0,3	<0,7	0,4–0,8	<0,1	–
Жаропрочные	АК2 (АК4)	3,5–4,5	0,4–0,8	0,5–1,0	<0,3	0,5–1,0	<0,2	1,8–2,3	–
Высокопрочные	В95	1,4–2,0	1,8–2,8	–	5–7	–	0,2–0,6	–	0,1–0,25

Типичным представителем упрочняемых термообработкой алюминиевых сплавов являются дуралюмины, в которых основной легирующий элемент – медь. Диаграмма состояния сплавов алюминий – медь приведена на рис. 4.1.

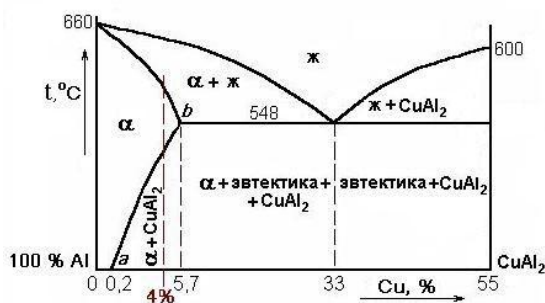


Рисунок 4.1 – Диаграмма состояния алюминий медь

На диаграмме видно, что алюминий в твёрдом состоянии способен растворять определённое количество меди, причем её растворимость максимальна при 548 С. Твёрдый раствор при этой температуре содержит 5,7 % Cu. С понижением температуры растворимость меди быстро уменьшается: при комнатной температуре она составляет 0,2 %. Структура алюминиевого сплава с 4 % Cu в равновесных условиях состоит из кристаллов твёрдого

раствора, содержащего очень мало меди, и кристаллов интерметаллида CuAl_2 . Прочность такого сплава невелика (140 МПа).

Термическое упрочнение осуществляется в два этапа.

На первом этапе сплав нагревают под закалку до такой температуры, при которой достигается максимальное растворение меди: выше линии предельной растворимости $\alpha\beta$, но ниже солидуса. При этом химическое соединение растворяется, и образуется однородный твёрдый раствор α с концентрацией меди 4 %. Быстрое охлаждение, чаще всего в воде, предотвращает выделение CuAl_2 , т. е. в результате закалки фиксируется структурное состояние сплава, достигнутое при высокой температуре. Атомы меди остаются в пересыщенном (переохлаждённом) твёрдом растворе. Этот пересыщенный твёрдый раствор при комнатной температуре является неустойчивой фазой, с повышенным запасом свободной энергии, связанной с искажениями кристаллической решётки алюминия атомами меди. Вся медь сверх равновесной концентрации 0,2 % будет стремиться выделиться из твёрдого раствора.

Второй этап термического упрочнения заключается в том, что из полученного при закалке твёрдого раствора постепенно, с течением времени, выделяется медь, образуя дисперсные частицы химического соединения CuAl_2 . В этом и состоит старение сплава.

Старением сплавов называют процессы распада твёрдого раствора, происходящие самопроизвольно в предварительно закалённом сплаве и приводящие к изменению структуры и свойств с течением времени.

Естественное старение происходит при комнатной температуре в течение нескольких суток (от 4 до 7). Искусственное старение (при повышенных температурах) происходит гораздо быстрее, в течение нескольких часов или минут, и даёт наивысшие результаты.

Дисперсные частицы, возникающие в твёрдом растворе в процессе выдержки после закалки, препятствуют скольжению дислокаций при деформировании, поэтому прочность и твёрдость сплава возрастают.

Прочность дуралюмина после естественного старения составляет около 400 МПа, т. е. почти вдвое больше, чем у отожжённого. Искусственное старение проводится при температурах 150–170 °С.

Все остальные алюминиевые сплавы, представленные в табл. 4.1, упрочняются такой же термической обработкой – закалкой и старением. Отличие только в выборе режима. Механические характеристики упрочнённых алюминиевых сплавов представлены в табл. 4.2.

Литейные алюминиевые сплавы должны обладать узким температурным интервалом кристаллизации для получения плотной отливки, т. е. это сплавы, близкие по составу к эвтектике или эвтектические. Широко применяются литейные сплавы Al–Cu, Al–Zn, Al–Si. Наилучшими литейными свойствами обладают сплавы алюминий – кремний, по составу близкие к эвтектическому. Эти сплавы называют силуминами. Маркируются литейные алюминиевые сплавы буквами АЛ (алюминиевый литейный) и кодирующей цифрой, определяющей химический состав сплава, например: АЛ2, АЛ4.

Таблица 4.2 – Механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	Механические свойства				
		σ_B	σ_{02}	σ_{-1} ($5 \cdot 10^6$ циклов)	δ , %	<i>HV</i>
		МПа				
Д1*	Листы	400	240	105	20	95
	Прессованные прутки	480	320	125	14	—
Д16*	Листы	440	330	115	18	105
	Прессованные прутки	530	400	140	11	—
Д18*	Проволока	300	170	95	24	70
В95**	Листы	540	470	150	10	150
	Прессованные прутки	600	560	150	8	150
АК6**	Поковки	400	299	125	12	100
АК8**	Поковки	480	380	130	9	135

Обычный силумин АЛ2 является заэвтектическим сплавом, содержащим 12–13 % Si (рис. 7.2). После кристаллизации структура этого сплава представляет собой крупные светлые включения избыточного кремния и грубоигольчатую эвтектику. Сплав с такой структурой обладает низкими механическими свойствами: прочность составляет 100–120 МПа, а относительное удлинение при разрыве – 3–5 %. Только путем модифицирования расплава натрием или смесью NaF и NaCl удаётся получить мелкозернистую эвтектику со значительно более мелкими кристалликами кремния. Это приводит к значительному повышению механических свойств: $\sigma_b = 180\text{--}200$ МПа и $\delta = 6\text{--}8$ %.

Двойные алюминий-кремнистые сплавы обладают очень хорошей жидкотекучестью, поэтому из них изготавливают фасонные отливки сложной формы, для которых не требуется высоких механических свойств. Для повышения эксплуатационных и механических свойств (отливки для нагруженных деталей авиационных двигателей, литые детали, предназначенные для работы при температурах 250–300 °С и т. д.) сплавы легируют магнием, медью, марганцем, никелем или подвергают термической обработке – закалке в воду и искусственному старению. При этом предел прочности может достигать 240–260 МПа при относительном удлинении 20–18 %.

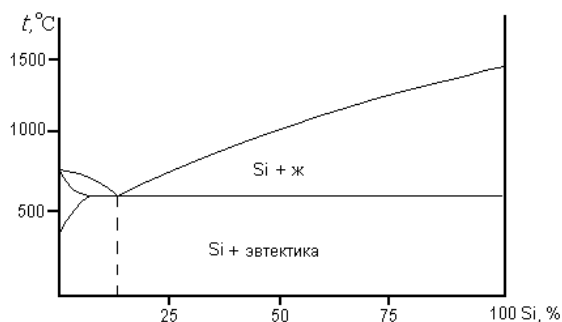


Рисунок 4.2 – Диаграмма состояния алюминий кремний

Легированные силумины могут применяться для изготовления корпусов компрессоров, картеров, головок цилиндров (АЛ9), деталей, работающих в условиях высокой влажности, в судостроении и самолетостроении.

(АЛ8, АЛ27).

Медь и её сплавы

Медь – действительно «цветной» металл: её цвет может варьироваться от светло-розового до красного. Медь имеет гранцентрированную кубическую решётку с параметром $a = 0,361$ нм. Полиморфных превращений у меди нет; температура плавления 1083°C . Медь обладает высокой технологичностью: хорошо паяется, сваривается, легко обрабатывается давлением. В отожжённом состоянии предел прочности меди невелик, он составляет 200–250 МПа при относительном удлинении около 40–50 %.

Главными отличительными характеристиками меди являются высокая теплопроводность и электропроводимость, пластичность и коррозионная стойкость. Но так же, как и у алюминия, примеси отрицательно влияют на свойства меди. В зависимости от содержания примесей различают следующие марки меди (ГОСТ 859–78): М00 (99,99 % Cu), М0 (99,97 % Cu), М2 (99,7 % Cu). Благодаря высокой электропроводимости медь нашла широкое применение в электротехнике. Из меди изготавливают шины, ленты, кабели, рубильники, обмотки электродвигателей и т. д. Примеси понижают электропроводимость, особенно те, что образуют с медью твердые растворы: фосфор, мышьяк, алюминий, олово. Другое основное свойство меди – высокая теплопроводность. Поэтому медь используют в металлургии и литейном производстве для водоохлаждаемых тиглей, кристаллизаторов, поддонов и изложниц.

Вредными примесями меди также являются висмут и свинец. Они практически не растворяются в меди, а образуют легкоплавкие эвтектики (с температурой плавления 326°C и 270°C соответственно) и создают красноломкость при горячей прокатке меди.

На механические свойства меди примеси влияют незначительно; в большей мере свойства зависят от состояния (литое, деформированное и т. д.). Для повышения прочности медь легируют цинком, алюминием, оловом, никелем, железом или подвергают холодной пластической деформации. При

этом её прочность может возрастать до 380–450 МПа при уменьшении электропроводимости на 3–5 %.

Медные сплавы, как и сплавы большинства других цветных металлов, по технологическим свойствам подразделяются на деформируемые (которые используются в производстве полуфабрикатов: листов, полос, проволоки и других профилей) и литейные (применяемые для изделий, которые получают путем литья в песчаные или металлические формы, а также методами непрерывной разливки и центробежного литья). По способности упрочняться с помощью термической обработки медные сплавы делятся на упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой. По химическому составу медные сплавы подразделяются на две основные группы: латуни и бронзы.

Сплавы меди с цинком носят название латуней. Специальные (многокомпонентные) латуни содержат и другие легирующие элементы, такие как алюминий, никель, марганец. Маркируются двойные латуни следующим образом: вначале ставится буква Л («латунь»), а затем цифра, показывающая содержание меди в процентах. В специальных латунях после буквы Л следуют буквы русского алфавита, обозначающие легирующий элемент: А – Al, Н – Ni, К – Si, С – Pb, О – Sn, Ж – Fe, Мц – Mn, Ф – P, Б – Be. После букв ставятся цифры, показывающие среднее содержание меди и легирующих элементов в процентах (см. табл. 4.3).

Введение тех или иных легирующих элементов повышает механические и антикоррозионные свойства латуни.

Медь с цинком образует много твёрдых растворов, что очевидно из диаграммы состояния Cu–Zn (рис. 4.3).

Практически применяются сплавы с содержанием цинка не более 42 %, которые имеют хорошие механические свойства (см. рис. 4.4).

В технике применяются однофазные или двухфазные латуни. Однофазные латуни имеют структуру α -твёрдого раствора, и поскольку в этой области нет фазовых превращений, то в α -латуни нельзя получить неравновесное состояние, – следовательно, её нельзя закалить.

Таблица 4.3 – Химический состав и механические свойства деформируемых латуней после отжига (ГОСТ 15527-70)

Марка латуни	Медь	Прочие элементы	σ_b	σ_{02}	δ	ψ	KCU , МДж/м ²	HV
	% (мас.)		МПа		%			
Л90	88-91	–	260	120	45	80	1,76	53
Л68	67-70	–	320	90	55	70	1,68	55
Л60	59-62	–	380	160	25	62	0,78	77
ЛАН59-3-2	57-60	2,5–3,5 Al 2–3 Ni	380	300	50	–	0,5	75
ЛЖМц59-1-1	57-60	0,1–0,4 Al 0,6–1,2 Fe 0,5–0,8 Mn 0,3–0,7 Sn	450	170	50	58	1,18	88
ЛО70-1	69-71	1–1,5 Sn	350	100	60	70	0,6	60
ЛК80-3	79-81	2,5–4 Si	310	200	58	55	0,4	100

Практически применяются сплавы с содержанием цинка не более 42 %, которые имеют хорошие механические свойства (см. рис. 4.4).

В технике применяются однофазные или двухфазные латуни. Однофазные латуни имеют структуру α -твердого раствора, и поскольку в этой области нет фазовых превращений, то в α -латуни нельзя получить неравновесное состояние, – следовательно, её нельзя закалить.

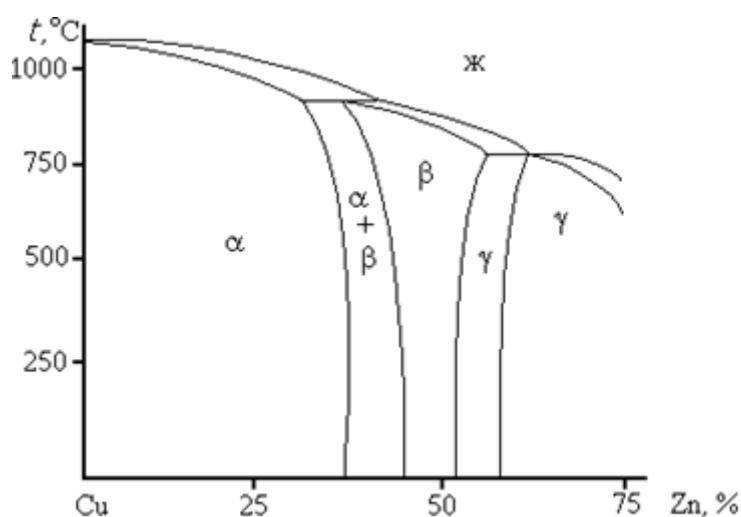


Рисунок 4.3 – Диаграмма состояния медь-цинк

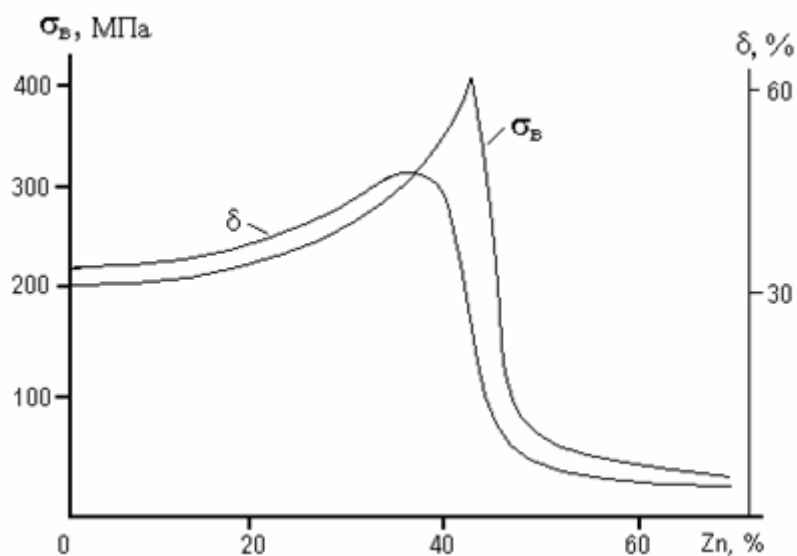


Рисунок 4.4 – Влияние цинка на механические свойства меди

Однофазная латунь представляет собой материал относительно невысокой твёрдости и прочности, обладающий значительной пластичностью. При переходе за предел насыщения (39 % Zn) появляется вторая фаза β – электронное соединение CuZn, что сопровождается резким снижением пластичности и повышением прочности и твёрдости. Это объясняется тем, что β -фаза является твёрдой и хрупкой, поэтому при увеличении ее количества наблюдается повышение твёрдости и хрупкости сплава. Применение находят или однофазные латуни, или двухфазные, в которых нет преобладания хрупкой фазы (т. е. содержащие 41–42 % Zn).

Однофазные латуни благодаря высокой пластичности хорошо деформируются в холодном состоянии, при этом увеличивается и прочность, и твёрдость латуни. Двухфазные латуни подвергают прокатке и прессованию в горячем состоянии. Латунь очень хорошо поддается обработке резанием, особенно если она легирована свинцом. При резании свинцовистых латуней образуется короткая ломкая стружка, что облегчает обработку изделий. Для повышения прочности и твёрдости латунь легируют алюминием (4 %).

Латунь используется как конструкционный материал там, где требуются высокая прочность и коррозионная стойкость: в трубопроводной арматуре, в химическом машиностроении и особенно в судостроении.

Изготавливают из латуней листы, ленты, проволоку, а затем из этого проката – радиаторные трубки, снарядные гильзы, трубопроводы, шайбы, гайки, втулки, уплотнительные кольца, токопроводящие детали электрооборудования.

Бронзы – это сплавы меди со всеми другими элементами, кроме цинка. В их названии используют прилагательные, указывающие на второй компонент. В зависимости от состава и структурного состояния после обработки прочность бронз может быть повышена с 200 до 750 МПа. Бронзы подразделяются на алюминиевые, оловянистые, кремнистые, бериллиевые и т. д. Бронзы маркируют буквами «Бр» (бронза), за которыми следуют буквы и цифры, указывающие на название и содержание в % легирующих элементов. Например, БрОФ10-1: 10 % Sn, 1 % P, остальное медь.

Оловянистые бронзы известны с глубокой древности; именно этот замечательный материал дал название бронзовому веку. Они, как и другие сплавы, делятся на деформируемые (10 % Sn) и литейные (10 % Sn). Когда-то бронзы получали название в зависимости от их назначения: монетная (4–10 % Sn), пушечная (8–18 % Sn), колокольная (20–30 % Sn), зеркальная (30–35 % Sn). Оловянистые бронзы отличаются хорошими литейными свойствами, например, малой усадкой при кристаллизации, поэтому можно отливать сложные по конфигурации изделия. С целью экономии дорогого олова в бронзы добавляют цинк в таком количестве, чтобы он полностью растворялся в меди, образуя твёрдый раствор, тем самым повышая механические свойства. Для повышения антифрикционных свойств и лучшей обрабатываемости резанием в оловянистые бронзы добавляют свинец. Литейные оловянистые бронзы применяются для пароводяной арматуры, так как обладают высокой коррозионной стойкостью в воде и на воздухе.

Деформируемые бронзы имеют однофазную структуру твёрдого раствора. После холодной обработки давлением бронзы подвергают отжигу при 600–700 °С. Они пластичнее и прочнее, чем литейные. Кроме того, деформируемые оловянистые бронзы обладают высокими упругими

свойствами, поэтому их используют для получения пружин и мембран в электротехнике и других областях.

Алюминиевые бронзы обычно содержат от 5 до 10 % алюминия. Механические и коррозионные свойства этих бронз выше, чем оловянистых. По мере изменения состава, аналогично латуням и оловянистым бронзам, меняются и свойства: твёрдость НВ, прочность и пластичность быстро растут, затем пластичность и прочность понижаются из-за образования второй хрупкой фазы. Поэтому в практике применяют двухфазные бронзы, содержащие не более 11 % Al. Двухфазные бронзы, отличаются высокой прочностью – до 600 МПа и твёрдостью свыше 100 НВ. Так как алюминиевые бронзы испытывают эвтектоидное превращение, то их можно подвергать закалке и старению. Однофазные алюминиевые бронзы (БрА7) более пластичны, чем двухфазные, и относятся к деформируемым. Они обладают высокой прочностью и пластичностью ($\sigma_B = 400\text{--}450$ МПа, $\delta = 60$ %).

Легируют алюминиевые бронзы железом, никелем, марганцем для устранения литейных недостатков и увеличения механических свойств после упрочняющей термической обработки (закалки и последующего старения). Например, у бронзы БрАЖН 10-4-4 твердость увеличивается от 140–160 НВ до 400 НВ. Поэтому из алюминиево-железоникелевых бронз изготавливают детали, работающие в условиях износа: сёдла клапанов, направляющие втулки, части насосов и турбин, шестерни и др.

Кремнистые бронзы содержат до 3 % Si и являются заменителями оловянистых бронз. Они пластичны, коррозионностойки в некоторых агрессивных средах, хорошо свариваются и паяются. Для повышения твёрдости и прочности кремнистых бронз их легируют марганцем и никелем с последующей термической обработкой. Эти бронзы используют вместо более дорогих оловянистых при изготовлении антифрикционных деталей, а также для замены бериллиевых бронз при производстве пружин.

Свинцовистые бронзы (БрС30) обладают высокими

антифрикционными свойствами, высокой теплопроводностью (до 300 °С). Прочность таких бронз небольшая, но они очень пластичны, хорошо сопротивляются ударам. Поэтому из этих бронз изготавливают вкладыши подшипников, работающих при больших давлениях и скоростях.

Бериллиевые бронзы (БрБ2) содержат не более 2–2,5 % бериллия. Так как бериллий образует с медью твёрдый раствор переменной растворимости, то эту бронзу применяют только после упрочняющей термической обработки (заковки от 780 °С и старения при 320 °С). При этом повышаются как прочностные, так и упругие свойства: $\sigma_B = 1300\text{--}1500$ МПа, $\sigma_{упр} = 600\text{--}740$ МПа. Кроме того, бериллиевые бронзы обладают высокой электропроводимостью, поэтому их применяют в виде пружин в электроаппаратуре, в качестве упругих контактов и т. д. Но высокая стоимость не позволяет широко применять эту бронзу. Заменяют её более дешёвой – титановой или титановохромистой бронзой. После термической обработки она имеет почти такие же прочностные свойства, но более пластична и имеет высокую релаксационную стойкость при температуре до 400 °С. Поэтому упругие элементы из такой бронзы могут работать при более высокой температуре, чем из бериллиевой.

Состав и механические характеристики некоторых литейных и деформируемых бронз приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Химический состав и механические свойства бронз

Бронза	Содержание элементов, %				σ_B	σ_{02}	δ , %
	Sn	Pb	Zn	Прочие	МПа		
Деформируемые бронзы							
БрОЦС4-4-2,5	3–5	1,5–3,5	3–5	–	350	130	40
БрОФ6,5-0,4	6–7	–	–	0,26–0,4 Р	400	250	60–70
БрАЖН10-4-4				0,1–0,2 Ni 9,5–11 Al	750–		
(закалка и	–	–	–	3,5–5,5 Fe	830	–	9–15
БрБНТ1,9				1,85–2,1 Be			
(закалка и	–	–	–	0,2–0,4 Ni	1200	–	4
Литейные бронзы							

БрО5Ц5С5	4-6	4-6	4-6	–	180	100	4
БрС30	–	27-31	–	–	60	–	4

Антифрикционные сплавы

Антифрикционные материалы предназначены для изготовления подшипников (опор) скольжения, которые широко применяют в современных машинах и приборах из-за их устойчивости к вибрациям, бесшумности работы, небольших габаритов. Антифрикционность – это способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и тем самым низкие потери на трение и малую скорость изнашивания сопряжённой детали – стального или чугунного вала.

Хороший антифрикционный материал должен иметь высокую теплопроводность, хорошо смачиваться смазкой, образовывать на поверхности защитные плёнки мягкого металла, хорошо прирабатываться, иметь высокое сопротивление усталости.

Подшипниковый материал оценивают по коэффициенту трения и по допустимым значениям давления на опору p и скорости скольжения v . Параметр pv определяет удельную мощность трения.

Металлические подшипниковые материалы предназначены для работы в режиме жидкостного трения, сочетающемся в условиях эксплуатации с режимом граничной смазки. Из-за перегрева возможно разрушение граничной масляной плёнки, в этом случае важно, как материал сопротивляется схватыванию. Поэтому в структуре сплава должна быть мягкая составляющая.

По структуре подшипниковые материалы подразделяются на два типа: 1) сплавы с мягкой матрицей и твёрдыми включениями; 2) сплавы с твёрдой матрицей и мягкими включениями.

Сплавы первого типа – это баббиты, а также медные сплавы, в основном, бронзы. Мягкая матрица в этих сплавах обеспечивает хорошую прирабатываемость и особый микрорельеф поверхности, улучшающий распределение смазки и теплоотвод. Твёрдые включения, на которые опирается вал, обеспечивают высокую износостойкость.

Баббиты – мягкие (30 НВ) антифрикционные сплавы на оловянной или

свинцовой основе. В соответствии с ГОСТ 1320–74 к сплавам на оловянной основе относятся баббиты Б83 (83 % Sn, 11 % Sb, 6 % Cu) и Б88, на свинцовой основе – Б16 (16 % Sn, 16 % Sb, 2 % Cu), БС6 и БН. Особую группу образуют более дешёвые свинцово-кальциевые баббиты: БКА и БК2 (ГОСТ 1209-90).

По антифрикционным свойствам баббиты превосходят все остальные сплавы, но значительно уступают им по сопротивлению усталости. В связи с этим баббиты применяют только для тонкого (менее 1 мм) покрытия рабочей поверхности опоры скольжения. Наилучшими свойствами обладают оловянистые баббиты, у которых $p_v = (500–700) \cdot 10^5$ Па·м/с. Из-за высокого содержания дорогого олова их используют для подшипников ответственного назначения (дизелей, паровых турбин и т. п.), работающих при больших скоростях и нагрузках (табл. 4.5). Их структура (см. рис. 4.5) состоит из твёрдого раствора сурьмы в олове (мягкая фаза, тёмный фон) и твёрдых включений β (SnSb) и Cu_3Sn .

Таблица 4.5 – Характеристики антифрикционных материалов

Материал	HB	Коэффициент трения по стали		Допустимый режим работы		
		Без смазочно- го материала	Со смазочным материалом	p , МПа	v , м/с	p_v , МПа·м/с
Баббиты:						
Б83	30	0,07–0,12	0,004–0,006	15	50	75
Б16	30			10	30	3
БК2	32			15	15	6
Бронзы:						
БрО10Ф1	100	0,1–0,2	0,004–0,009	15	10	15
БрО5Ц5С5	60			8	3	12
БрС30	25			25	12	30
Латуни:						
ЛЦ16К4	100	0,15–0,24	0,009–0,016	12	2	10
ЛЦ38Мц2С2	80			10,6	1	10
Алюминиевый сплав						
А09–2	31	0,1–0,15	0,008	25	20	100

Бронзы относятся к лучшим антифрикционным материалам. Особое место среди них занимают оловянистые и оловянисто-цинково-свинцовистые бронзы. К первым относятся бронзы БрО10Ф1, БрО10Ц2, ко вторым — БрО5Ц5С5, БрО6Ц6С3 (ГОСТ 613–79). Бронзы применяют для монолитных подшипников скольжения турбин, электродвигателей, компрессоров, работающих при значительных давлениях и средних скоростях скольжения (табл. 4.2)

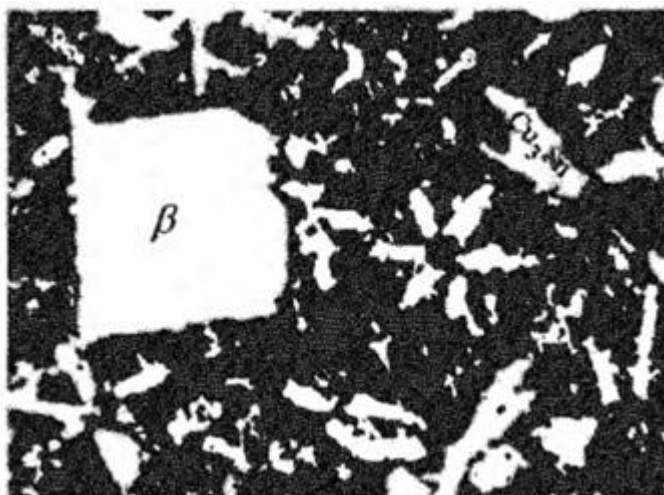


Рисунок 4.5 – Микроструктура баббита Б86.х400

В последнее время бронзы широко используются как компоненты порошковых антифрикционных материалов или тонкостенных пористых покрытий, пропитанных твёрдыми смазочными материалами.

Латуни применяют в качестве заменителей бронз для опор трения. Однако по антифрикционным свойствам они уступают бронзам. Двухфазные латуни ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А и т.д. (ГОСТ 17711–93) применяют при малых скоростях скольжения (< 2 м/с) и невысоких нагрузках. Их часто используют для опор трения приборов.

К сплавам второго типа относятся свинцовистая бронза БрС30 с 30 % Рb (ГОСТ 493–79), и алюминиевые сплавы с оловом, например, сплав А09–2 (9 % Sn, 2 % Cu). Функцию мягкой составляющей в этих сплавах выполняют включения свинца или олова. При граничном трении на поверхность вала переносится тонкая плёнка этих мягких легкоплавких металлов, защищая

шейку стального вала от повреждения.

Антифрикционные свойства сплавов достаточно высокие, особенно у алюминиевых сплавов. Из-за хорошей теплопроводности граничный слой смазочного материала на этих сплавах сохраняется при больших скоростях скольжения и высоком давлении (см. табл. 4.2).

Алюминиевый сплав А09–2 применяют для отливки монометаллических вкладышей, бронзу – для наплавки на стальную ленту.

В настоящее время наибольшее распространение получили многослойные подшипники, в состав которых входят многие из рассмотренных выше сплавов. Сплавы или чистые металлы в них уложены слоями, каждый из которых имеет определённое назначение.

Строение четырёхслойного подшипника, применяемого в современном автомобильном двигателе, показано на рис. 4.6.

Он состоит из стального основания, слоя (250 мкм) свинцовистой бронзы (БрС30), тонкого (≈ 10 мкм) слоя никеля или латуни и слоя свинцово-оловянного сплава толщиной 25 мкм. Стальная основа обеспечивает прочность и жёсткость подшипника; верхний мягкий слой улучшает прирабатываемость. Когда он изнашивается, рабочим слоем становится свинцовистая бронза. Слой бронзы, имеющий невысокую твёрдость, также обеспечивает хорошее прилегание шейки вала, высокую теплопроводность и сопротивление усталости. Слой никеля служит барьером, не допускающим диффузию олова из верхнего слоя в свинец бронзы.

Вопросы и задания

1. Какой термической обработке подвергается сплав дуралюмин? Для обоснования ответа приведите диаграмму состояния алюминий – медь. Каков механизм упрочнения дуралюмина?
2. Какой материал используют для часовых и приборных пружин? Опишите его состав и структуру, приведите механические характеристики.
3. Назначьте марку латуни, устойчивой к коррозии в морской воде.

Расшифруйте её состав и опишите структуру, используя диаграмму состояния медь – цинк. Укажите способ упрочнения и основные свойства латуни.

4. Из чего изготавливают вкладыши подшипников скольжения? Опишите состав и структуру сплавов, назовите марки.

5. Для изготовления ответственных деталей (втулки, клапаны, зубчатые колёса) выбран сплав БрАЖН10-4-4. Расшифруйте состав, укажите режим термической обработки, механические свойства и опишите структуру, используя диаграмму состояния медь – алюминий.

6. Для изготовления мембран и других упругих элементов применяют бронзу БрБНТ1,9. Укажите состав, режим термической обработки и механические свойства материала. Какие процессы происходят при термической обработке? Объясните природу упрочнения в связи с диаграммой состояния медь – бериллий.

7. Приведите марки и опишите структуру литейных алюминиевых сплавов. Каким образом повышают их эксплуатационные свойства? Укажите области применения отливок из алюминиевых сплавов.

8. Для изготовления деталей в авиастроении применяется сплав Д18. Расшифруйте состав сплава, укажите способ изготовления деталей из него и приведите характеристики механических свойств.

9. Для изготовления некоторых деталей в авиастроении применяется сплав АК6. Расшифруйте состав сплава, укажите способ изготовления деталей из него и приведите характеристики механических свойств. Какой упрочняющей термообработке подвергают этот сплав?

10. Для деталей уплотнения используют бронзу БрОФ6,5-0,4. Расшифруйте состав сплава, опишите структуру и термическую обработку бронзы, приведите характеристики механических свойств.

11. Для деталей пароводяной арматуры выбрана бронза БрО5Ц5С5. Расшифруйте состав сплава, опишите структуру и объясните назначение легирующих элементов. Приведите характеристики механических свойств.

12. Для изготовления деталей способом глубокой вытяжки применяют латунь Л68. Укажите состав и опишите структуру сплава. Назначьте режим термической обработки, применяемой между отдельными операциями вытяжки, и обоснуйте его выбор. Приведите характеристики механических свойств этого сплава.

13. Образец из сплава Д16 медленно охладили от 550 °С до комнатной температуры. Твёрдость составила 65 НВ. Второй образец закалили с той же температуры в воде, а затем подвергли нагреву на 150 °С в течение 100 ч. Твёрдость сплава оказалась равна 120 НВ. Объясните разницу значений твёрдости.

14. Образцы закалённого сплава Д16 нагревали на 150 °С в течение различного времени. Измерения твёрдости дали следующие результаты:

15. Постройте графическую зависимость твёрдости от времени отжига. Объясните такое поведение сплава.

16. Какой сплав следует выбрать для изготовления подшипников скольжения турбины? Поясните структуру сплава и её влияние на антифрикционные свойства.

17. Предложите сплав с высокой удельной прочностью для изготовления высоконагруженных деталей самолётов (обшивки, шпангоуты, лонжероны). Опишите его структуру и способ упрочнения.

Список литературы:

Перечень основной литературы:

1. Электроматериаловедение: учеб. Пособие / А.С. Красько, С.Н. Павлович, Е.Г. Понаморенко. – 2-изд., стер. – Минск : РИПО, 2015. – 212 с.
Режим

доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=463625

2. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения: учебное пособие / Е.Е. Привалов. – М.-Берлин: Директ-

Медиа, 2016. – 266 с. Режим доступа:
http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=436753

Перечень дополнительной литературы:

3. Основы материаловедения: учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 152 с.

Режим

доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=364047

Практическая работа №5

Тема: Расчет опорно-стержневого изолятора наружной установки

Цель: Познакомиться с конструкцией и основами расчета опорных стержневых изоляторов

Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:

Обучающийся должен:

знать:

– конструкцию опорных стержневых изоляторов;

уметь:

– проводить расчет опорных стержневых изоляторов.

Актуальность темы:

Заключатся в проведении расчетов опорно-стержневых изоляторов наружной установки

Теоретическая часть:

Опорные стержневые изоляторы, как правило, представляют собой сплошные керамические стержни с выступающими ребрами. На торцевых частях изоляторов закреплены металлические фланцы (электроды) с нарезными отверстиями для крепления на аппаратах и в распределительных устройствах.

В обозначениях типов опорных стержневых изоляторов буквы и цифры обозначают: О - опорный; Н - наружной установки; С - стержневой; 1-я цифра - нормальное напряжение, кВ; 2-я цифра – минимальная разрушающая нагрузка на изгиб.

Например, ОНС-35-2000 (опорный стержневой изолятор наружной установки на напряжение 35 кВ, разрушающая нагрузка его 2000 Па). Опорный стержневой изолятор типа ОНС (см. рис. 5.1) имеет следующие

основные размеры можно выразить диэлектрические потери в изоляционных материалах:

h – высота, мм;

A – диаметр керамического стержня, мм;

D – диаметр, учитывающий величину выступающих ребер, которые увеличивают длину пути утечки тока по поверхности изолятора, мм.

Последовательность расчета изоляторов

1. Для определения полного тока утечки следует учитывать ток утечки через объем изолятора и ток утечки по его поверхности, а для этого надо определить полное электрическое сопротивление опорного изолятора по формуле

$$\frac{1}{R_n} = \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_s}$$

где R_n – полное сопротивление изолятора, им; R_v – объемное сопротивление, Ом; R_s – поверхностное сопротивление, Ом;

Чтобы упростить решение задачи, длину пути прохождения тока по поверхности изолятора следует принять равной 1,75 l , т.е. считать её в 1,75 раза больше длины прохождения тока по объему.

Длину электрода (фланца), соприкасающегося с поверхностью, рассчитать по диаметру A . Помнить, что объемное электрическое сопротивление зависит от удельного объемного сопротивления и размеров изолятора (ρ_v , S , h), а поверхностное сопротивление зависит от удельного поверхностного сопротивления, длины окружности стержня, соприкасающегося с электродом, и высоты стержня - изолятора (ρ_s , b , H).

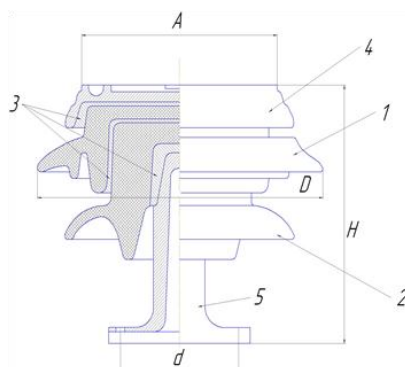


Рисунок 5.1. Опорно-стержневой изолятор наружной установки:

1 – верхняя часть изолятора, 2 – нижняя часть изолятора,

3 – цементно-песчаная связка, 4 – чугунный колпак,

5 – чугунный штырь

$$R_v = \rho_v \cdot \frac{H}{S} \text{ где } S = \frac{\pi A}{4};$$

$$R_s = \rho_s \cdot \frac{H_s}{l_A}, \text{ где } l_A = \pi A, H_s = 1,75 \cdot H$$

2. При расчете емкости изолятора площадь электрода, находящегося под напряжением, следует определять по наименьшему диаметру стержня A , а расстояние между электродами будет равно высоте стержня h . Формулой пользоваться для расчета емкости обычного конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 S}{h}$$

где C – ёмкость конденсатора, Ф.

3. Диэлектрические потери в опорном изоляторе складываются из потерь на поляризацию в материале стержня и из потерь, обусловленных сквозной проводимостью, то есть это активная мощность, рассеиваемая в изоляторе, которая вызывает его нагрев P_a :

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta$$

4. Все величины в расчетные формулы надо подставлять в единицах СИ.

Вопросы и задания

1. Опорный стержневой керамический изолятор ОНС изолирует и поддерживает шины контактных деталей в открытом распределительном устройстве. Изолятор представляет собой сплошной круглый стержень с выступающими ребрами. На торцевых частях изолятора закреплены металлические фланцы (колпаки), являющиеся электродами (рис.5.1).

Определить полный ток утечки, протекающий в изоляторе, емкость и диэлектрические потери в нем

Таблица 5.1 – Исходные данные

Материал изолятора	Уд. объёмное сопр ρ_v , Ом м	Уд. поверхн. сопр. ρ_s , Ом м	Отн. диэл. прониц, ϵ	Тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta$	Напряжение U , кВ	Высота и зол. A , мм	Диаметр D , мм	Диаметр A , мм	Частота
стеатит	$7 \cdot 10^{10}$	10^{13}	8,6	0,001	35	420	220	160	50

Список литературы:

Перечень основной литературы:

1. Электроматериаловедение: учеб. Пособие / А.С. Красько, С.Н. Павлович, Е.Г. Понаморенко. – 2-изд., стер. – Минск : РИПО, 2015. – 212 с.
Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=463625

2. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения: учебное пособие / Е.Е. Привалов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 266 с. Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=436753

Перечень дополнительно литературы:

1. Основы материаловедения: учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 152 с.
Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=364047

Практическая работа №6

Тема: Расчет свинцового высоковольтного кабеля

Цель: Познакомиться с конструкцией и основами расчета свинцового высоковольтного кабеля.

Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:

Обучающийся должен:

знать:

– конструкцию свинцового высоковольтного кабеля;

уметь:

– проводить расчет свинцового высоковольтного кабеля.

Актуальность темы:

Заключается в ознакомлении с конструкцией и основами расчета свинцового высоковольтного кабеля.

Теоретическая часть:

Электрическое поле кабеля подобно полю цилиндрического конденсатора, которое характеризуется осевой симметрией. Последовательность решения следующая.

1. В соответствии с теоремой Гаусса, напряженность электрического поля по толщине изоляции выражается формулой

$$E_x = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0 2\pi r_x l}$$

где q — заряд жилы кабеля, Кл;

r_x - переменная величина, определяющая гиперболический закон изменения напряженности электрического поля по толщине изоляции кабеля, м; l - длина кабеля, м;

E_x — напряженность электрического поля, кВ/м.

2. Напряжение между жилой кабеля и свинцовой оболочкой выражается через определенный интеграл вектора напряженности поля по пути убывания (знак минус) потенциала вдоль направления силовых линий:

$$U = - \int_R^0 E_x dx = - \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0 2\pi r_x l} \int_R^0 \frac{dx}{rx}$$

где $R=r+d$ - внутренний радиус свинцовой оболочки, мм; r - радиус медной жилы, мм; d - толщина изоляции, мм; U - напряжение, кВ.

2. В соответствии с определением ёмкости кабеля, как отношения заряда к напряжению, имеем

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln \frac{R}{r}}$$

где C - ёмкость кабеля, Ф. 4. Подставив в (1) $q = UC$, получим

$$E_x = \frac{U}{x \ln \frac{R}{r}}$$

3. Реактивная мощность в кабеле (зарядная мощность) выражения

$$Q = \omega C U_{\phi}^2$$

Задание:

1. Питание электрической установки осуществляется трехфазным током с помощью трех свинцовых высоковольтных кабелей.

2. Определить ёмкость одного свинцового высоковольтного кабеля, минимальную и максимальную напряженности электрического поля в изоляции кабеля и реактивную (зарядовую) мощность в нём, если известны: линейное напряжение U , частота поля f , сечение алюминиевой жилы кабеля S , толщина бумажной пропитанной изоляции d с диэлектрической проницаемостью ε , длина кабеля l . Числовые значения всех параметров указаны в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Исходные данные

Напряжение U, кВ	Сечение жилы кабеля S, мм	Толщина изоляции d, мм	Диэл. прониц, ε	Длина кабеля l, км	Частота f, Гц
10	70	10	4	18	50

Список литературы:

Перечень основной литературы:

1. Электроматериаловедение: учеб. Пособие / А.С. Красько, С.Н. Павлович, Е.Г. Понаморенко. – 2-изд., стер. – Минск : РИПО, 2015. – 212 с.

Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=463625

2. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения: учебное пособие / Е.Е. Привалов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 266 с. Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=436753

Перечень дополнительной литературы:

1. Основы материаловедения: учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 152 с.

Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=364047

Практическая работа №7

Тема: Расчет питающей линии электрической установки

Цель: Познакомиться с основами расчета питающей линии электрической установки.

Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:

Обучающийся должен:

знать:

– определения питающих линий электрических установок;

уметь:

– проводить расчет питающей линии электрической установки.

Актуальность темы:

Заключается в ознакомлении с основными расчетами питающей линии электрической установки.

Теоретическая часть:

Согласно ПУЭ проводники любого назначения должны удовлетворять требованиям в отношении предельно допустимого нагрева. Количество теплоты, выделяемое ежесекундно в проводе сопротивлением R в проходящем токе, определяется выражением

—

где W - количество теплоты, Вт; t - время, с.

Часть этого тепла идет на повышение температуры провода, а другая часть рассеивается в окружающей среде.

В установившемся тепловом режиме количество рассеиваемого
ежесекундно тепла станет равным количеству тепла, выделяемого током.
Уравнение теплового баланса имеет следующий вид

где σ - коэффициент теплоотдачи, Вт/мм² • град;

$S_{\text{п}}$ - поверхность охлаждения провода, мм²;

$\theta_{\text{уст}}$ - установившаяся разность температур провода и окружающей
среды:

$$\theta_{\text{уст}} = \theta_{\text{прод}} - \theta_{\text{окр}}$$

Плотность тока определяется из выражения

—

где δ - плотность тока, А/мм

Сопротивление провода:

—

где l - длина провода, м;

$$S = \frac{\pi d^2}{4} - \text{сечение провода (диаметра), мм}^2;$$

γ - удельная проводимость токоведущей жилы провода (обратная
величине удельного сопротивления), Ом⁻¹ м⁻¹

R - сопротивление провода, Ом.

Принимаем в первом приближении, что поверхность охлаждения равна
боковой поверхности цилиндрического провода, т.е.

$$S_{\text{п}} = \pi d l \cdot 10^3, \text{ где } l \text{ выражено в мм.}$$

Уравнение теплового баланса будет иметь вид

—

—

Соответственно получим, что плотность тока определяется из выражения:

$$\sqrt{\frac{I_{\text{доп}}}{\delta}}$$

где δ - плотность тока, А/мм².

Допустимая плотность тока $I_{\text{доп}}$ получается, если в это выражение подставить значение $\gamma = \gamma_{\theta}$ т.е. удельную проводимость проводника при изменении температуры до $\theta_{\text{пред}}$.

При нагреве сопротивление проводника возрастает. Температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(\theta_2 - \theta_1)}$$

где R_1 - сопротивление проводника при температуре $\theta_1 = 20^{\circ}\text{C}$ т.е. температуре, для которой приводятся в справочниках удельные сопротивления (проводимости) материалов;

R_2 — сопротивление проводника, соответствующее температуре:

При нагреве провода до θ_2 его удельное сопротивление возрастает значения

и, следовательно,

$$\delta = \frac{I_{\text{доп}}}{\delta}$$

Параметры ρ , γ и λ задаются в справочниках для каждого материала проводника. Получив для предельной температуры $\delta = \delta_{\text{доп}}$, определяем длительно допустимый ток:

где S - площадь сечения провода, мм^2 . Рабочий ток определяется по формуле:

—

где $I_{\text{раб}}$ - рабочий ток, А.

После полученных результатов необходимо сделать вывод о работе установки.

Вопросы и задания

Электрическая установка, имеющая мощность P , питается от электрической сети напряжением U . Питающая линия выполнена проводами, имеющими предельно допустимую температуру нагрева $\theta_{\text{пред}}$, и коэффициент теплопередачи σ .

Рассчитать допустимую по условиям нагрева плотность тока и допустимый ток, сравнить его с рабочим током и определить надежность и экономичность работы установки с данными проводами.

Числовые значения параметров установки, материалы проводов и их изоляции приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1 – Исходные данные

Материал провода	Материал изоляции	Сечение провода S , мм^2	Предельно допустимая температура $\theta_{\text{пред}}$, $^{\circ}\text{C}$	Мощность уст-ки P , Вт	Напряжение сети U , В	Коэфф. теплоотдачи $\sigma \cdot 10^5$ Вт/ мм^2 град
М	ПХ	2,5	100	800	220	3,2

Список литературы:

Перечень основной литературы:

1. Электроматериаловедение: учеб. Пособие / А.С. Красько, С.Н. Павлович, Е.Г. Понаморенко. – 2-изд., стер. – Минск : РИПО, 2015. – 212 с.

Режим

доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=463625

2. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения: учебное пособие / Е.Е. Привалов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 266 с. Режим

доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=436753

Перечень дополнительной литературы:

1. Основы материаловедения: учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 152 с.

Режим

доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=364047