

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна
Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета
Дата подписания: 23.08.2023 17:16:32
Уникальный программный ключ:
d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕ-
НИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по выполнению практических работ
по дисциплине «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕ-
ДЕНИЕ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Содержание

№ п/п		Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование практических работ	
4.	Содержание практических работ	
4.1	Практическая работа №1 Способы упрочнения металлов и сплавов.	
4.2	Практическая работа №2 Диаграммы состояния сплавов.	
4.3.	Практическая работа №3 Термическая обработка углеродистых сталей.	
4.4	Практическая работа №4 Сплавы цветных металлов.	
4.5	Практическая работа №5 Расчет опорно-стержневого изолятора наружной установки.	
4.6	Практическая работа №6 Расчет свинцового высоковольтного кабеля.	
4.7	Практическая работа №7 Расчет питающей линии электрической установки.	
5	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	
5.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины	
5.2	Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине	
5.3	Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины	

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

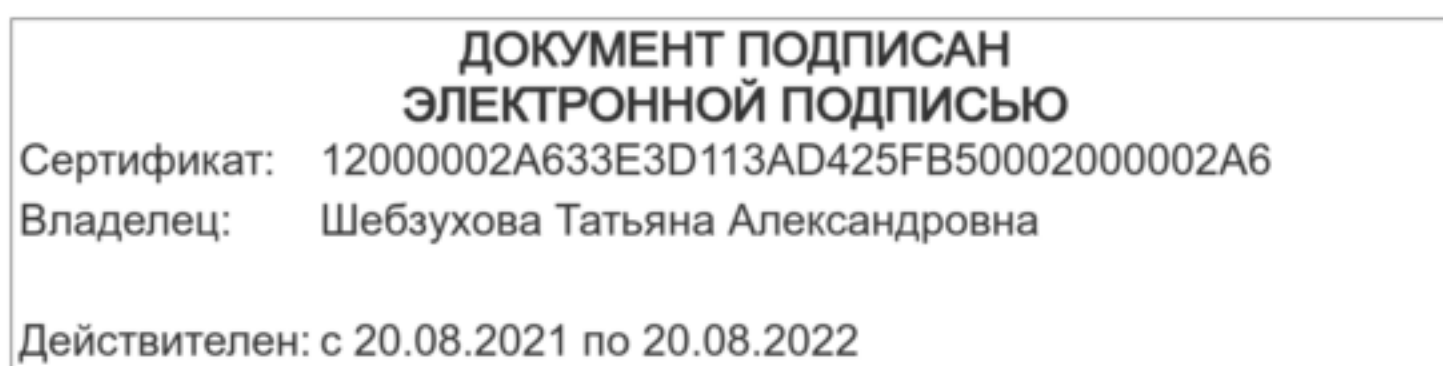
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Введение

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины. 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.



1. Цель и задачи изучения дисциплины

Целью дисциплины является изучение состава и свойств конструкционных и электротехнических материалов в зависимости от их химического состава, структуры и той среды, в которой им предстоит находиться или работать.

Задачами изучения дисциплины являются:

- знакомство с основными достижениями в области электротехнического и конструкционного материаловедения;
- понимание процессов и явлений, которые происходят в электротехнических и конструкционных материалах при различных воздействиях;
- умение влиять на свойства материалов с помощью технологических процессов, позволяющих предотвращать вредные воздействия окружающей среды в процессе работы соответствующего оборудования.

2. Оборудование и материалы

Аппаратные средства: переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения.

3. Наименование практических работ

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
4 семестр			
1	Практическая работа № 1. Способы упрочнения металлов и сплавов. Получить представление о способах упрочнения металлов и количественной зависимости предела текучести от параметров структуры.		
2	Практическая работа № 2. Диаграммы состояния сплавов. Изучить основные разновидности диаграмм состояния двойных сплавов; научиться анализировать диаграммы состояния: определять температуры начала и окончания плавления сплавов, находить области равновесного существования растворов, обосновывать терминологию обработки сплавов, оценивать их технологические свойства.	1,5	

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

3	Практическая работа №3. Термическая обработка углеродистых сталей. 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.		
4	Практическая работа №4. Сплавы цветных металлов. 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.		
5	Практическая работа №5. Расчет опорно-стержневого изолятора наружной установки. Познакомиться с конструкцией и основами расчета опорных стержневых изоляторов.	1,5	
6	Практическая работа №6. Расчет свинцового высоковольтного кабеля. Познакомиться с конструкцией и основами расчета свинцового высоковольтного кабеля.		
7	Практическая работа №7. Расчет питающей линии электрической установки. Познакомиться с основами расчета питающей линии электрической установки.		
	Итого за 4 семестр:	3	
	Итого:	3	

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

4. Содержание практических работ

Практическая работа №1. Способы упрочнения металлов и сплавов.

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

Основы теории:

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.

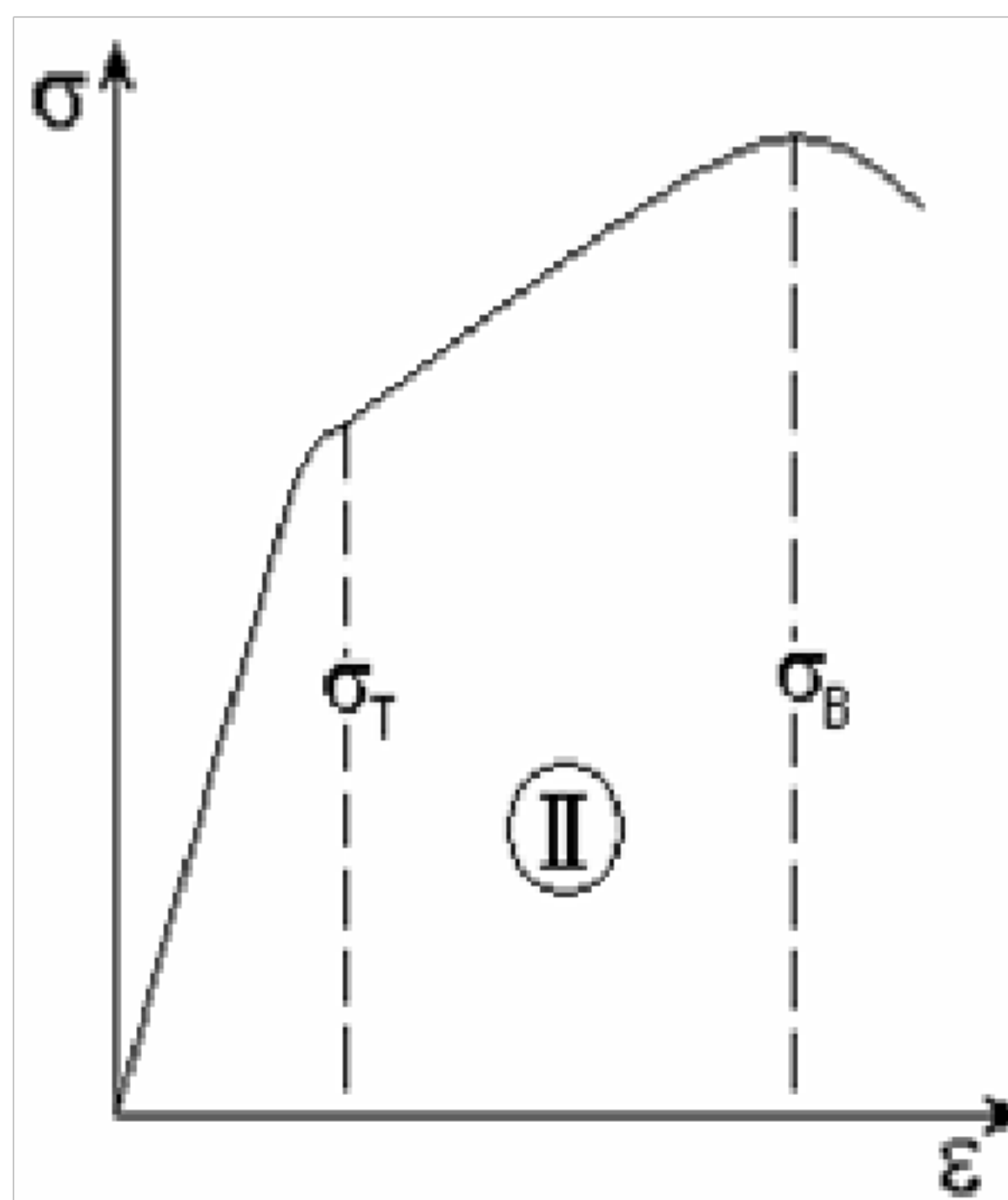


Рисунок 1.1 – Область пластической деформации

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

теоретический документ	ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

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).

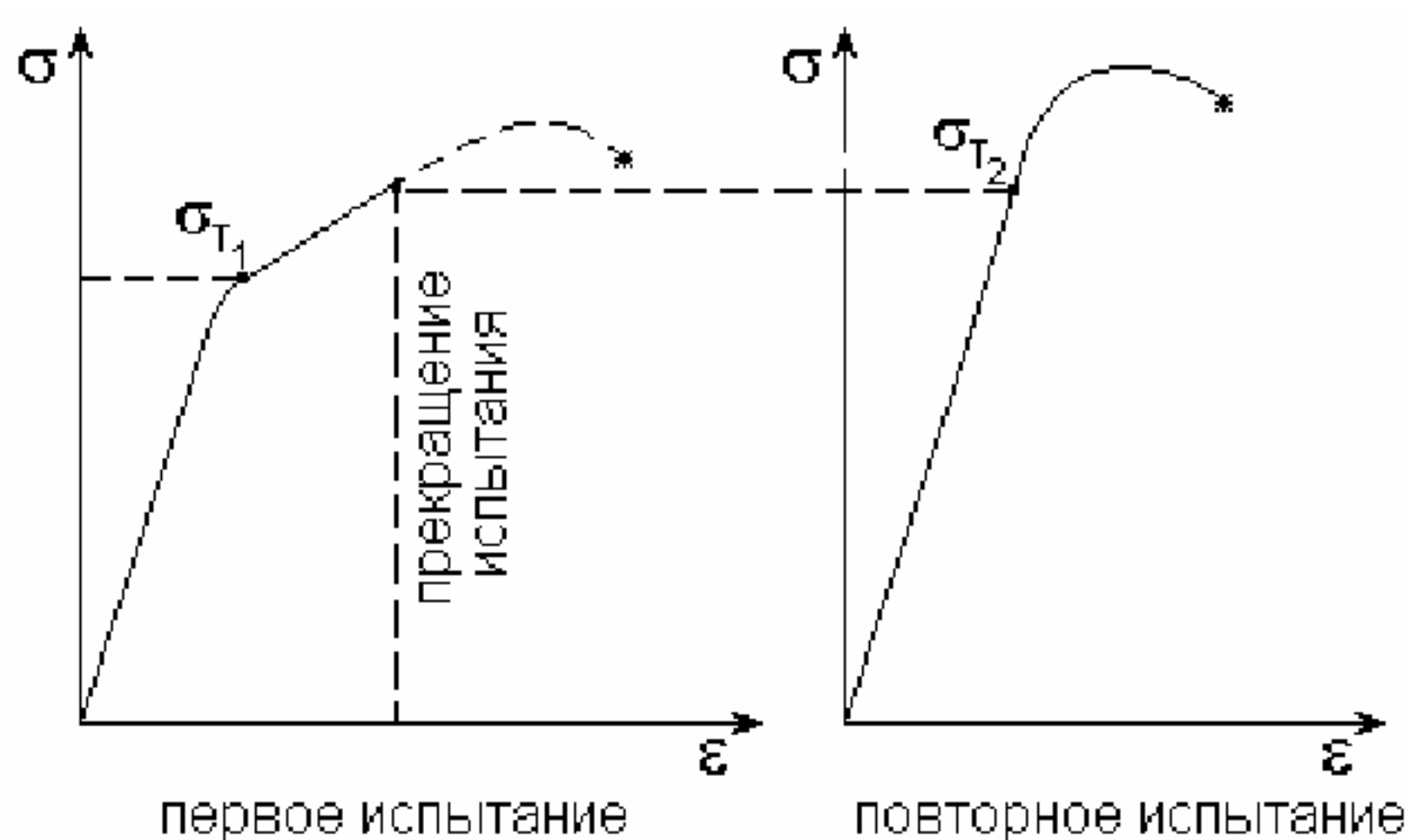


Рисунок 1.2 – Упрочнение металла при повторном испытании на растяжение

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: $\sigma_{T2} > \sigma_{T1}$.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

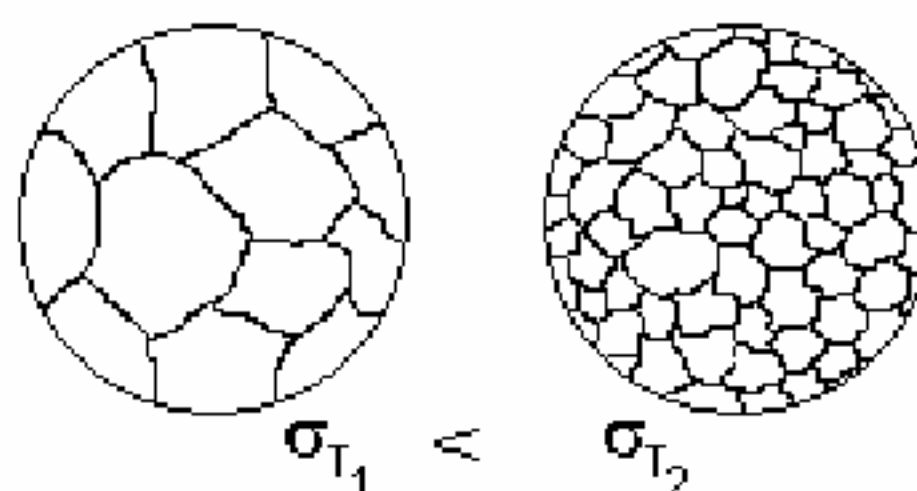


Рисунок 1.3 – Упрочнение границами зерен

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

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

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

3) Упрочнение растворёнными атомами примесей

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

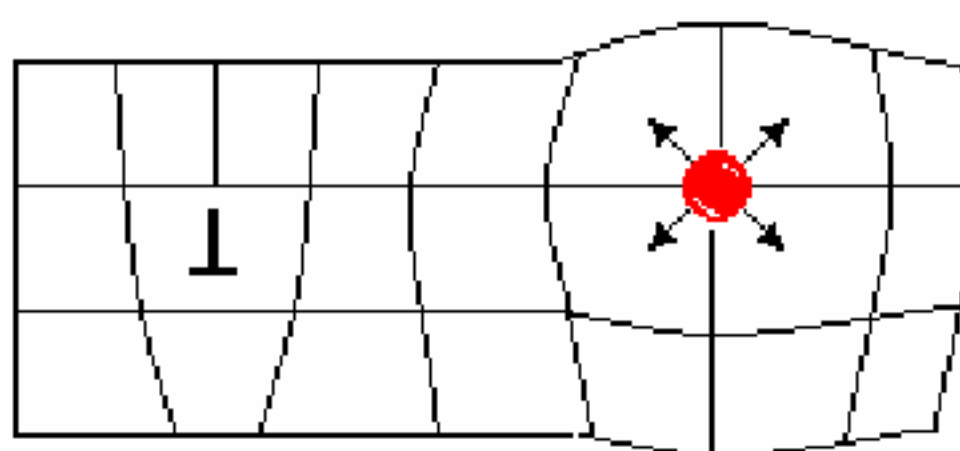


Рисунок 1.4 – Упрочнение твёрдым раствором

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 спла-

вов создаются твёрдые растворы, добиваясь значительного упрочнения.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

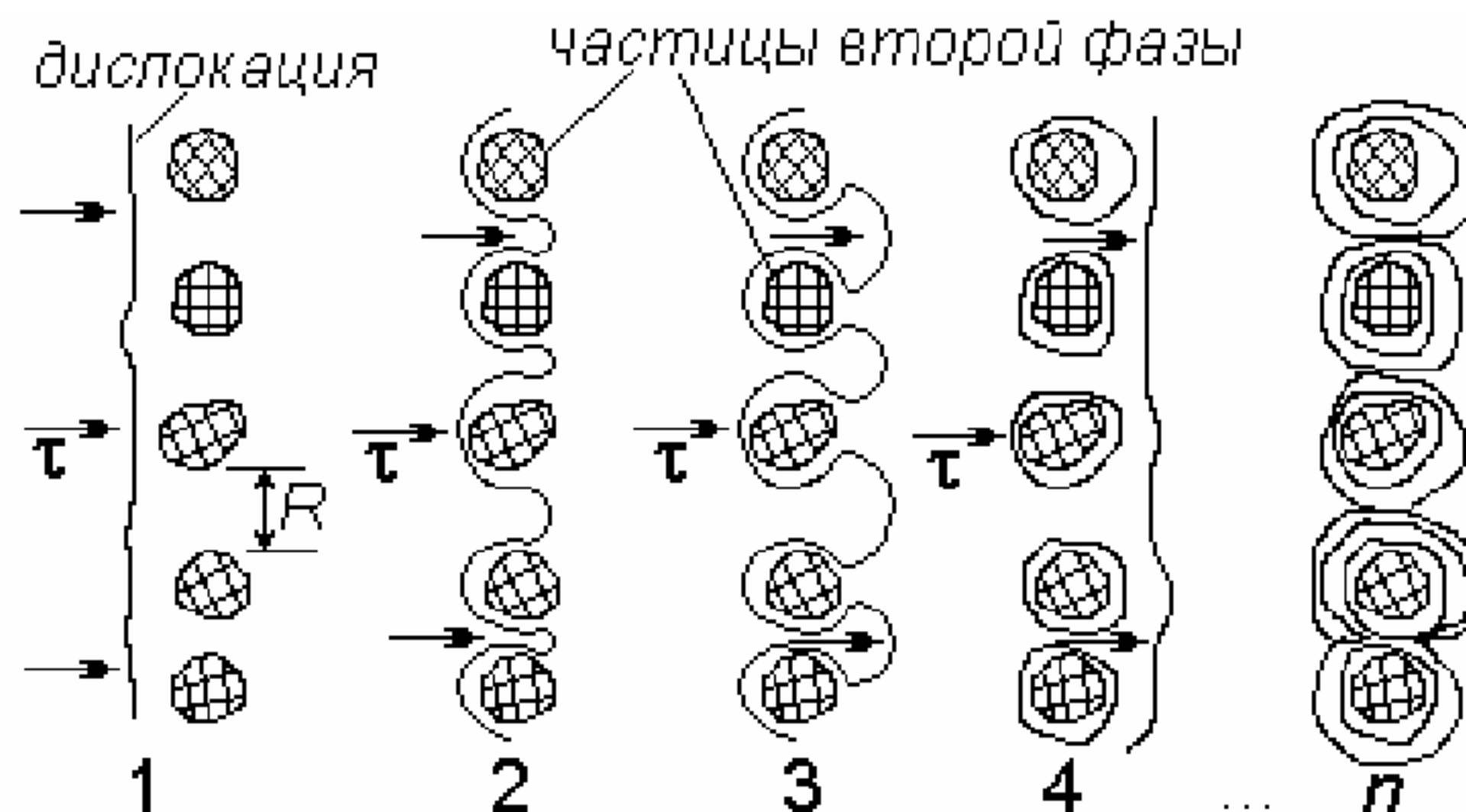


Рисунок 1.5 – Упрочнение дисперсными частицами второй фазы

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

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 окиси тория.

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

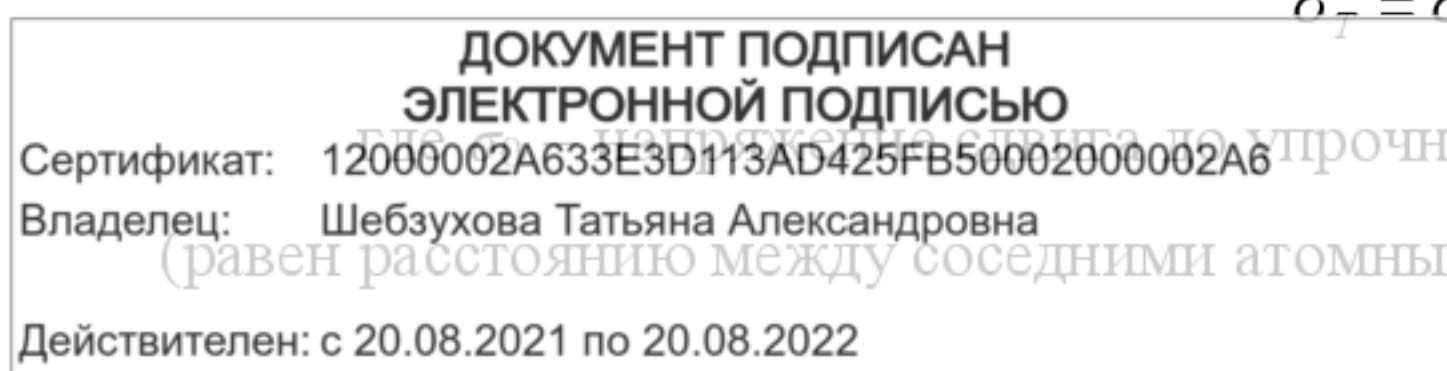
$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho},$$

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 ,
алюми-	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
		0,352	0,3	73

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Практическая работа №2. Диаграммы состояния сплавов

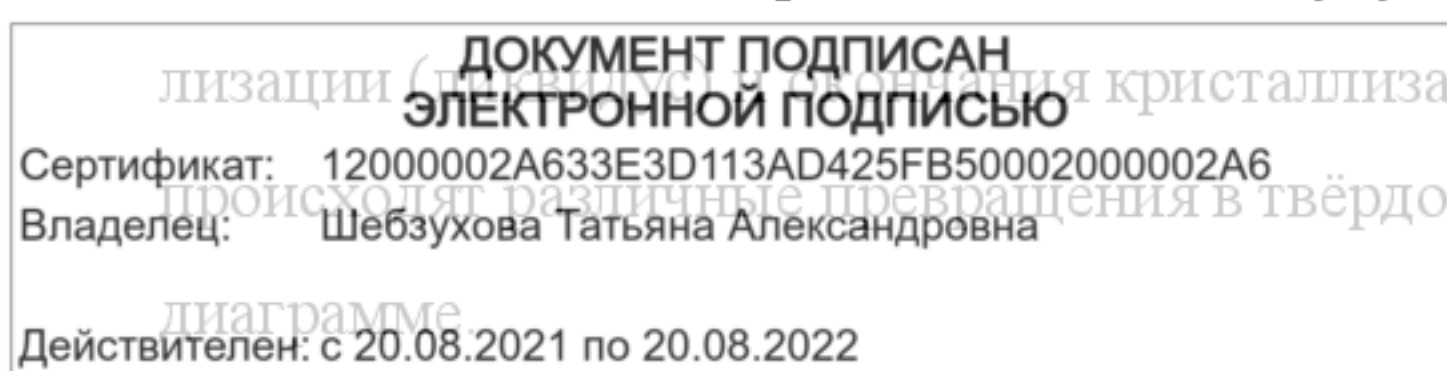
Цель: Изучить основные разновидности диаграмм состояния двойных сплавов; научиться анализировать диаграммы состояния: определять температуры начала и окончания плавления сплавов, находить области равновесного существования твёрдых растворов, обосновывать возможность проведения упрочняющей термической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

Основы теории:

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 кристал-

лизации (температура начала 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:

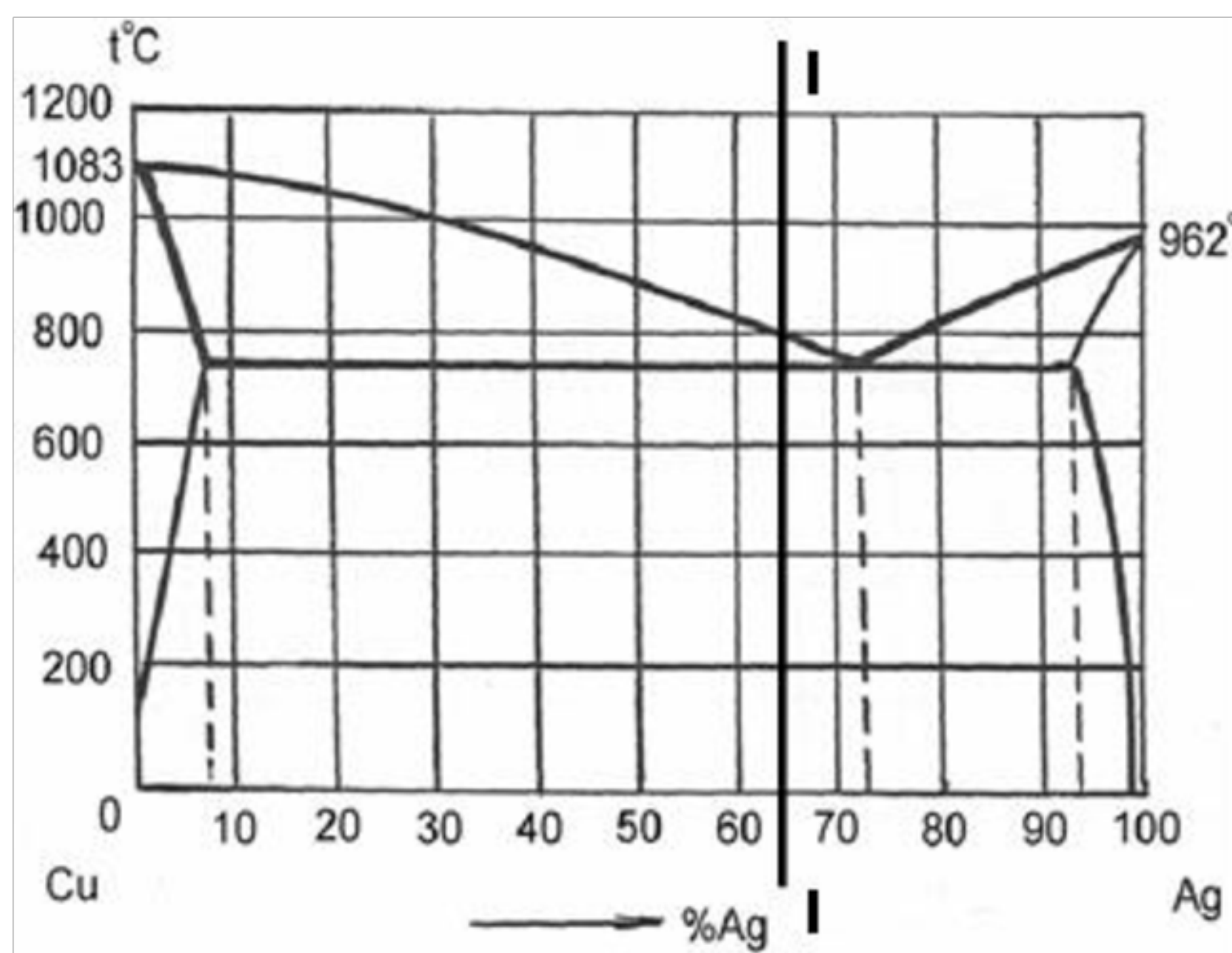


Рисунок 2.1 – Диаграмма медь-серебро

- 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) ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

рычага (отрезков), для сплава, содержащего 30% Ag, концентрация Ag в жидкой фазе при 900 °C 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:

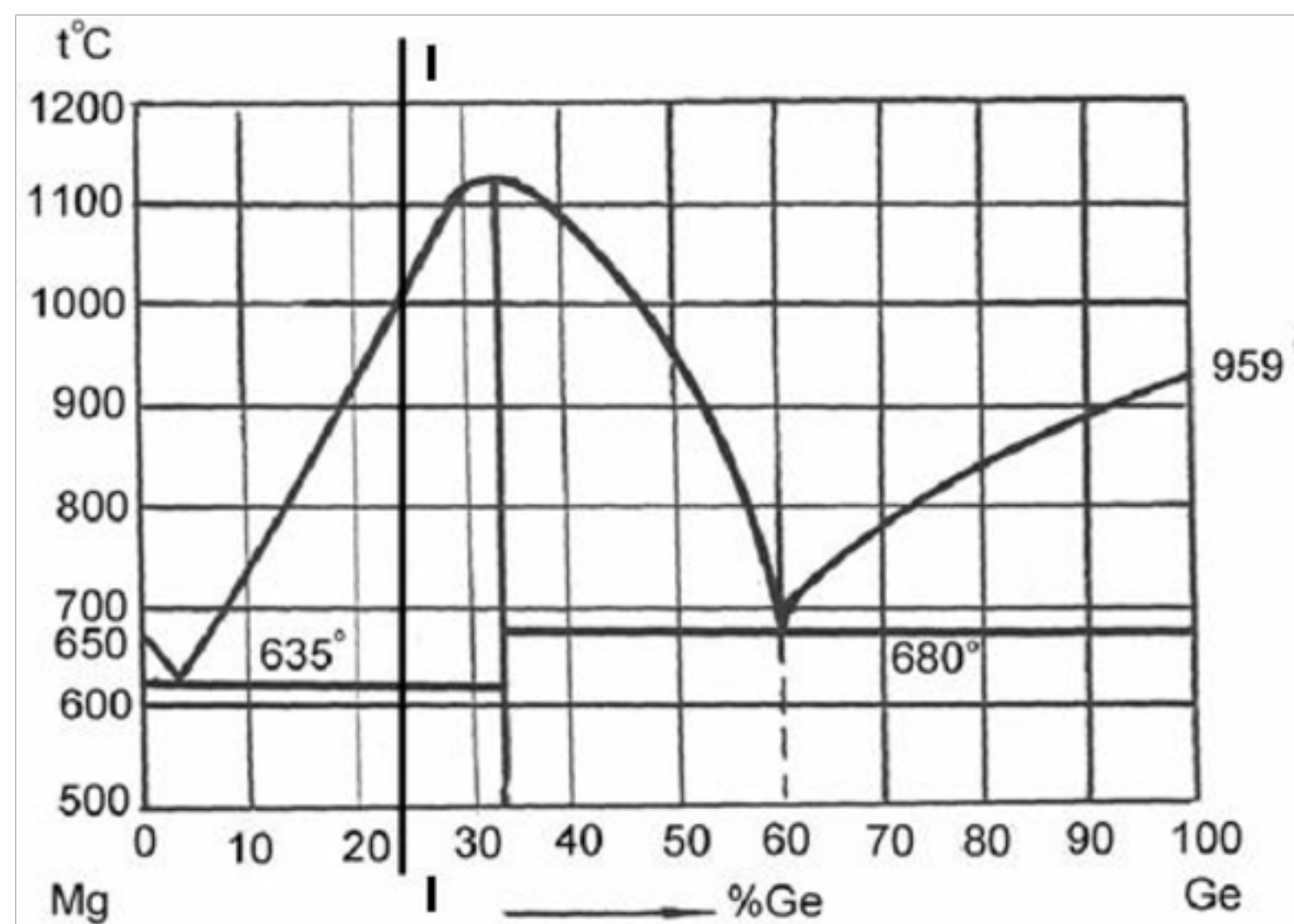


Рисунок 2.2 – Диаграмма магний германий

- 1) Установить тип диаграммы состояния.
- 2) Каков физический смысл температур 650, 1110 и 959 °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 80 % Ge, концентрацию Ge в жидкой фазе при 800 °C и отношение масс жидкой и твердой фаз.

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

Практическая работа №3. 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.

Основы теории:

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).

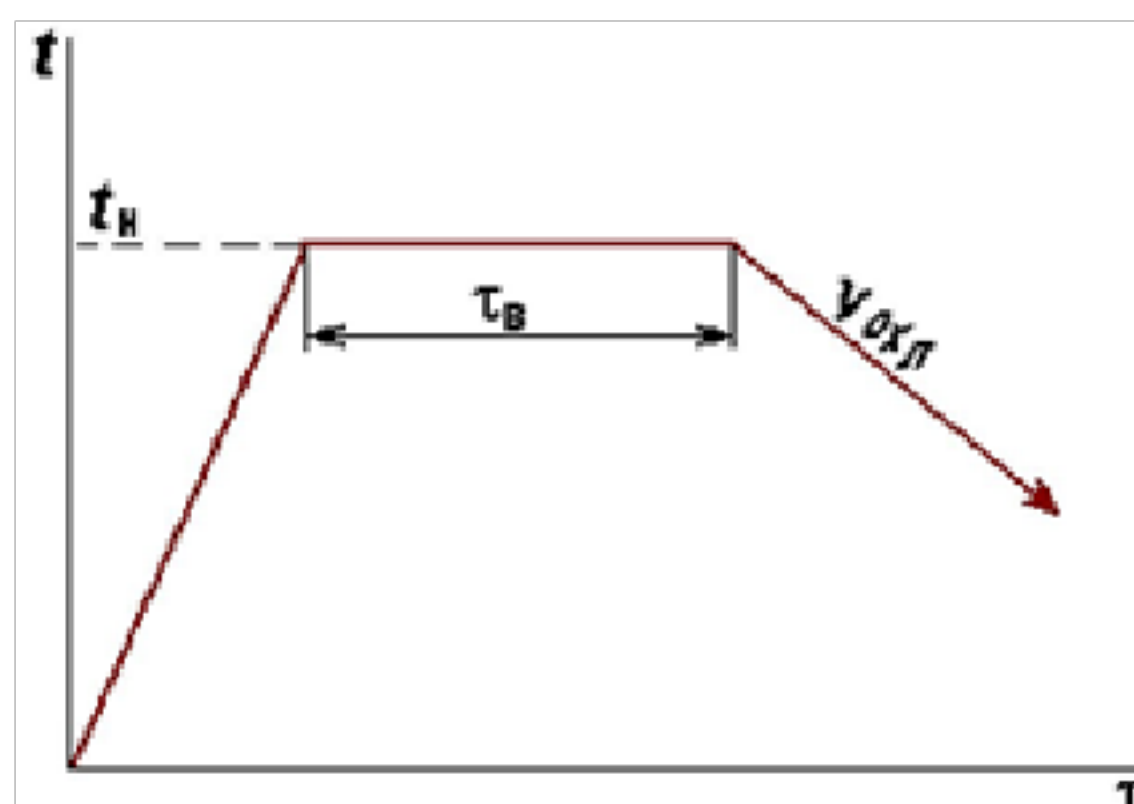


Рисунок 3.1 – Графическое изображение режима термической обработки

Различают упрочняющую термическую обработку, при которой повышаются твердость, прочность и износостойкость, и разупрочняющую обработку, повышающую пластические свойства и вязкость, но снижающую твердость 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 изменения структуры стали в результате закалки. Получаемый при закалке

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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.

Преобразования при нагреве стали

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

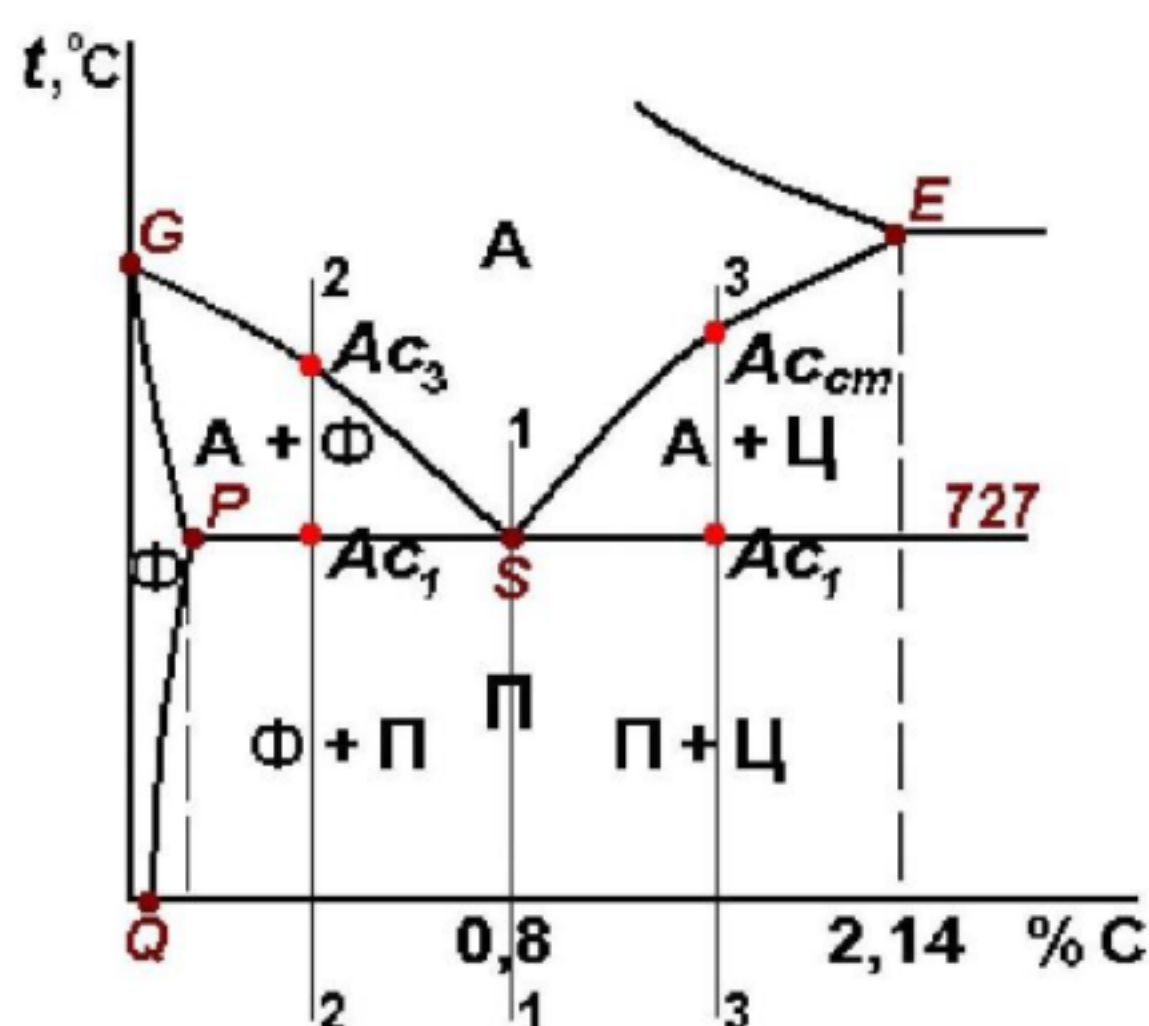


Рисунок 3.2 – Критические точки при нагреве стали

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).

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Полный отжиг доэвтектоидных (конструкционных) сталей выполняется с целью

полной фазовой перекристаллизации.

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

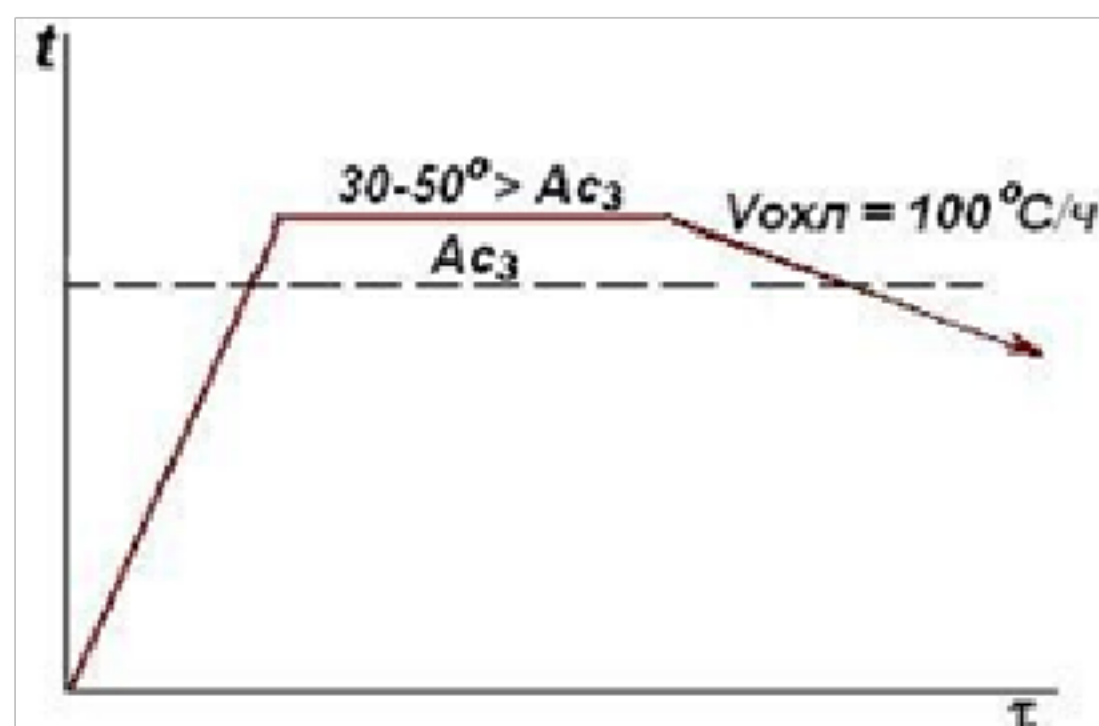


Рисунок 3.3 – Режим полного отжига

Практически детали охлаждаются вместе с печью со скоростью 30–100 C/ч (рис. 3.3). При нагревании феррит и перлит доэвтектоидной стали превращаются в аустенит. Затем, при медленном охлаждении, распад аустенита происходит в верхней части C-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.

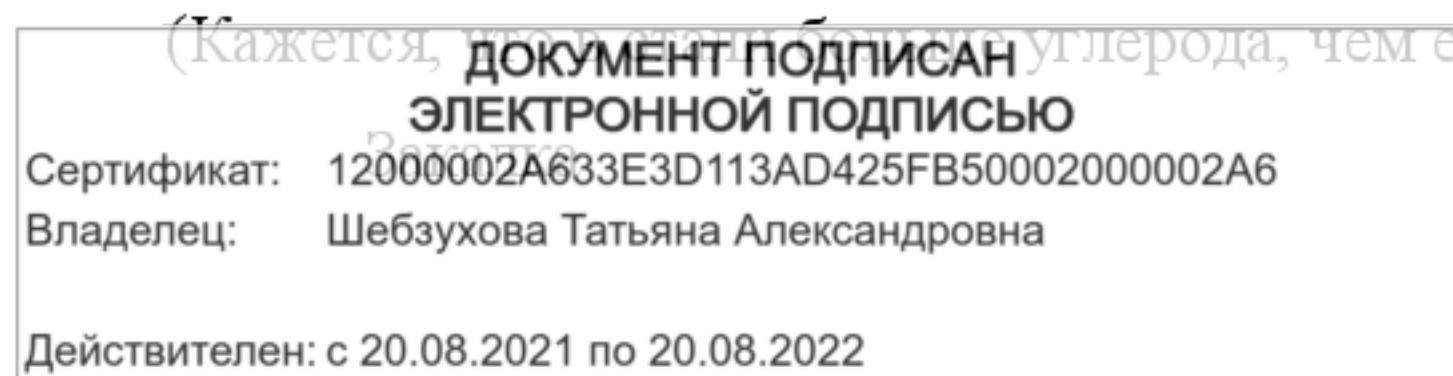
Нормализация заключается в нагреве стали до температур на 50–70 C выше линии GSE и в охлаждении на воздухе после небольшой выдержки. В этом случае распад аустенита происходит в верхней части C-образной диаграммы, но при несколько меньших температурах, чем при отжиге. Это связано с более быстрым охлаждением.

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 – 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.

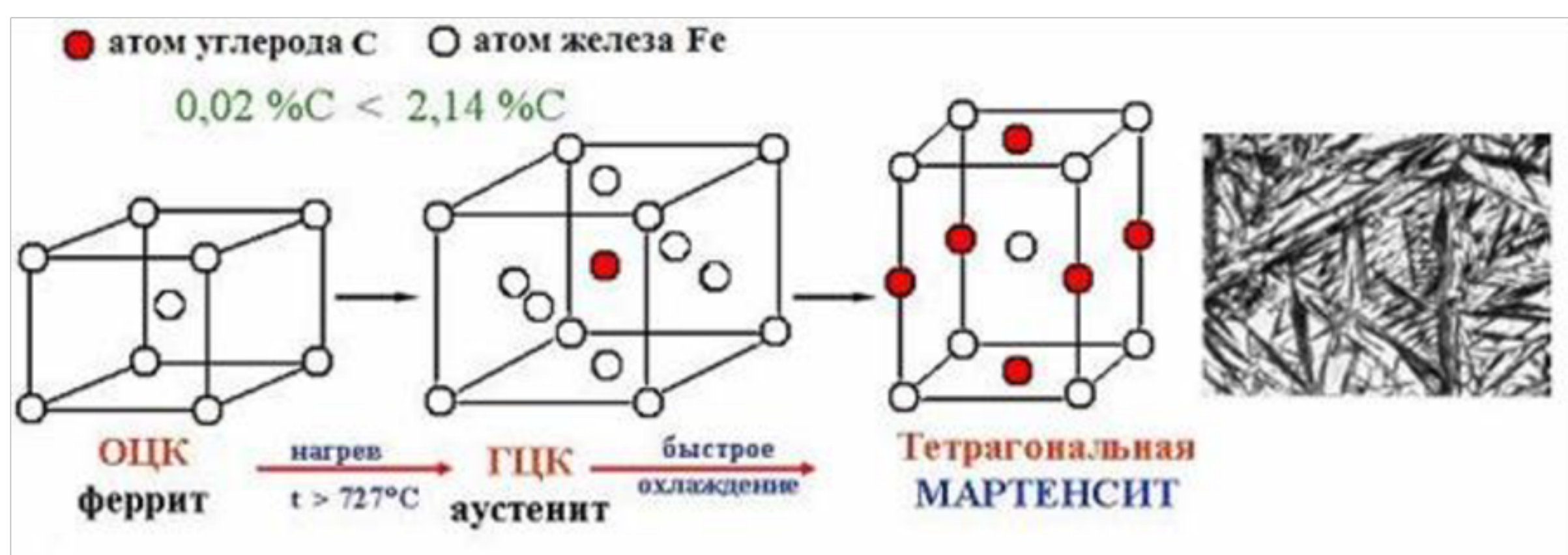


Рисунок 3.6 – Схема образования структуры, закаленной стали – мартенсита

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

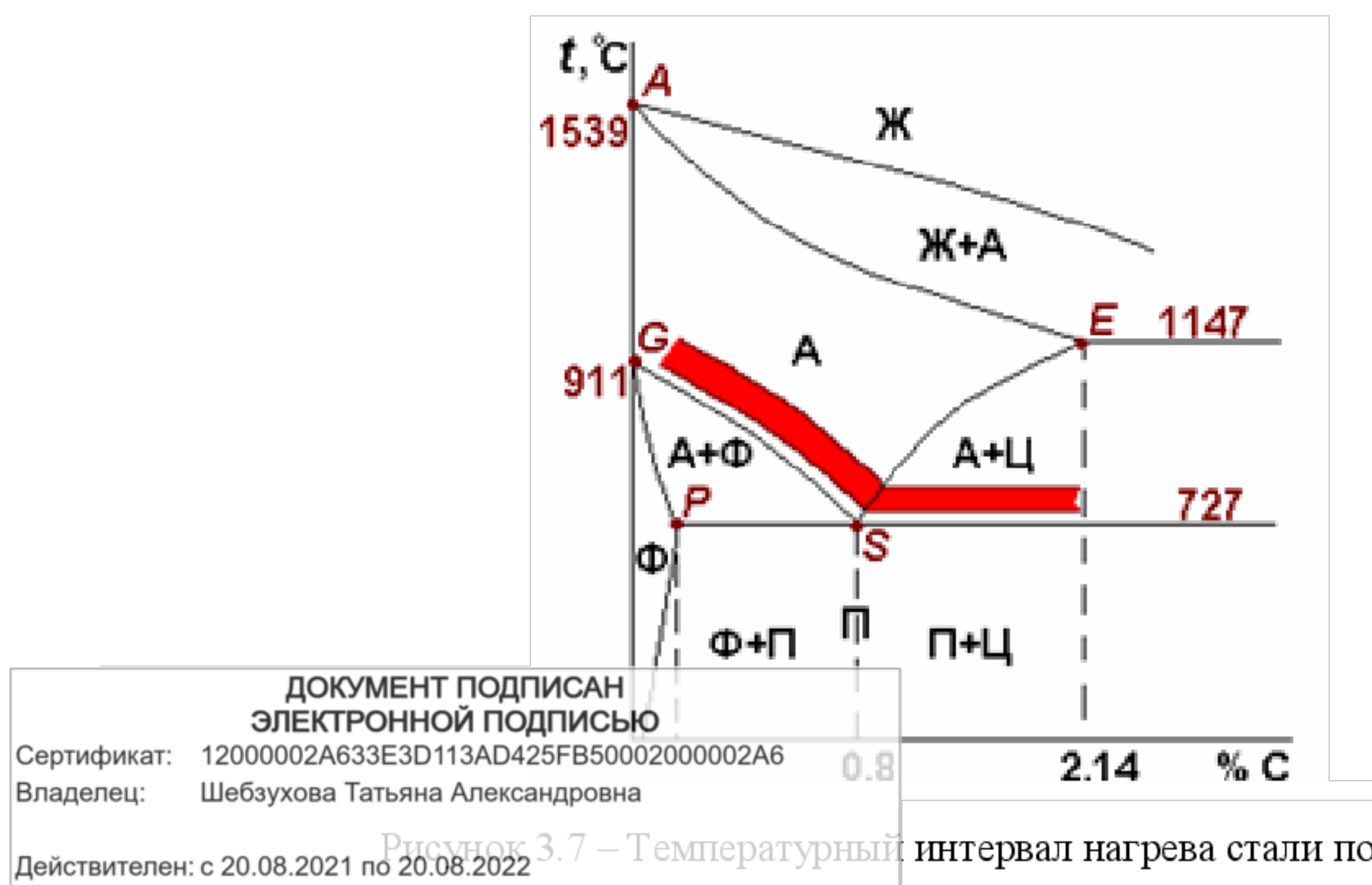


Рисунок 3.7 – Температурный интервал нагрева стали под закалку

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.

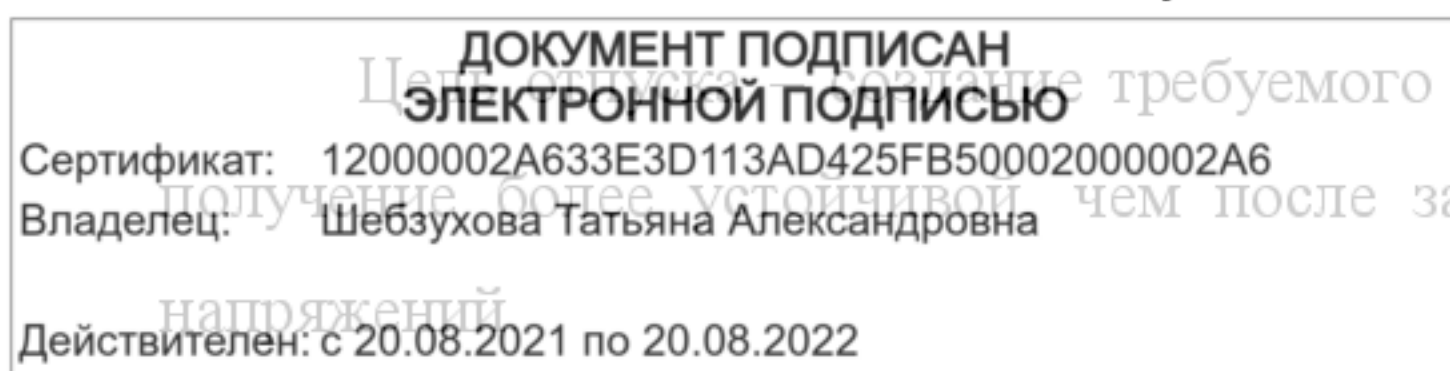
Закалка из однофазной (аустенитной) области, с температур выше A_{c3} , называется полной. Так закалывают доэвтектоидные (конструкционные) стали.

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.



получение более устойчивой 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, твердость почти не снижается. Детали могут работать в условиях, где необходима высокая твердость и износостойкость.

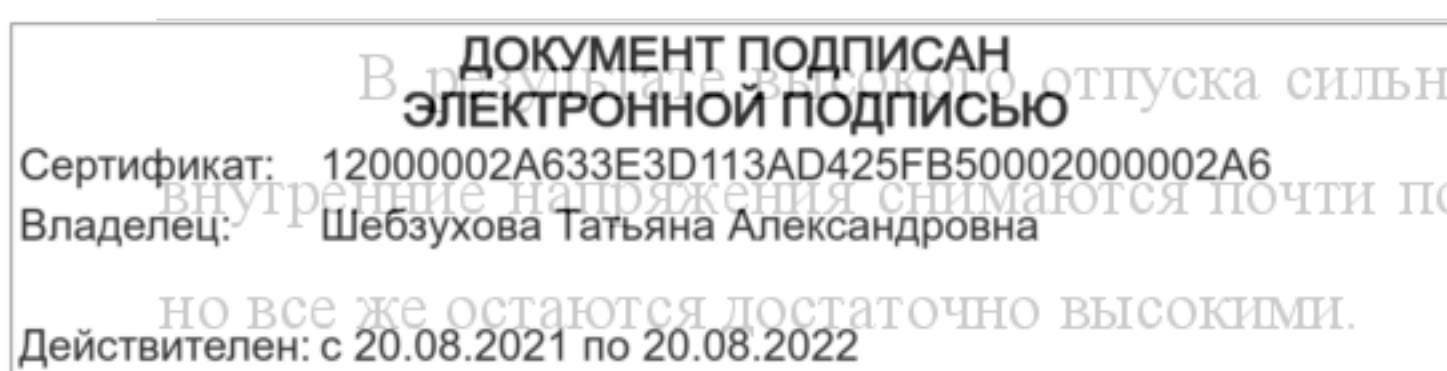
Низкий отпуск применяют для режущего и мерительного инструмента, деталей подшипников качения.

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, зернами цементита. Такой отпуск называется высокотемпературным (или высоким); получаемая структура – сорбит отпуска.

В процессе *высокого отпуска* сильно возрастают вязкость и пластичность стали, внутренние напряжения снимаются почти полностью, твердость 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 прогреться 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 закалки 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.

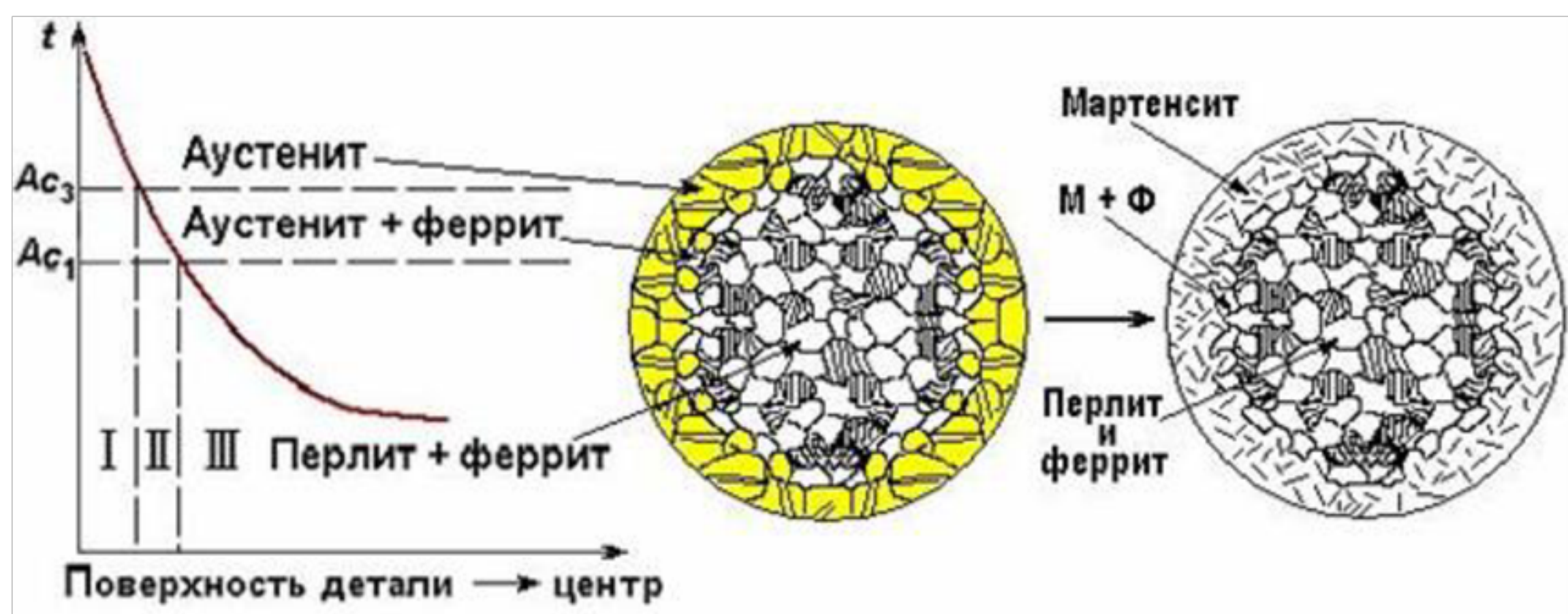


Рисунок 3.8 – Поверхностная закалка стали

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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

После поверхностной закалки 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 (закалка 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 закалка должна сопровождаться низким отпускком.

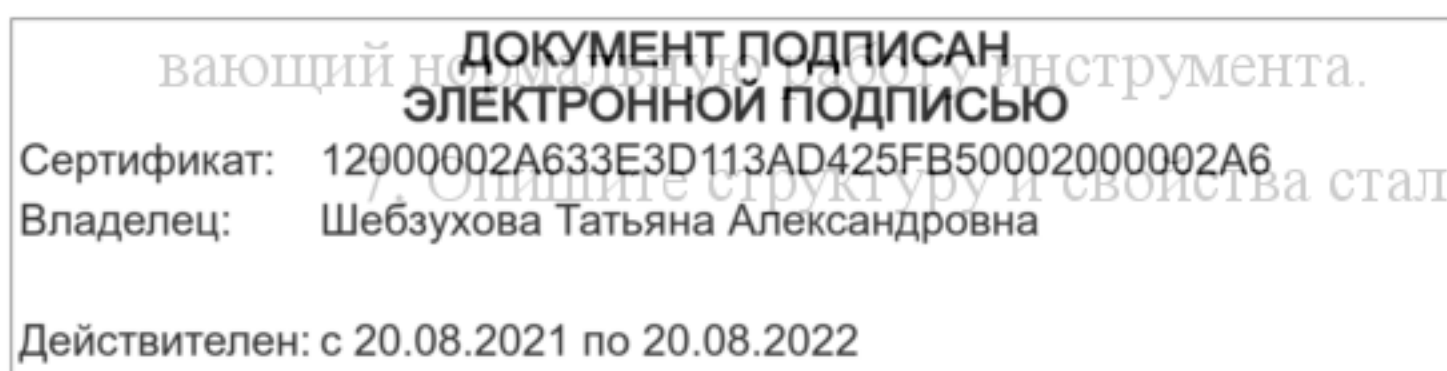
Чем выше частота внешнего переменного магнитного поля, тем тоньше слой, в котором сосредоточены вихревые токи. Поэтому глубина закалённого слоя может легко регулироваться и составляет от десятых долей миллиметра до 3–5 мм. Операцию закалки ТВЧ можно полностью автоматизировать. Способ очень производительный; 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, обеспечи-



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 закали, охлаждающую среду и температуру отпуска) 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 закали для стали 30.

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

12. После закали 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 закали.

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

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

16. Какому режиму следует отдать предпочтение и почему?

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

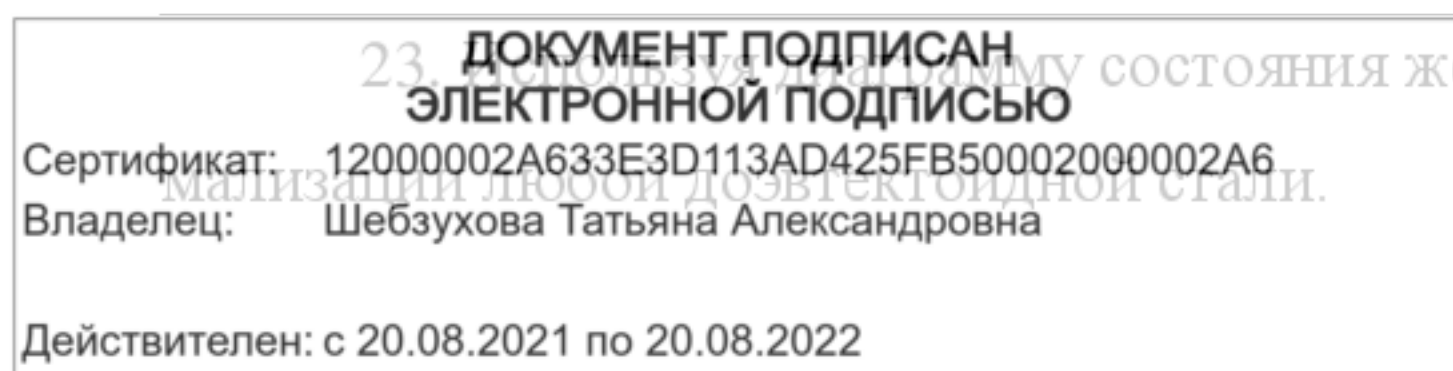
18. Используя диаграмму состояния железо – карбид железа и учитывая превращения, происходящие в этих сталях при отпуске, укажите температуру закали и температуру отпуска для каждой стали.

19. Опишите превращения, происходящие в этих сталях в процессе закали 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?



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 твердости. 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 твердость 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 0С.

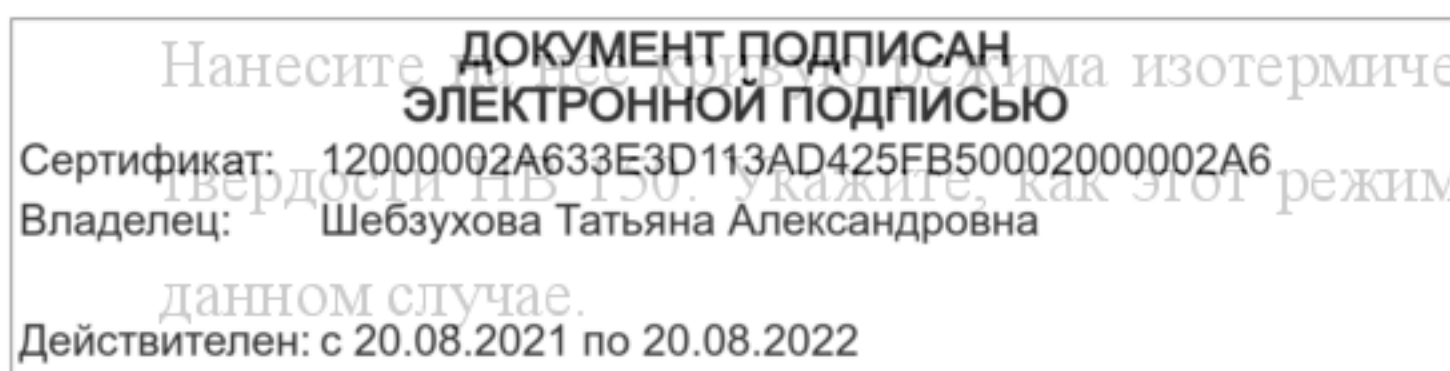
35. Нанесите выбранные температуры нагрева на диаграмму состояния железо – цементит, и объясните, какая из этих шестерен имеет более высокую твердость и лучшие эксплуатационные свойства и почему.

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 диаграмму режимы изотермической обработки, обеспечивающей получение твердости ТВ 150. укажите, как этот режим называется, и какая структура получается в



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 твердость, 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.

Практическая работа №4. 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.

Основы теории:

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 $3,5 \text{ г/см}^3$. К ним относятся алюминий Al ($\gamma = 2,7 \text{ г/см}^3$), магний Mg ($\gamma = 1,74 \text{ г/см}^3$), бериллий Be ($\gamma = 1,82 \text{ г/см}^3$). 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, $a = 0,4041 \text{ нм}$. Полиморфных превращений алюминий не имеет. Температура плавления – 660°C . Чистый отожжённый алюминий непрочен: $\sigma_B = 50\text{--}60 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 15\text{--}20 \text{ МПа}$, твёрдость $20\text{--}25 \text{ НВ}$, зато пластичность у него высокая: удлинение при разрыве составляет $30\text{--}50 \%$, относительное сужение – $80\text{--}95 \%$.

Чистый алюминий применяют в электротехнике для изготовления проводников тока, его электропроводимость $37,6 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$. Он уступает только серебру с проводимостью $63,0 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$ и меди – $60,1 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$. 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 Al_2O_3 . Чем чище металл, тем выше его коррозионная стойкость.

Алюминий допускает глубокую вытяжку, хорошо сваривается газовой и контактной

сваркой, пластично обрабатывается резанием, имеет низкие литейные качества.

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Токоведущие детали изготавливают из алюминия технической чистоты.
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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 АМгЗ (≈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

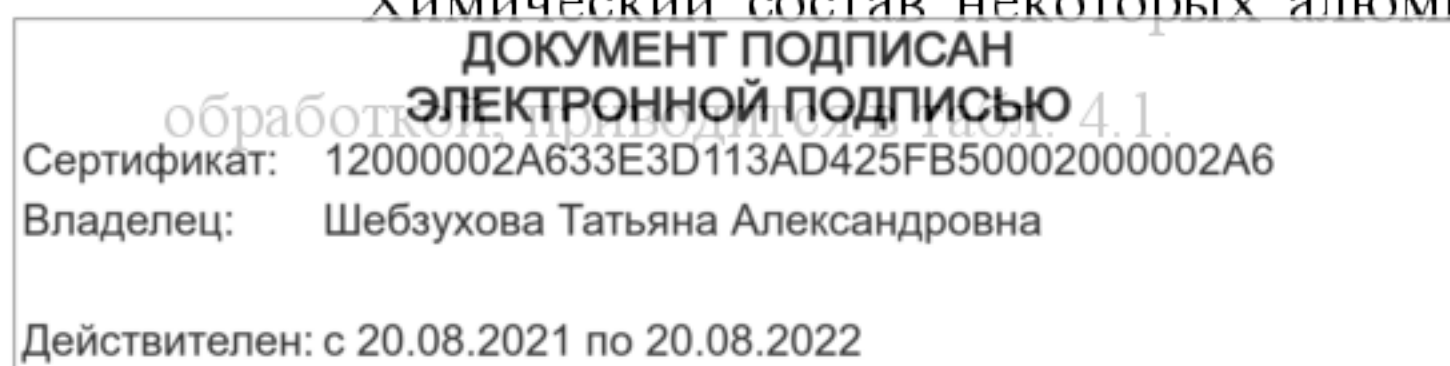


Таблица 4.1 – Химический состав термически упрочняемых алюминиевых сплавов (ГОСТ 4784-97)

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.

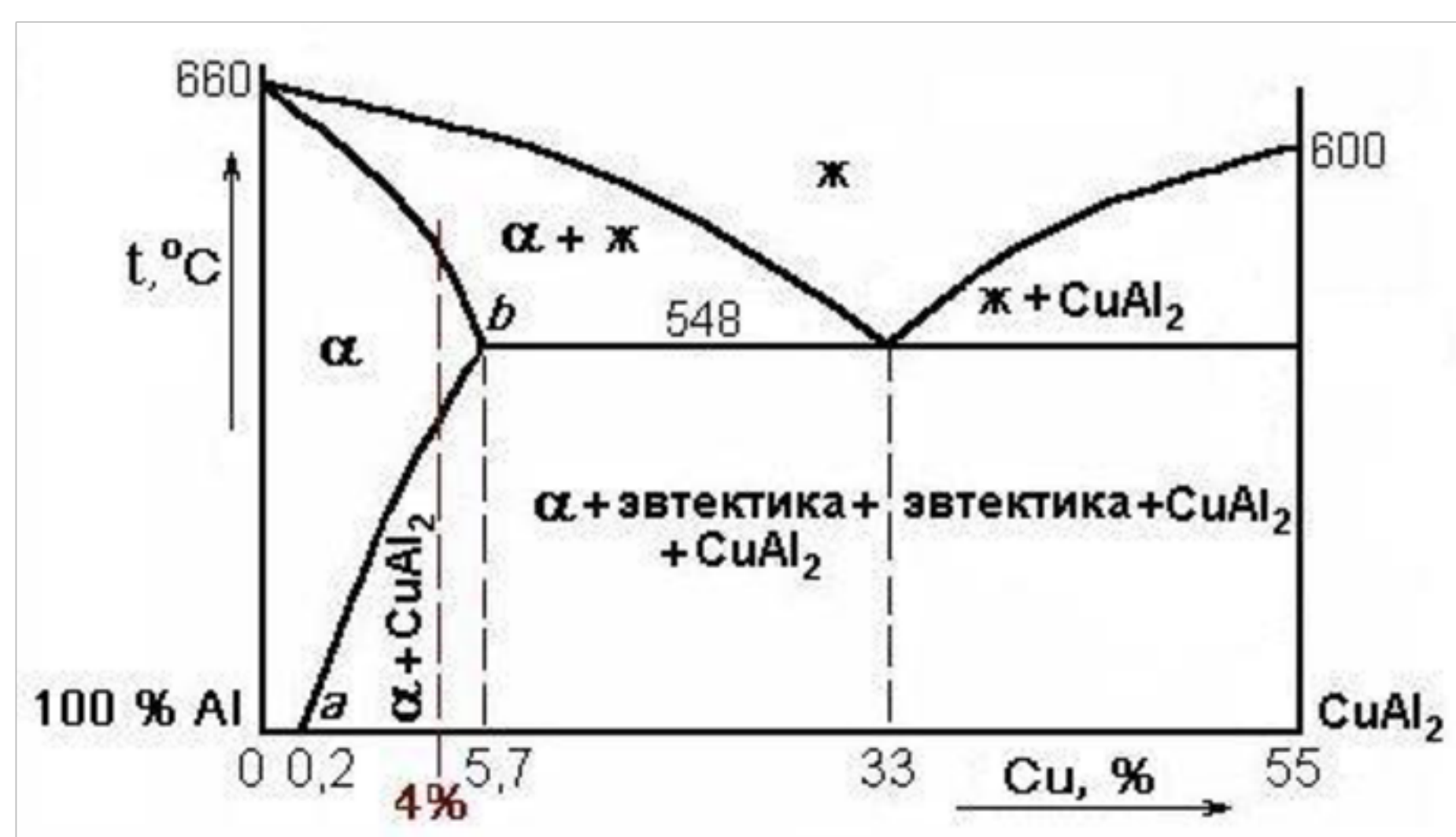


Рисунок 4.1 – Диаграмма состояния алюминий медь

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 CuAl₂. Прочность такого сплава

достигается максимальное растворение меди: выше линии предельной растворимости ab , но ниже солидуса. При этом химическое соединение растворяется, и образуется однородный твёрдый раствор 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, близкие к эвтектике, по составу к эвтектике, например: Al_2 , Al_4 .

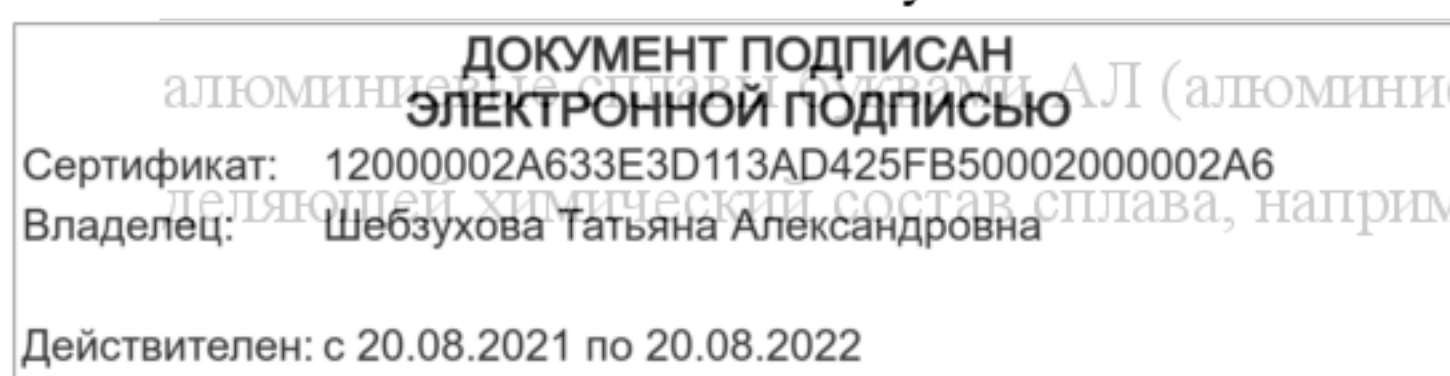
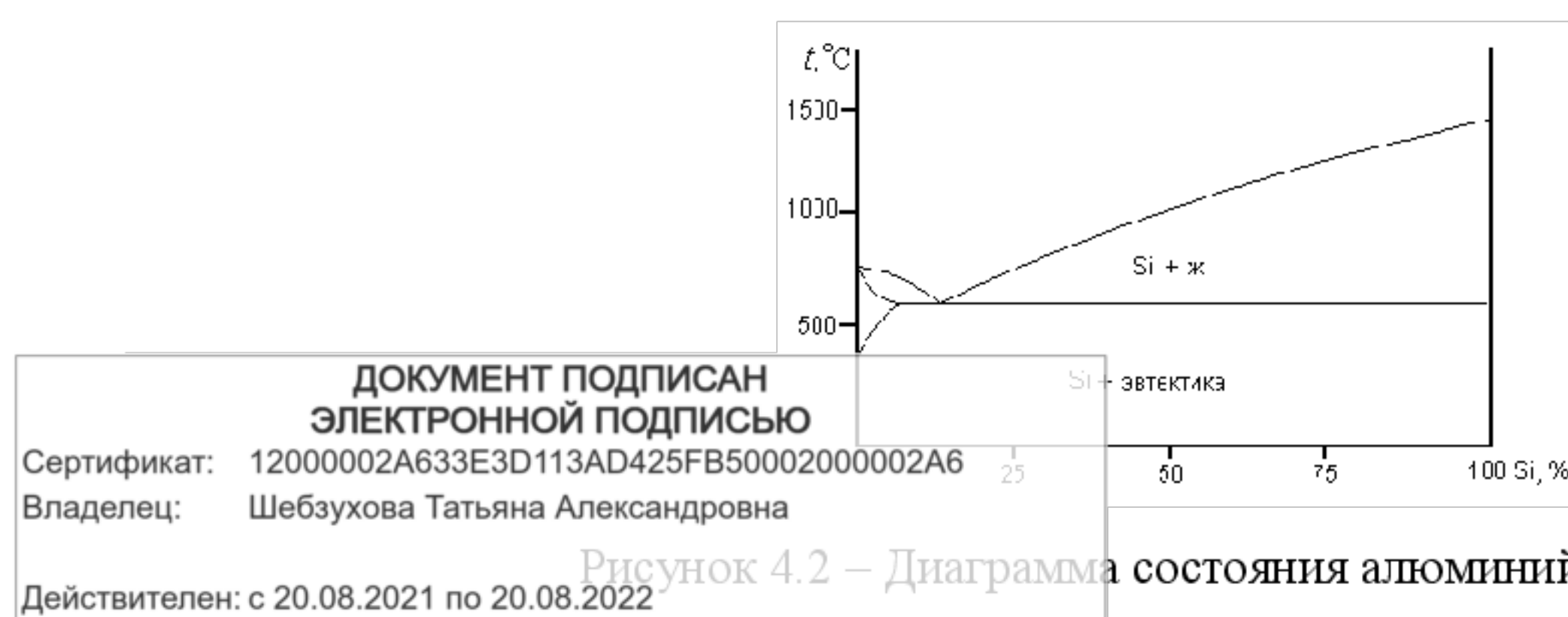


Таблица 4.2 – Механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов

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



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 светлорозового до красного. Медь имеет гранецентрированную кубическую решётку с параметром $a = 0,361$ нм. Полиморфных превращений у меди нет; температура плавления $1083\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 %.

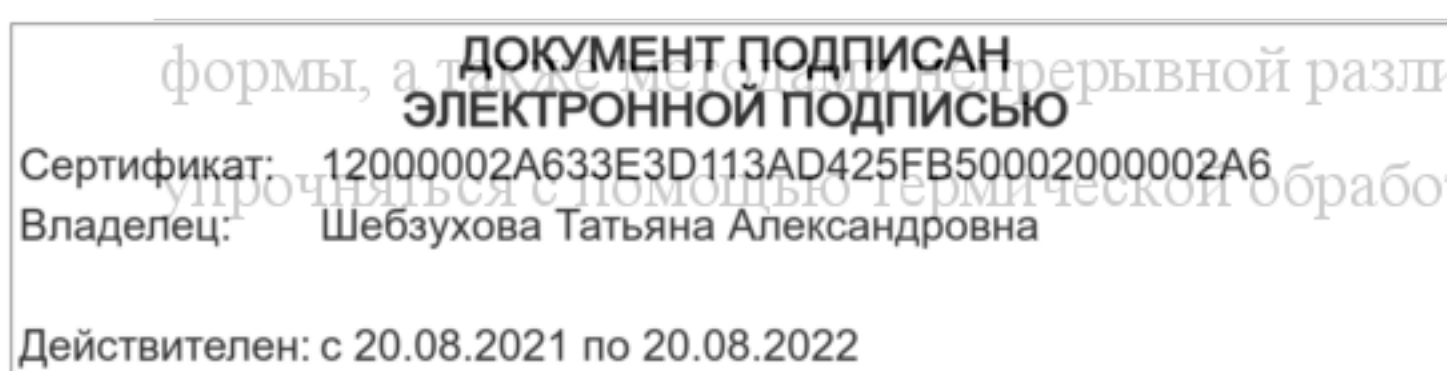
Главными отличительными характеристиками меди являются высокая теплопроводность и электропроводимость, пластичность и коррозионная стойкость. Но так же, как и у алюминия, примеси отрицательно влияют на свойства меди. В зависимости от содержания примесей различают следующие марки меди (ГОСТ 859–78): М00 (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 $326\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 возрасти 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 в виде 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	HB
	% (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
ЛК80-5-4	57-60	5–4 Si	310	200	58	55	0,4	100

ЛК80-ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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.

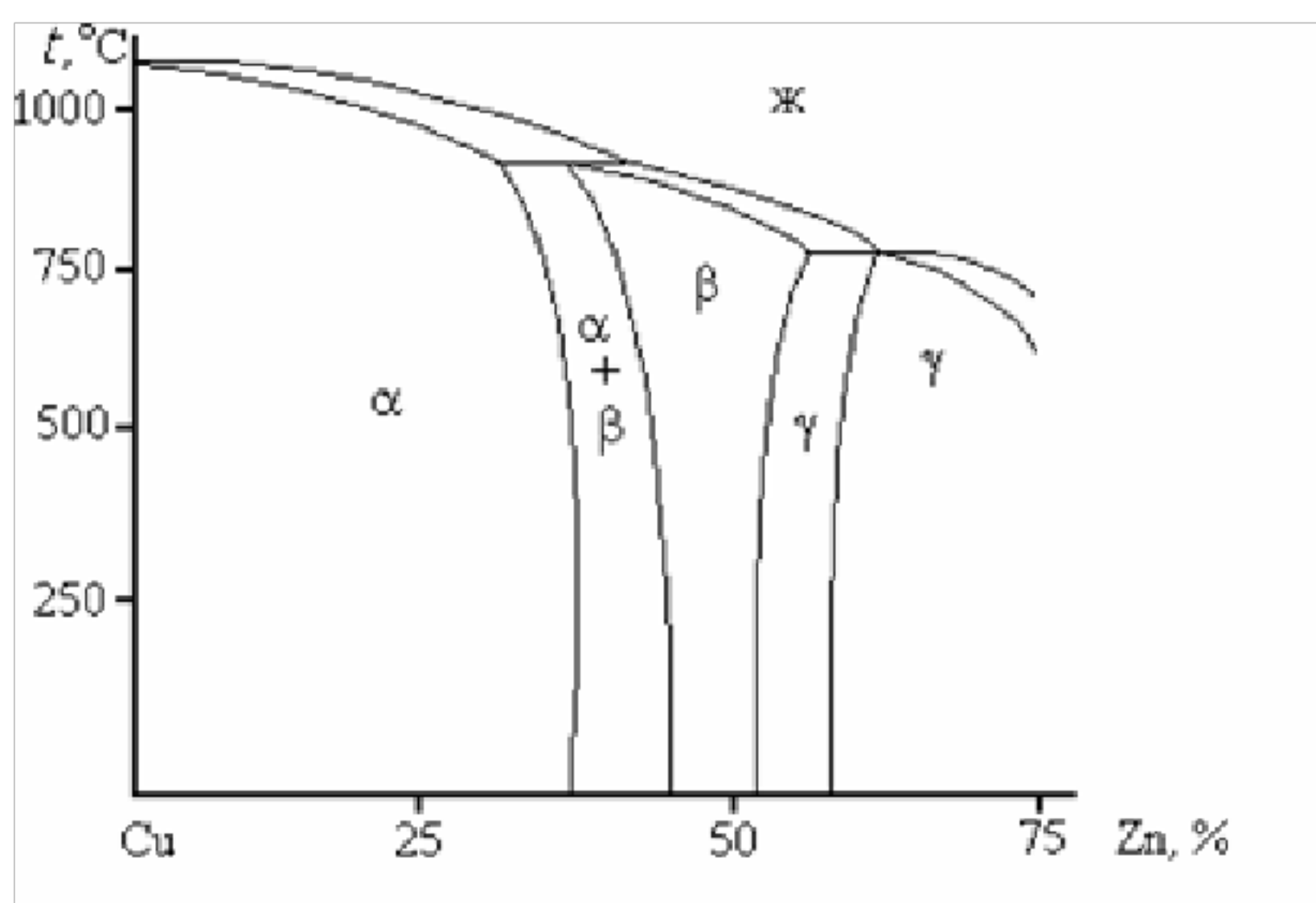


Рисунок 4.3 – Диаграмма состояния медь-цинк

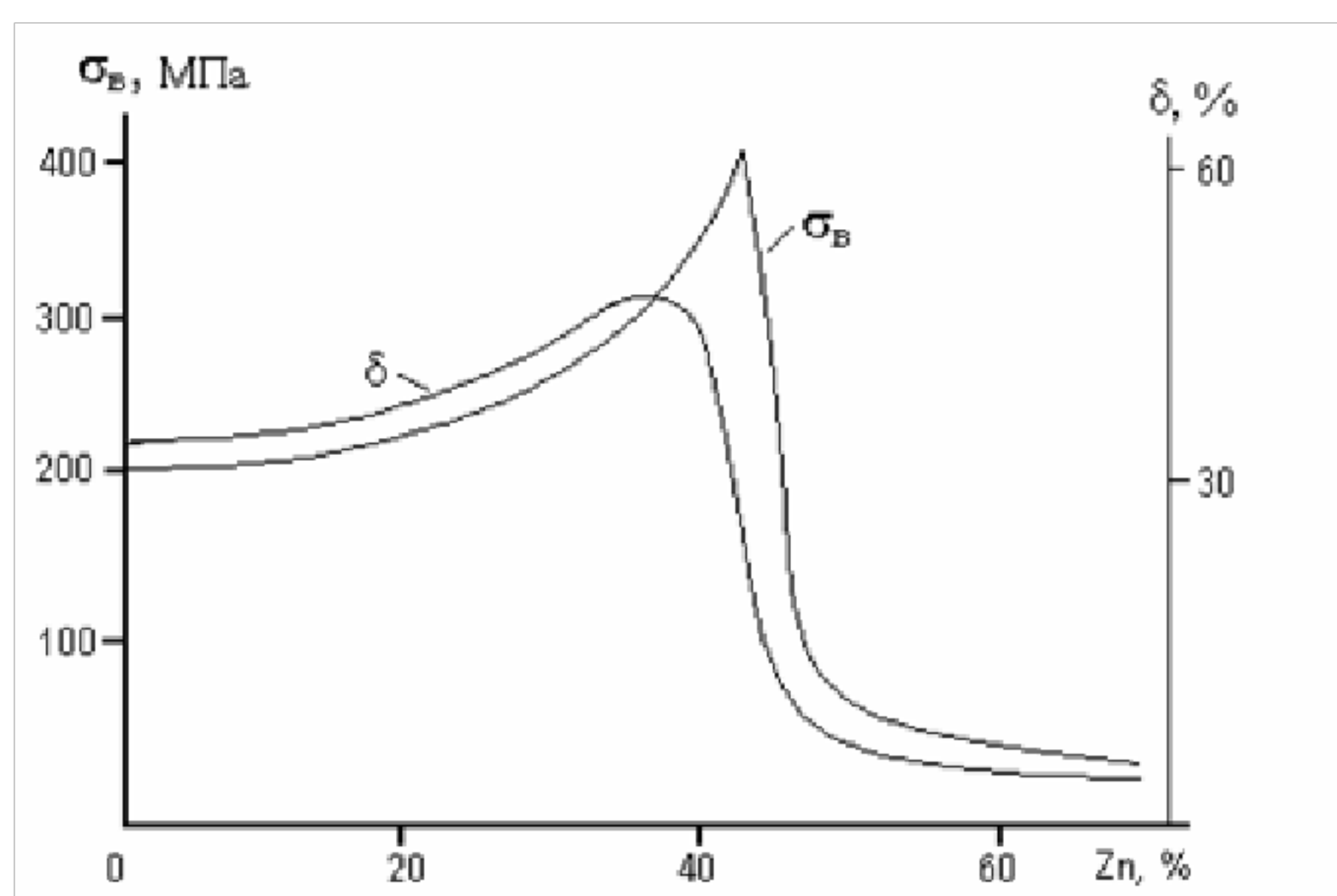


Рисунок 4.4 – Влияние цинка на механические свойства меди

Однофазная латунь представляет собой материал относительно невысокой твёрдости и прочности, обладающий значительной пластичностью. При переходе за предел насы-

щения (39,8%) появляется вторая фаза β – электронное соединение CuZn , что сопровождается повышением прочности и твёрдости. Это объясняется тем, что β -фаза является твёрдой и хрупкой, поэтому при увеличении ее количества

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 120000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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 кор-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

однофазную структуру твёрдого раствора. После холодной обработки давлением бронзы подвергают отжигу при 600–700 °С. Они пластичны

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, $\delta = 60\%$).

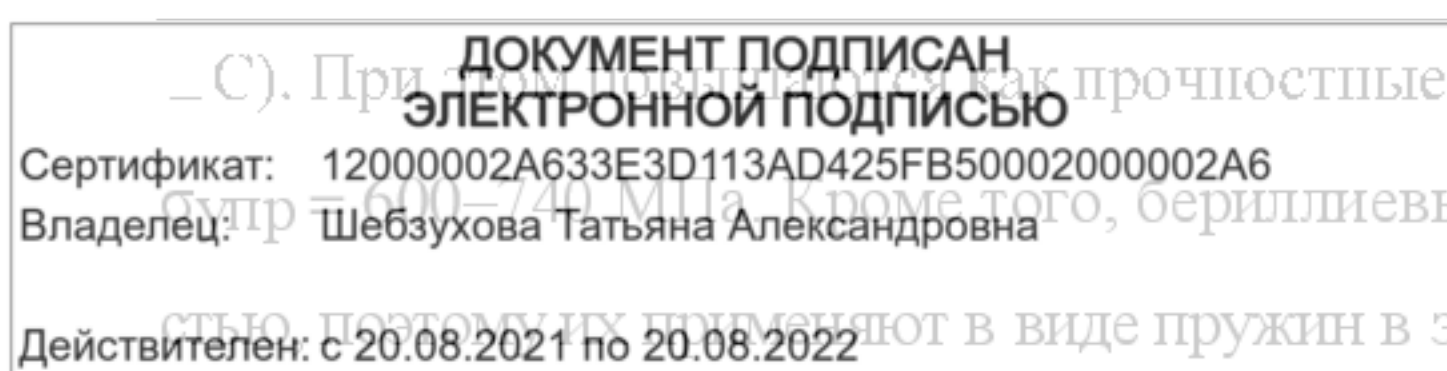
Легируют алюминиевые бронзы железом, никелем, марганцем для устранения литейных недостатков и увеличения механических свойств после упрочняющей термической обработки (закалки и последующего старения). Например, у бронзы БрАЖН 10-4-4 твердость увеличивается от 140–160 НВ до 400 НВ. Поэтому из алюминий-железоникелевых 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 (закалки от 780 °С и старения при 320

°С). При этом бронзы приобретают как прочностные, так и упругие свойства: $\sigma_B = 1300\text{--}1500$ МПа, $\delta = 600\text{--}740$ МПа. Кроме того, бериллиевые бронзы обладают высокой электропроводностью, 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

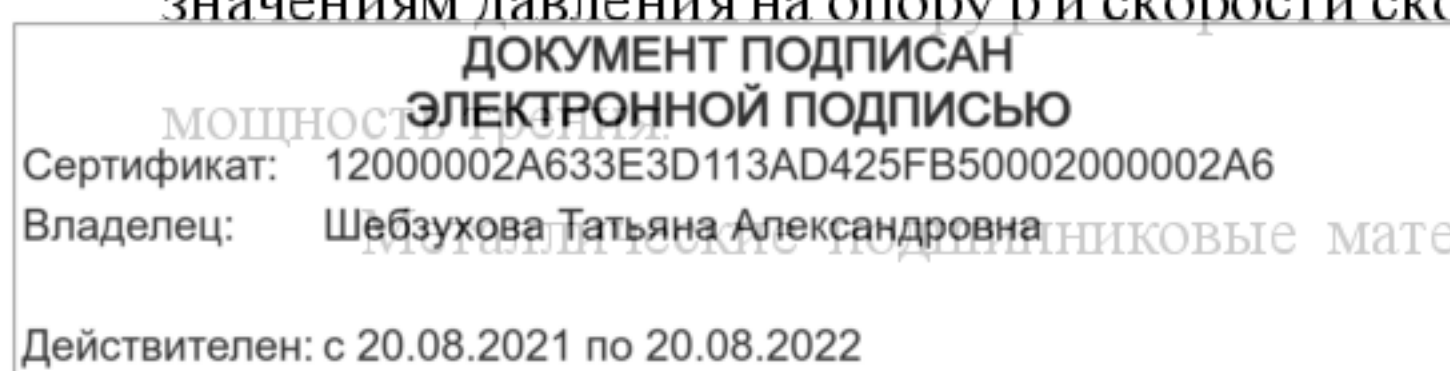
Бронза	Содержание элементов, %				σ_B	σ_{02}	δ , %
	Sn	Pb	Zn	Прочие	МПа		
Деформируемые бронзы							
БрОЦС4-4-2,5	3–5	1,5–3,5	3–5	–	350	130	40
БрОФ6,5-0,4	6–7	–	–	0,26–0,4 Р	400	250	60–70
БрАЖН10-4-4				0,1–0,2 Ni; 9,5–11 Al	750–		
(закалка и старе-	–	–	–	3,5–5,5 Fe	830	–	9–15
БрБНТ1,9				1,85–2,1 Be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



Антифрикционные 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 $p\upsilon = (500–700) \cdot 10^5$ 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	НВ	Коэффициент трения по стали		Допустимый режим работы		
		Без смазочно- го материала	Со смазочным материалом	p , МПа	υ , м/с	$p\upsilon$, 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
Бронза						
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ						
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6						
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна						
БрО5Ц5С5						
БрС30						
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022						
			0,004–0,009	15	10	15
				8	3	12
				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)

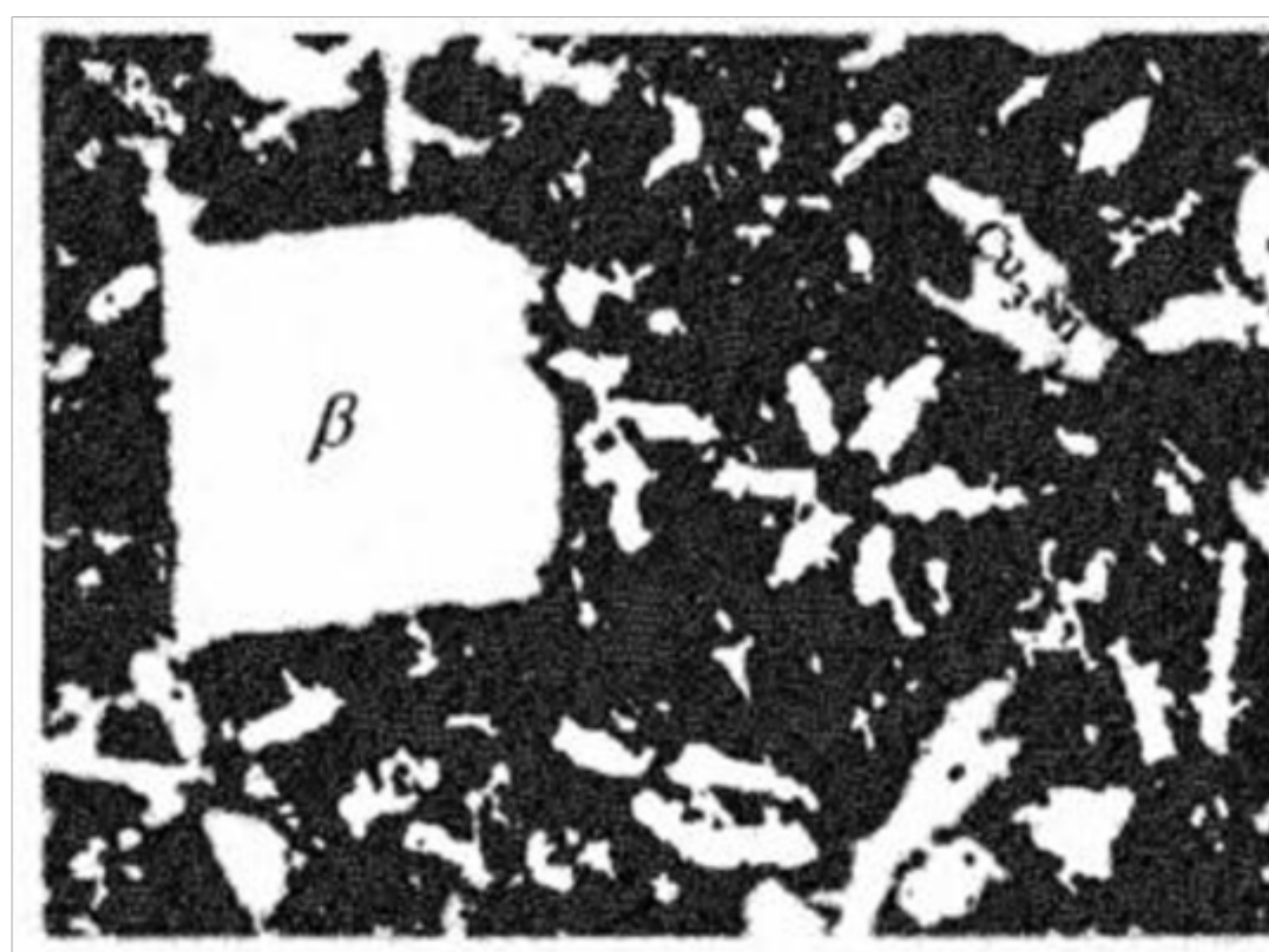


Рисунок 4.5 – Микроструктура баббита Б86.х400

В последнее время бронзы широко используются как компоненты порошковых антифрикционных материалов или тонкостенных пористых покрытий, пропитанных твердыми 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 % Pb (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 граничной скорости скольжения на поверхности образуется тонкая плёнка этих мягких легкоплавких металлов, защищая шейку стального вала от повреждения.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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.

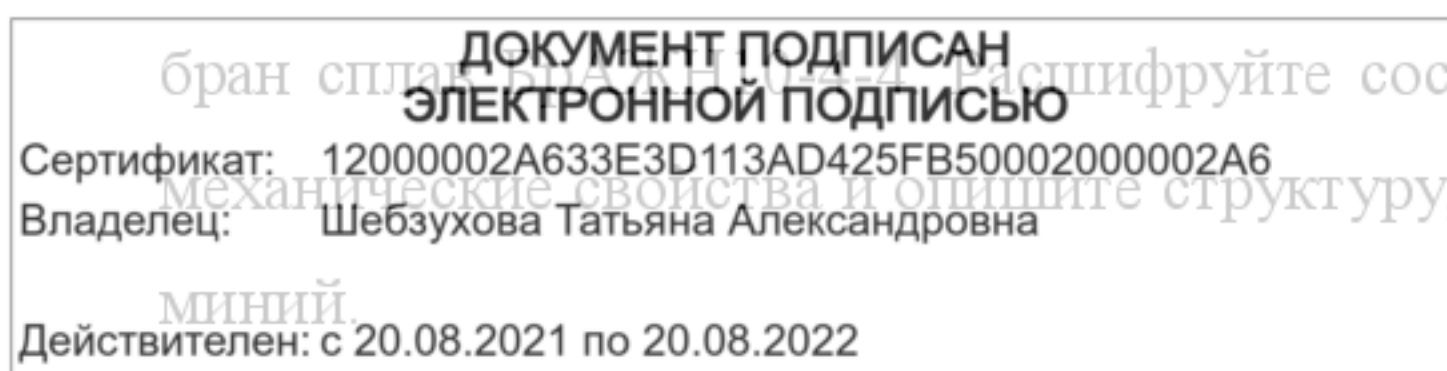
В настоящее время наибольшее распространение получили многослойные подшипники, в состав которых входят многие из рассмотренных выше сплавов. Сплавы или чистые металлы в них уложены слоями, каждый из которых имеет определённое назначение.

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) вы-



брав сплав, укажите режим термической обработки, используя диаграмму состояния медь – алю-

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.

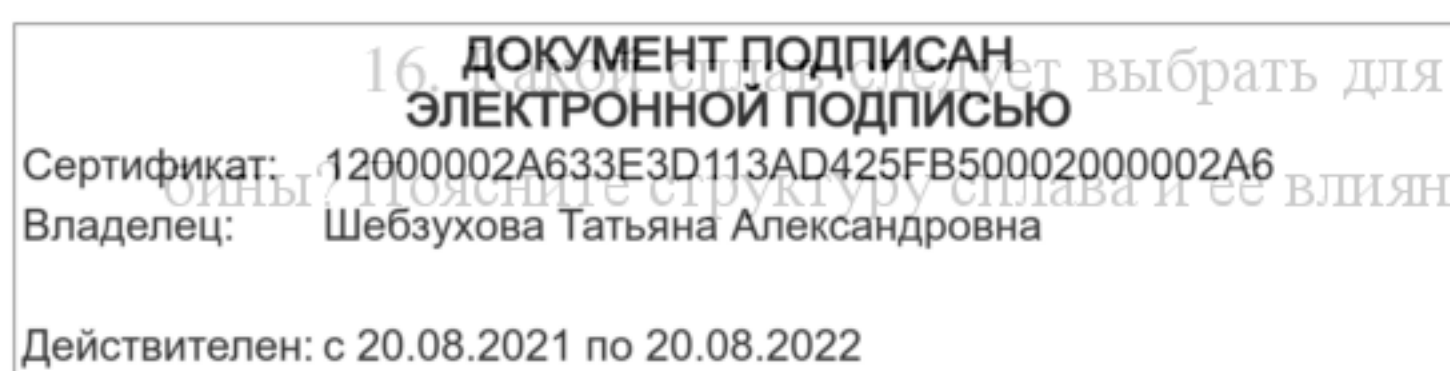
11. Для деталей пароводяной арматуры выбрана бронза БрО5Ц5С5. Расшифруйте состав сплава, опишите структуру и объясните назначение легирующих элементов. Приведите характеристики механических свойств.

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.



Практическая работа №5. Расчет опорно-стержневого изолятора наружной установки

Цель: Познакомиться с конструкцией и основами расчета опорных стержневых изоляторов.

Основы теории:

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;

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

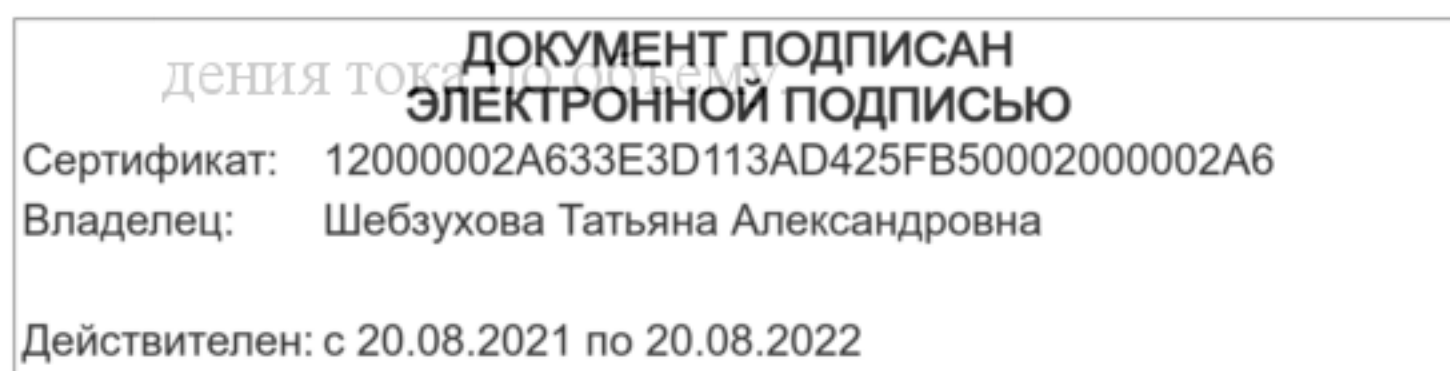
Последовательность расчета изоляторов

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 прохож-



Длину электрода (фланца), соприкасающегося с поверхностью, рас-считать по диа-метру А. Помнить, что объемное электрическое сопротивление зависит от удельного объ-емного сопротивления и размеров изолятора (ρ_v , S, h), а поверхностное сопротивление зависит от удельного поверхностного сопротивления, длины окружности стержня, сопри-касающегося с электродом, и высоты стержня - изолятора (ρ_s , b, H).

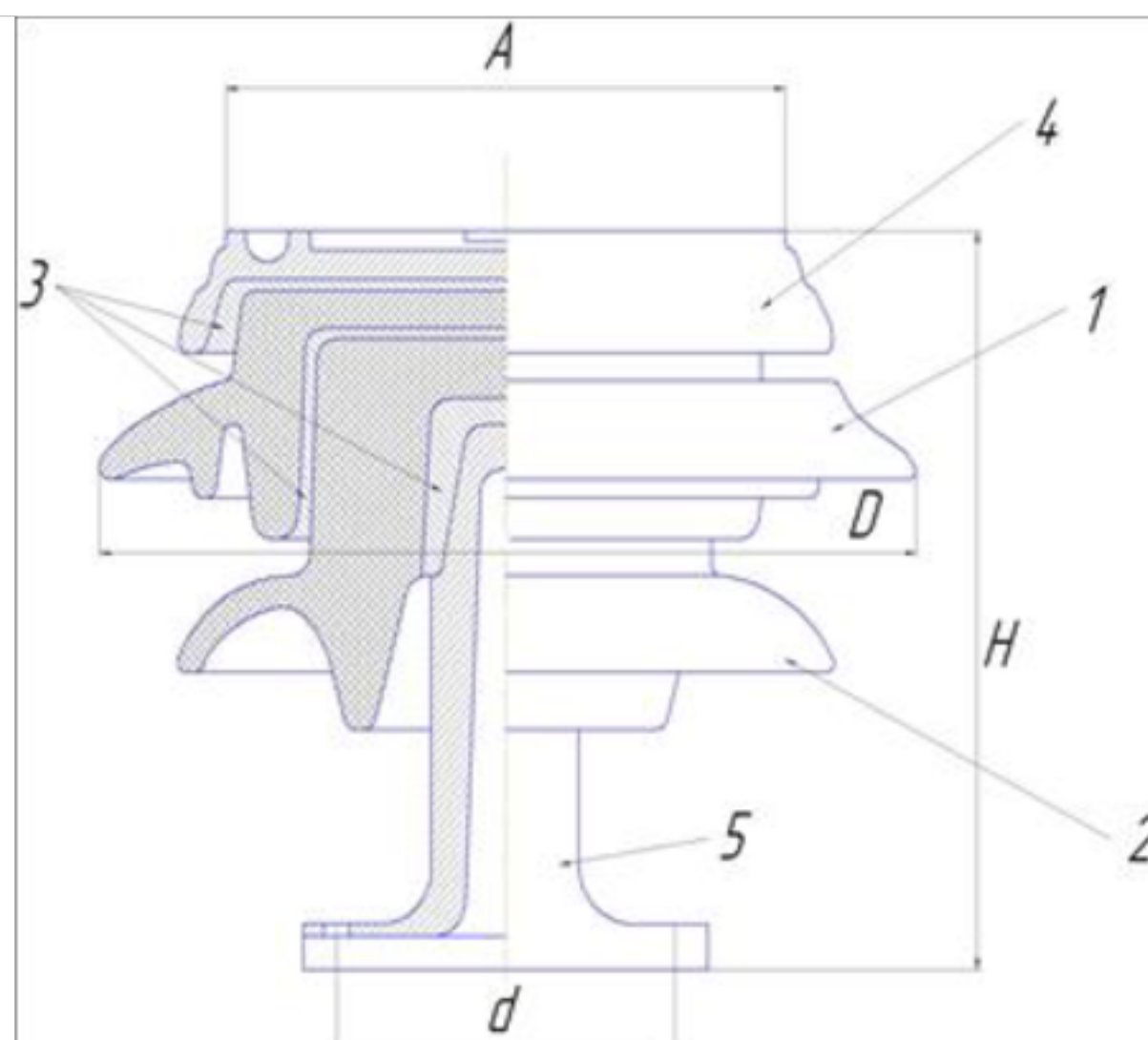


Рисунок 5.1. Опорно-стержневой изолятор наружной установки:

- 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 напряже-нием, следует определять по наименьшему диаметру стержня А, а расстояние между элек-тродами будет равно высоте стержня h. Формулой пользоваться для расчета емкости обыч-ного конденсатора:

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

где С – ёмкость конденсатора, Ф.

3. Диэлектрические потери в опорном изоляторе складываются из потерь на поляри-

зацию в материале изолятора, обусловленных сквозной проводимостью, то есть это активная мощность, рассеиваемая в изоля-торе, которая вызывает его нагрев Ра:

$$Pa = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg \delta$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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 $\text{tg}\delta$	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

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Практическая работа №6. Расчет свинцового высоковольтного кабеля

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

Основы теории:

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

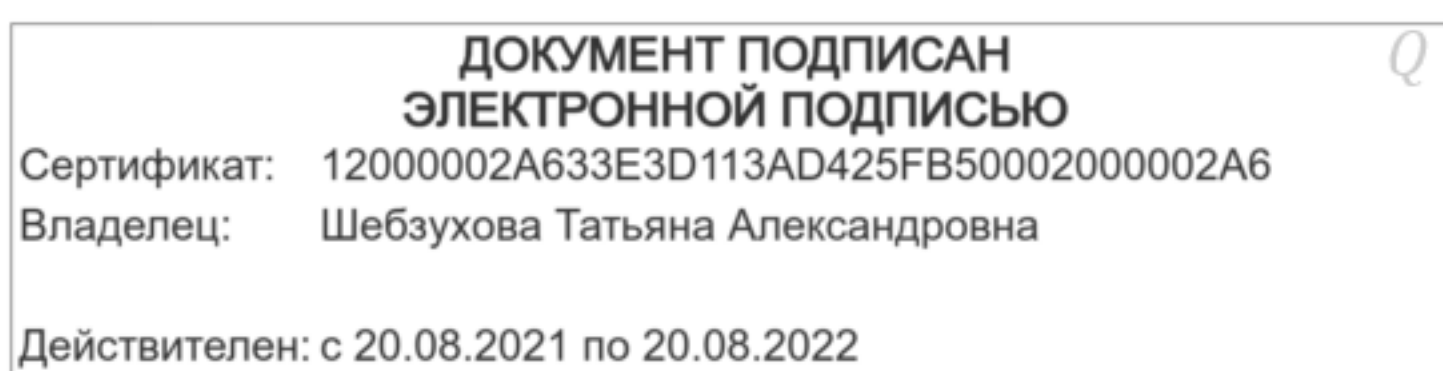
$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln \frac{R}{r}}$$

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

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 изо- ляции d , мм	Диэл. прониц, ϵ	Длина ка- беля l , км	Частота f , Гц
10	70	10	4	18	50

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Практическая работа №7. Расчет питающей линии электрической установки

Цель: Познакомиться с основами расчета питающей линии электрической установки.

Основы теории:

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

$$\frac{W}{t} = I^2 R$$

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 каждую секунду тепла станет равным количеству тепла, выделяемого током. Уравнение теплового баланса имеет следующий вид

$$I^2 R = \sigma S_{\text{п}} \theta_{\text{уст}}$$

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

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

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

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

Плотность тока определяется из выражения

$$\delta = \frac{l}{S}$$

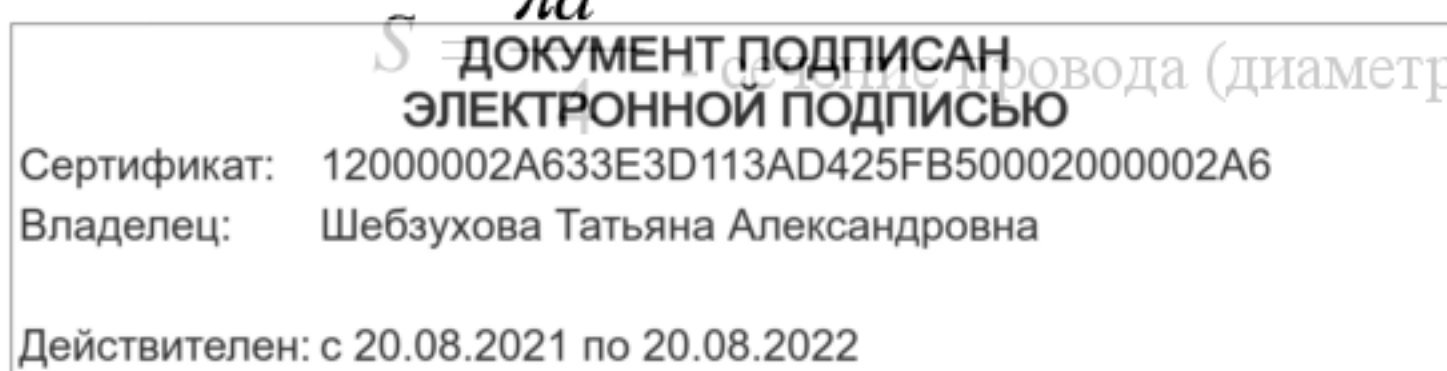
где δ - плотность тока, А/мм

Сопротивление провода:

$$R = \frac{l}{\gamma S}$$

где l - длина провода, м;

$S = \frac{\pi d^2}{4}$ - площадь поперечного сечения провода (диаметра), мм²;



γ - удельная проводимость токоведущей жилы провода (обратная величине удельного сопротивления), $\text{Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$

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

$$\delta^2 S^2 \frac{l}{\gamma S} = k S_n \theta_{\text{уст}}$$

$$\delta^2 \frac{\pi d^2 t}{4 \gamma} = k \pi d l \theta_{\text{уст}} 10^3$$

Соответственно получим, что плотность тока определяется из выражения:

$$\delta = \sqrt{\frac{4 k \theta_{\text{уст}} \gamma 10^3}{d}}$$

где δ - плотность тока, А/мм^2 .

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:

$$\theta_{\text{пред}} = \theta_2$$

$$R_2 = R_1(1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1))$$

При нагреве провода до θ_2 его удельное сопротивление возрастает значения

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

$\rho_0 = \rho_{20}(1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1))$

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$\gamma_0 = \frac{1}{\rho_0}$$

Параметры ρ , γ и λ задаются в справочниках для каждого материала проводника.

Получив для предельной температуры $\delta = \delta_{\text{дон}}$, определяем длительно допустимый ток:

$$I_{\text{дон}} = \delta_{\text{дон}} S$$

где S - площадь сечения провода, мм². Рабочий ток определяется по формуле:

$$I_{\text{раб}} = \frac{P}{U}$$

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 допускаемую 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 $\theta_{\text{пред}}$ °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

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

5.1.2 Перечень основной литературы:

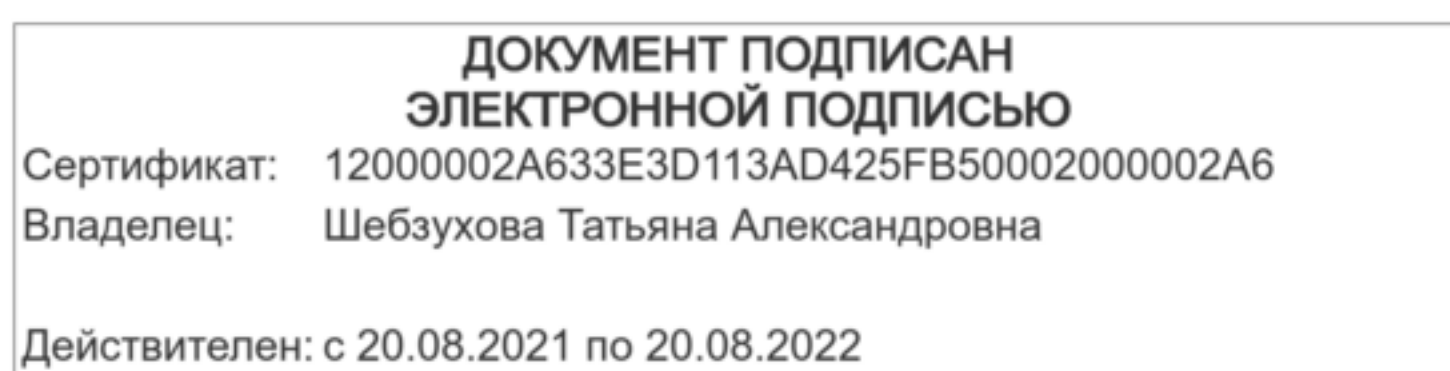
1. Бондаренко, Г. Г. Основы материаловедения : учебник / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко ; под редакцией Г. Г. Бондаренко. — Москва : Лаборатория знаний, 2020. — 761 с. — ISBN 978-5-00101-755-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/37076.html>
2. Электроматериаловедение : учеб. Пособие / А.С. Красько, С.Н. Павлович, Е.Г. Пономоренко. — 2-изд., стер. — Минск : РИПО, 2015. — 212 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=463625
3. 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

5.1.3 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

5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение».
2. Методические рекомендации по проведения лабораторных работ по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение».
3. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение».
4. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение».



5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> - ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕ-
ДЕНИЕ»

для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

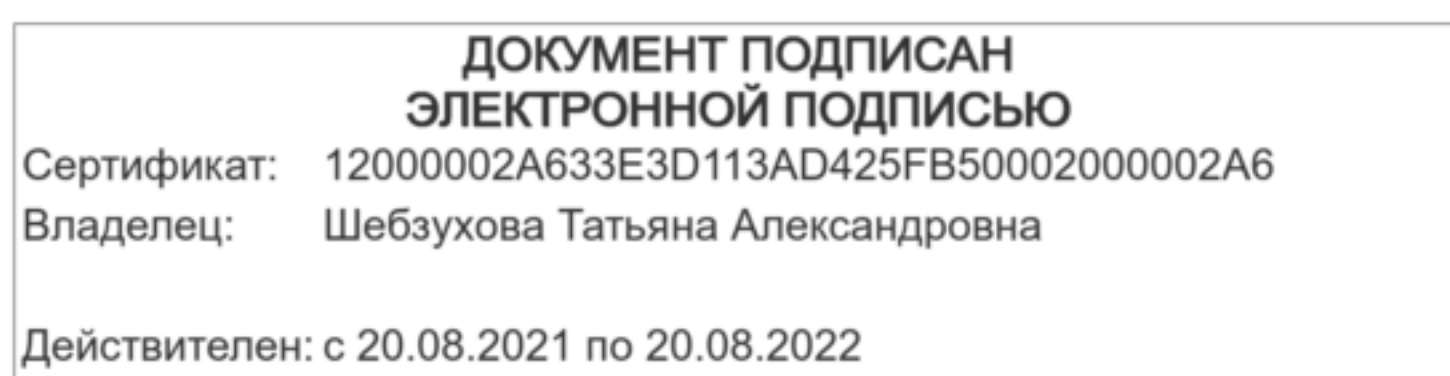
**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

№ п/п		Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование лабораторных работ	
4.	Содержание лабораторных работ	
4.1	Лабораторная работа №1. Определение температурного коэффициента сопротивления.	
4.2	Лабораторная работа №2. Измерение сопротивлений и определение удельных сопротивлений проводников.	
4.3	Лабораторная работа №3. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов.	
4.4	Лабораторная работа №4. Снятие поляризационной характеристики диэлектрика и её зависимости от температуры.	
4.5	Лабораторная работа №5. Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и построение основной кривой намагничивания.	
4.6	Лабораторная работа №6. Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и определение точки Кюри.	
4.7	Лабораторная работа №7. Снятие начальной кривой намагничивания ферромагнитных материалов и определение магнитной проницаемости.	
5	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	
5.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины	
5.2	Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине	
5.3	Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины	
	Приложения	



Введение

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений, а также знакомство с электронными компонентами, оборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электронных схем и приборов, измерениям электрических величин. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях. В предлагаемом учебном пособии описано одиннадцать лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Целью дисциплины является изучение состава и свойств конструкционных и электротехнических материалов в зависимости от их химического состава, структуры и той среды, в которой им предстоит находиться или работать.

Задачами изучения дисциплины являются:

- знакомство с основными достижениями в области электротехнического и конструкционного материаловедения;
- понимание процессов и явлений, которые происходят в электротехнических и конструкционных материалах при различных воздействиях;
- умение влиять на свойства материалов с помощью технологических процессов, позволяющих предотвращать вредные воздействия окружающей среды в процессе работы соответствующего оборудования.

2. Оборудование и материалы

Аппаратные средства:

- Комплект учебно-лабораторного оборудования «Электротехнические материалы».

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения. Переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

3. Наименование лабораторных работ

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
4 семестр			
1	Лабораторная работа № 1. Определение температурного коэффициента сопротивления. Определение температурных коэффициентов сопротивления различных проводников и полупроводников, а также прямого напряжения р-п перехода кремниевого диода.		
2	Лабораторная работа № 2. Измерение сопротивлений и определение удельных сопротивлений проводников.		

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

3	Лабораторная работа № 3. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов. Определение основных характеристик изоляционных материалов: относительной диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$). Приобретение навыков измерения параметров электрических цепей с помощью прибора Е7-22.		
4	Лабораторная работа № 4. Снятие поляризационной характеристики диэлектрика и её зависимости от температуры. Снять экспериментально кулон-вольтовую характеристику нелинейного конденсатора $q(u)$ при различных температурах. При одном из значений температуры рассчитать и построить поляризационную характеристику диэлектрика $P(E)$, и зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряжённости электрического поля (E), приняв площадь поверхности обкладки конденсатора $S = 300 \text{ мм}^2$ и толщину изоляции $d = 0,01 \text{ мм}$.	1,5	1,5
5	Лабораторная работа № 5. Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и построение основной кривой намагничивания. Получить на осциллографе петлю гистерезиса ферромагнетика, снять экспериментально основную кривую намагничивания, рассчитать и построить зависимость относительной магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля.		
6	Лабораторная работа № 6. Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и определение точки Кюри. Снять экспериментально петлю гистерезиса ферромагнетика при различных температурах, определить температуру Кюри и намагниченность насыщения.	1,5	1,5
7	Лабораторная работа № 7. Снятие начальной кривой намагничивания ферромагнитных материалов и определение магнитной проницаемости. Снять экспериментально начальную кривую намагничивания ферромагнетика, рассчитать и построить графики $B(H)$ и $\mu(H)$.		
Итого за 4 семестр:		3	3
Итого:		3	3

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

4. Содержание лабораторных работ

Лабораторная работа №1. Определение температурного коэффициента сопротивления

Цель работы: Определение температурных коэффициентов сопротивления различных проводников и полупроводников, а также прямого напряжения р-п перехода кремниевого диода.

Основы теории:

Температурный коэффициент электрического сопротивления – величина, равная относительному изменению электрического сопротивления участка электрической цепи или удельного сопротивления вещества при изменении температуры на единицу.

Температурный коэффициент сопротивления характеризует зависимость электрического сопротивления от температуры и измеряется в кельвинах в минус первой степени (K^{-1}).

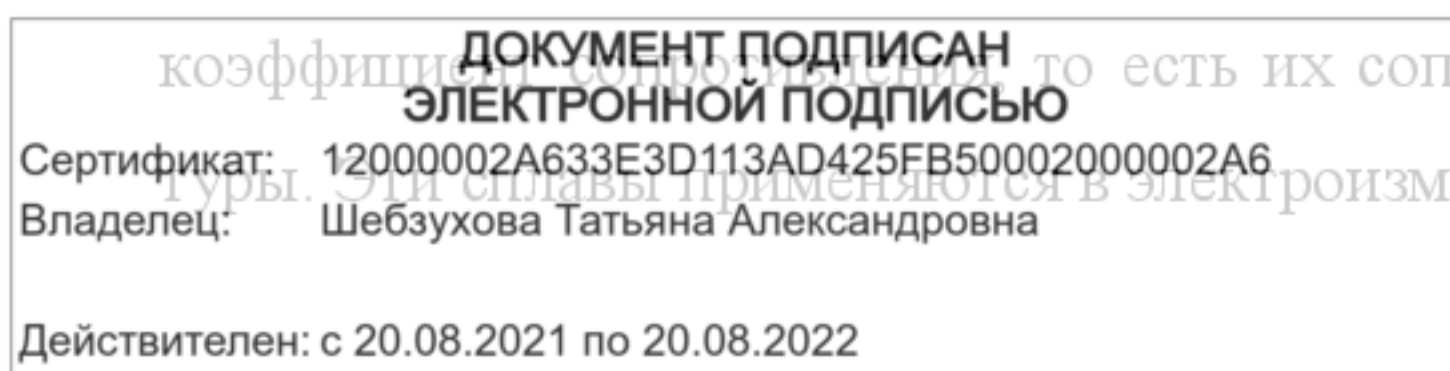
Для большинства металлов температурный коэффициент сопротивления положителен: их сопротивление растёт с ростом температуры, так как вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т. е. уменьшается средняя длина свободного пробега электрона λ , уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление.

Для полупроводников без примесей он отрицателен (сопротивление с ростом температуры падает), поскольку при повышении температуры всё большее число электронов переходит в зону проводимости, соответственно увеличивается и концентрация дырок. Качественно такой же характер (и по тем же причинам) имеет температурная зависимость сопротивления твёрдых и неполярных жидких диэлектриков. Полярные жидкости уменьшают своё удельное сопротивление с ростом температуры более резко вследствие роста степени диссоциации и уменьшения вязкости.

Температурная зависимость сопротивления металлических сплавов, газов, легированных полупроводников и электролитов носит более сложный характер.

Существуют сплавы (константан, манганин), имеющие очень малый температурный

коэффициент сопротивления, то есть их сопротивление очень слабо зависит от температуры. Эти сплавы применяются в электроизмерительной аппаратуре.



Температурный коэффициент удельного сопротивления или средний температурный коэффициент удельного сопротивления выражается:

$$\alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}, \quad \alpha = \frac{1}{\rho} \frac{\rho_2 - \rho_1}{T_2 - T_1}$$

где ρ_1, ρ_2 – удельные сопротивления проводника при температурах T_1 и T_2 соответственно $T_2 > T_1$.

В технических справочниках обычно приводится величина α , с помощью которой можно приближенно определить ρ при произвольной температуре T :

$$\rho = \rho_1(1 + \alpha_{\rho}(T - T_1))$$

Это выражение дает точное значение удельного сопротивления только для линейной зависимости $\rho(T)$. В остальных случаях этот метод является приближенным; он тем точнее, чем уже интервал температур, который использован для определения α_{ρ} .

При выполнении эксперимента определяются температурные коэффициенты:

1. Полупроводникового резистора с положительным температурным коэффициентом (PTC). Используются резисторы КТ110, КТУ81 или аналогичные. Маркировка: «600.13-1; PTC».

2. Металлической пленки резисторов типа MF, С2-33Н или аналогичных. Маркировка: «600.19-1; MF».

3. Углеродной пленки резисторов типа CF, С2-14 или аналогичных. Маркировка: «600.19-2; C».

4. Полупроводникового резистора с отрицательным температурным коэффициентом (NTC). Используются резисторы В57861S, В57891М или аналогичные. Маркировка: «600.19-3; NTC».

5. Медного провода (термопреобразователь сопротивления медный типа дТС014-50М.В3.20/0,2. Номинальное сопротивление при 0°C – 50 Ом). Маркировка: «600.19-4; Cu».

6. Прямого напряжения р-п перехода кремниевого диода при постоянном токе. Используются диоды КД522, 1N4148 или аналогичные. Маркировка: «600.19-5; диод Si».

При выполнении работы используется электронагреватель (394.2). В блок встроены нагреватель с измерителем-регулятором температуры. Испытываемый образец вставляется в отверстие на лицевой панели нагревателя и с помощью мультиметра измеряется его выходное сопротивление или напряжение.

Блок электронагревателя

Блок электронагревателя (рис. 1.1) используется для определения температурного коэффициента сопротивления различных материалов. Блок позволяет задать и автоматически поддерживать температуру нагревателя. В блоке установлен маломощный источник +5 В, используемый как дополнительный источник питания в некоторых экспериментах.

Слева от индикаторов 3 и 4 (рис. 1.1) на лицевой панели регулятора температуры установлены 4 светодиода

K1 – включен при нагреве;

K2 – не используется;

AL – индикатор превышения предельных значений (не используется).

RS – индикатор режима автоматического регулирования. Должен быть включен для нормальной работы блока в режиме автоматического регулирования. При выключении автоматического регулирования (см. ниже) прибор работает только как индикатор температуры нагревателя.

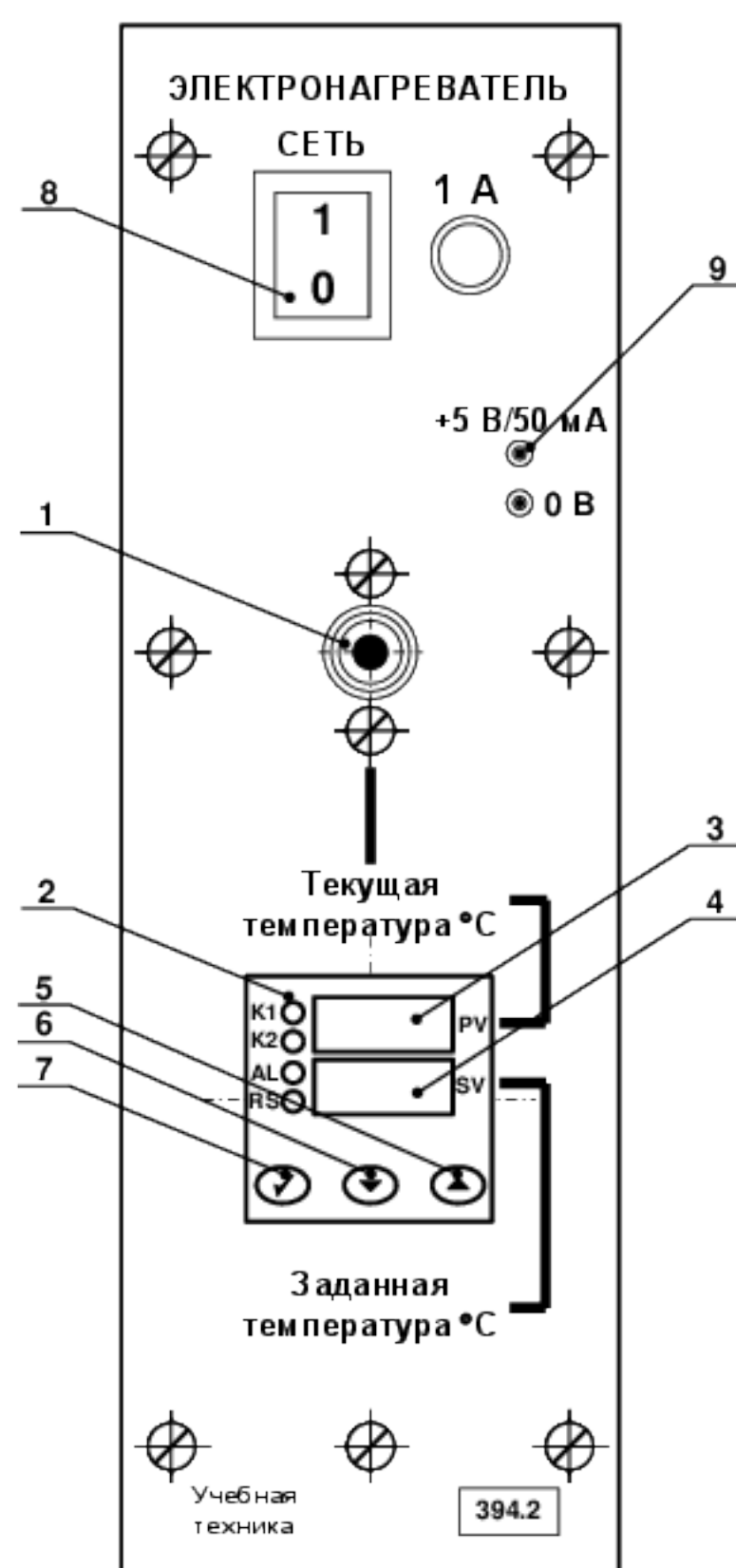


Рисунок 1.1 – Лицевая панель блока электронагревателя.

1 – отверстие нагревателя; 2 – измеритель-регулятор температуры; 3 – индикатор текущего значения температуры нагревателя (PV); 4 – индикатор заданного значения температуры; 8 – вы-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

ключатель питания; 9 – гнездо источника питания +5 В.

Задание температуры электронагревателя.

1. Нажать одну из кнопок управления 5 или 6 регулятора температуры 2 (рис. 1.1).

Начинает мигать индикатор заданного значения температуры нагревателя (SV, зеленый индикатор 4).

2. Для изменения заданного значения температуры повторно нажать кнопки 5 (уменьшение) или 6 (увеличение температуры). Удержание кнопки в течение некоторого времени включает режим автоматического ускоренного изменения значения. В процессе установки индикатор продолжает мигать.

3. После установки требуемого значения температуры необходимо однократно нажать кнопку 7 (рис. 1.1). Мигание индикатора 4 прекращается. Температура задана.

При выполнении экспериментов рекомендуется начинать с низких значений температуры (на 5...10° выше комнатной) и постепенно повышать её величину до 100° С, т. к. остывание электронагревателя происходит гораздо медленнее его нагрева.

Включение (отключение) режима автоматического регулирования.

При включении питания электронагревателя режим автоматического регулирования выключен. При выполнении экспериментов целесообразно задать начальное значение температуры и, после этого, включить режим автоматического регулирования.

Переключение режима автоматического регулирования:

1. Однократно нажать кнопку 7 (рис. 1.1) регулятора температуры. На индикаторе 3 (красный, PV) отобразится надпись «r-S». На индикаторе 4 (зеленый, SV) текущее состояние регулятора «StoP» (СТОП) или «rUn» (РАБОТА).

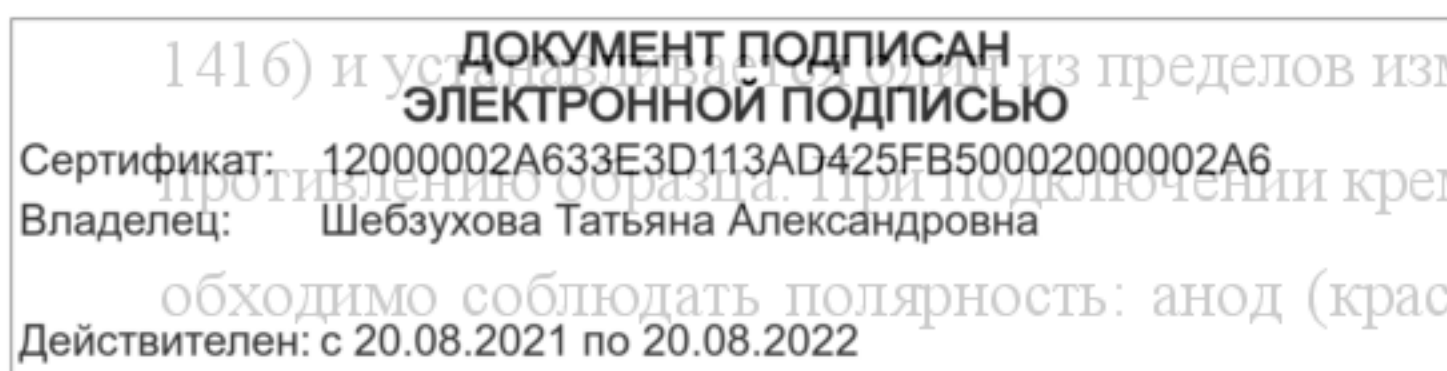
2. Для изменения состояния регулятора нажать любую из кнопок 5 или 6 – индикатор 4 начнет мигать. Повторное нажатие кнопки 5 или 6 переключит режим («StoP» ↔ «rUn»).

3. Нажатие кнопки 7 фиксирует выбранное значение (индикатор 4 не мигает). Повторное нажатие кнопки 7 возвращает регулятор температуры в исходное состояние – на индикаторе отображаются текущее и заданное значения температуры. Светодиод RS сигнализирует о состоянии регулятора: включен – режим «rUn» (РАБОТА), выключен – «StoP» (СТОП).

Схема электрических соединений

Схема электрических соединений при определении температурных коэффициентов сопротивления показана на рис. 1.2.

Все образцы подключаются к гнездам «VΩ» и «COM» мультиметра MY60T (блок



катод (черный или синий провод) – к гнезду «COM». Для определения прямого напряжения на диоде в милливольтках используется предел измерения « $\rightarrow$ ». В этом случае через диод протекает постоянный прямой ток в диапазоне 1...1,5 мА. Точное значение тока можно измерить дополнительным мультиметром, включенным последовательно с испытываемым диодом.

Однофазный источник питания G1 предназначен для безопасного питания блока электронагревателя.

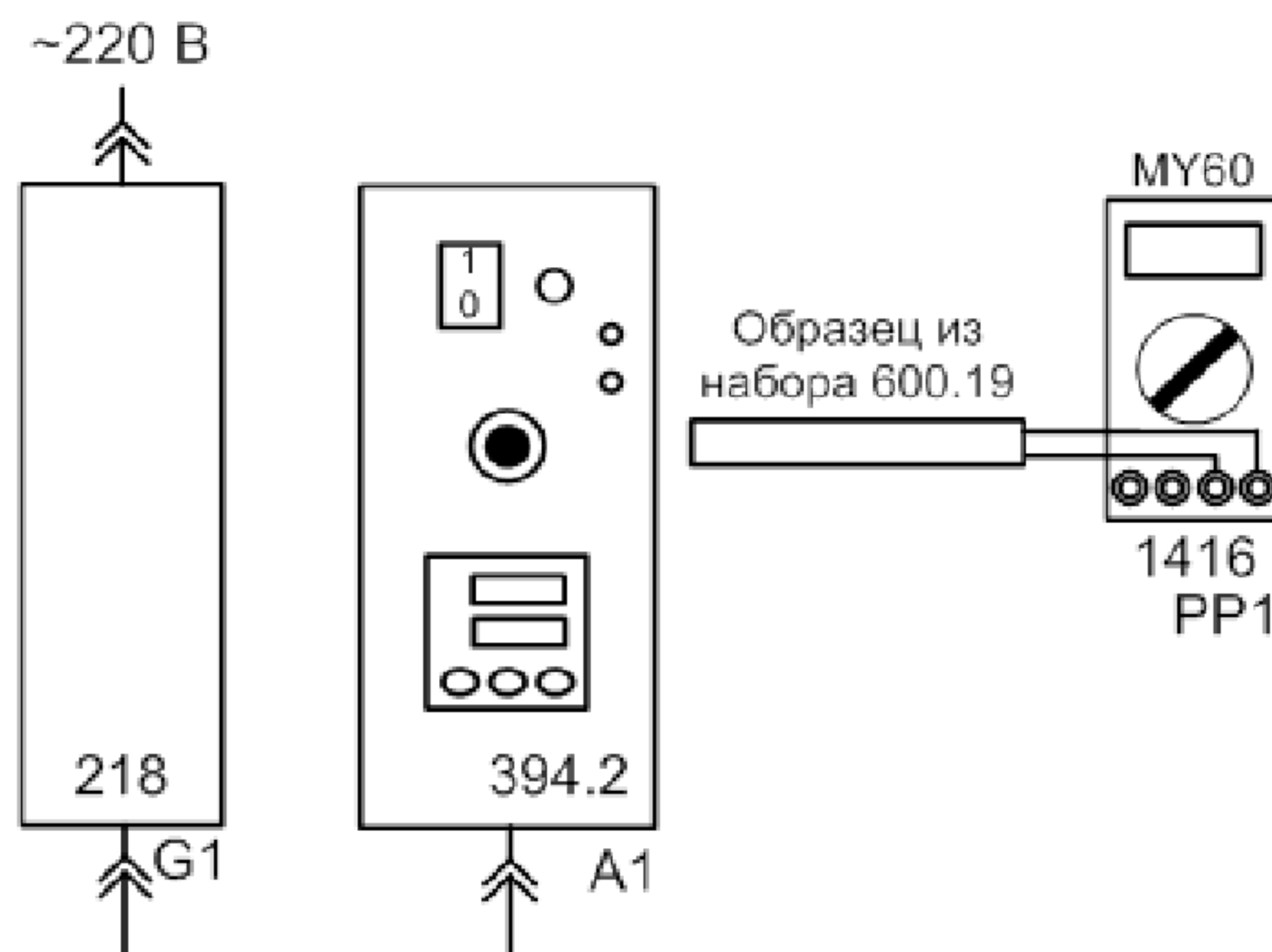


Рисунок 1.2 – Схема для определения температурного коэффициента сопротивления.

Все образцы подключаются к гнездам «VΩ» и «COM» мультиметра MY60T (блок 1416) и устанавливается один из пределов измерения сопротивления, соответствующий сопротивлению образца. При подключении кремниевого диода (образец 600.19-5, диод Si) необходимо соблюдать полярность: анод (красный провод) подключается к гнезду «VΩ», а катод (черный или синий провод) – к гнезду «COM». Для определения прямого напряжения на диоде в милливольтках используется предел измерения « $\rightarrow$ ». В этом случае через диод протекает постоянный прямой ток в диапазоне 1...1,5 мА. Точное значение тока можно измерить дополнительным мультиметром, включенным последовательно с испытываемым диодом.

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
A1	Электронагреватель	394.2	30...100°C, источник +5 В,
	Набор образцов резисторов	600.19	6 образцов.
PP1	Мультиметр	1416	MY60T

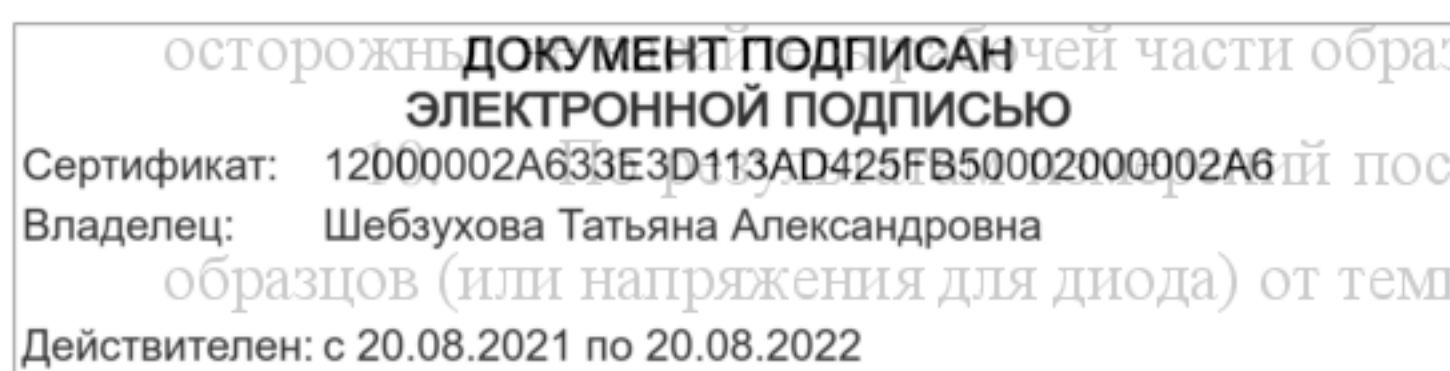
Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Проверьте схему электропитания блоков электронагревателя и источника питания G1. Убедитесь, что выключатели «СЕТЬ» этих блоков отключены.
2. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений рис. 1.2.
3. Выберите значения температуры, при которых Вы хотите измерить сопротивления образцов. Из-за инерционности нагревателя целесообразно выбрать не более 5...7 точек в диапазоне температур до 100°C. Начальное значение – комнатная температура.
4. Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
5. Включите выключатель «СЕТЬ» блока электронагревателя.
6. При включении питания автоматический режим регулятора температуры электронагревателя выключен. Установите требуемую температуру (см. раздел «Блок электронагревателя»). Включите автоматический режим регулятора температуры. Начнется разогрев нагревателя (включены светодиоды индикаторов K1 и RS).
7. Измерьте сопротивление образцов при комнатной температуре. Для исключения нагрева образцов от рук их необходимо брать за корпус вблизи выводов.
8. После стабилизации температуры нагревателя вблизи заданного значения поочередно вставьте каждый из образцов в отверстие нагревателя до упора. Выждите 2..3 минуты для стабилизации температуры и измерьте сопротивление образца.
9. Задайте следующее значение температуры, дождитесь её стабилизации и повторите измерения сопротивления образцов. При высоких температурах образцов будьте осторожны.

постройте графики зависимостей сопротивления образцов (или напряжения для диода) от температуры.



11. По завершении измерений отключите питание всех блоков.
12. По результатам испытания отберите образцы, имеющих линейную зависимость сопротивления от температуры, и вычислите их температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = \frac{R(t_2) - R(t_1)}{R(t_1) \cdot t_2 - R(t_2) \cdot t_1}$$

где $R(t_2)$, $R(t_1)$ - сопротивление образца, соответственно при температуре t_2 и t_1 .

α [$град^{-1}$] - температурный коэффициент сопротивления образца.

Сопротивление образца при произвольной температуре t вычисляется по формуле:

$$R(t) = R(t_1) \cdot \frac{1 + \alpha \cdot t}{1 + \alpha \cdot t_1}$$

При определении сопротивления только одного образца порядок выполнения эксперимента можно изменить.

- Соберите схему рис. 1.2.
- Установите испытываемый образец в отверстие нагревателя.
- Задайте температуру 100°C и включите автоматический режим регулятора температуры («Un», режим «РАБОТА», индикатор RS включен). Дождитесь установления заданной температуры и выключите автоматический режим регулятора («StoP», режим «СТОП», индикатор RS выключен).
- По мере снижения температуры нагревателя измерьте сопротивление образца (или напряжение для диода) при нескольких значениях температуры в диапазоне $100 \dots 30^{\circ}\text{C}$. Ориентировочное время остывания датчика $15 \dots 30$ мин.
- Обработайте результаты эксперимента в соответствии с приведенными выше рекомендациями.

T, °C	30	40	60	80	90	100
PTC600						
Cu						
NTC						
MF						
Si						

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	
--	--

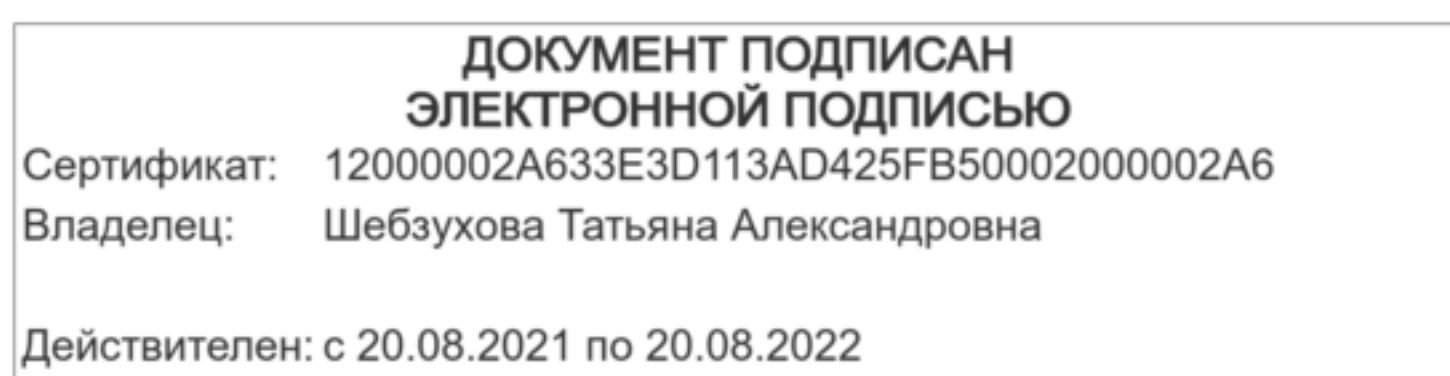
Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Какова зависимость сопротивления полупроводников и металлов от температуры?
2. Чем отличаются металлы, диэлектрики и полупроводники по своим электрическим свойствам?
3. Почему при низких температурах металлы являются хорошими проводниками, а полупроводники плохими? Каково сопротивление полупроводников при $T = 0 \text{ K}$?
4. Что называют энергией активации полупроводника? Какие величины зависят от этой характеристики полупроводника?



Лабораторная работа №2. Измерение сопротивлений и определение удельных сопротивлений проводников

Цель работы: В учебных целях определить материал проводника путём измерения его сопротивления и вычисления удельного сопротивления

Основы теории:

При замыкании электрической цепи, на зажимах которой имеется разность потенциалов, возникает электрический ток. Свободные электроны под влиянием электрических сил поля перемещаются вдоль проводника. В своем движении свободные электроны наталкиваются на атомы проводника и отдают им запас своей кинетической энергии. Таким образом, электроны, проходя по проводнику, встречают сопротивление своему движению. При прохождении электрического тока через проводник последний нагревается.

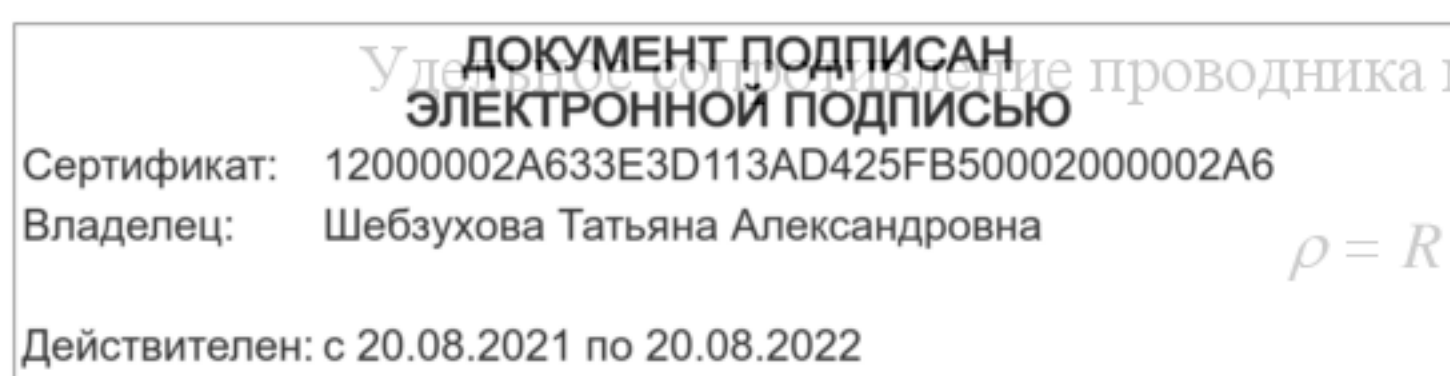
Электрическим сопротивлением проводника обусловлено явление преобразования электрической энергии в тепловую при прохождении электрического тока по проводнику.

Длинный проводник малого поперечного сечения создает току большое сопротивление. Короткие проводники большого поперечного сечения оказывают току малое сопротивление. Если взять два проводника из разного материала, но одинаковой длины и сечения, то проводники будут проводить ток по-разному. Это показывает, что сопротивление проводника зависит от материала самого проводника. Температура проводника тоже оказывает влияние на его сопротивление. С повышением температуры сопротивление металлов увеличивается, а сопротивление жидкостей и угля уменьшается. Только некоторые специальные металлические сплавы (манганин, константан, никелин и др.) с увеличением температуры своего сопротивления почти не меняют.

Итак, мы видим, что электрическое сопротивление проводника зависит от длины проводника, поперечного сечения проводника, материала проводника, температуры проводника.

При сравнении сопротивлений проводников из различных материалов необходимо брать для каждого образца определенную длину и сечение. Тогда мы сможем судить о том, какой материал лучше или хуже проводит электрический ток.

Сопротивление (в омах) проводника длиной 1 м, сечением 1 мм² называется удельным сопротивлением и обозначается греческой буквой ρ /



Удельное сопротивление проводника можно определить по формуле:

$$\rho = R \frac{S}{l} \left[\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right]$$

где R – сопротивление проводника, измеренное при температуре 20°C , Ом;

S – постоянное поперечное сечение проводника, мм^2 ;

l – длина в м.

Вместо единицы $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ предпочтительно применять равную ей по размеру единицу СИ $\text{мкОм}\cdot\text{м}$. Связь между названными единицами удельного сопротивления:

$$1 \text{ Ом}\cdot\text{м} = 10^6 \text{ мкОм}\cdot\text{м} = 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$$

В качестве основных проводниковых материалов применяют:

1) материалы высокой проводимости, используемые для изготовления всевозможных обмоток электрических машин, аппаратов и приборов и передачи электрической энергии; от этих материалов требуется, возможно, меньшая величина электрического сопротивления;

2) сплавы высокого сопротивления, используемые для изготовления всевозможных сопротивлений, нагревательных приборов, термопар и др.

К материалам высокой проводимости предъявляют следующие требования: возможно большая проводимость (возможно меньшее удельное сопротивление); возможно меньший температурный коэффициент удельного сопротивления; достаточно высокие механическая прочность, в частности предел прочности при растяжении и удлинение при разрыве; способность легко обрабатываться прокаткой и волочением для изготовления проводов; способность хорошо свариваться и спаиваться, создавая при этом надежные соединения с малым электрическим сопротивлением; достаточная коррозионная устойчивость. Для разных случаев применения эти требования в той или иной степени варьируют. Например, для большинства обмоток электрических машин, аппаратов и проводов выгодней иметь, возможно, меньшее удельное сопротивление, даже если за счет его снижения несколько снизится и предел прочности при растяжении; для троллейных (контактных) воздушных проводов, работающих на разрыв и на истирание, особое значение приобретают повышенные предел прочности при растяжении, твердость, стойкость против истирания.

Значения удельного сопротивления ρ , $\text{мкОм}\cdot\text{м}$ некоторых металлов приведенные ниже:

Олово 0,076

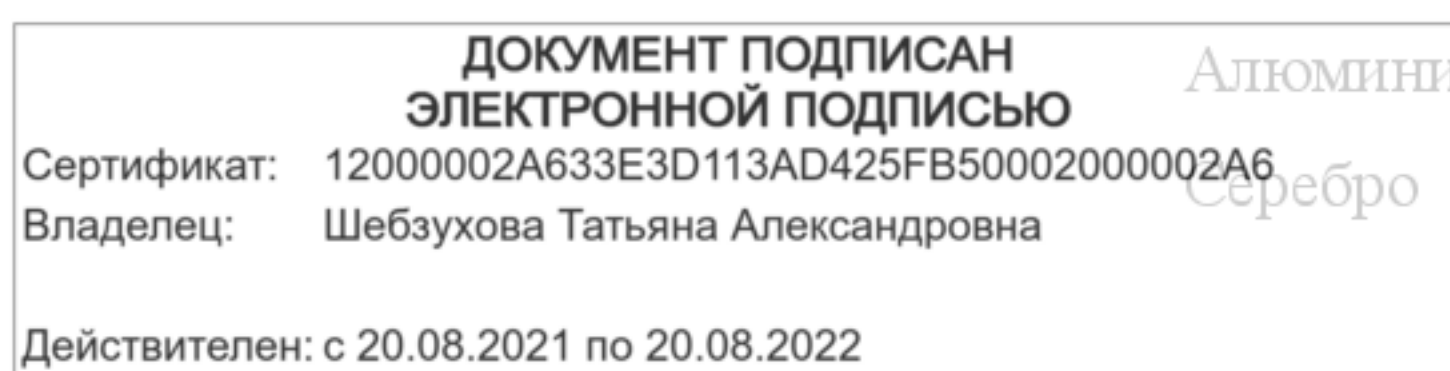
Кадмий 0,210

Свинец 0,059

Цинк 0,045

Алюминий 0,5

Серебро 0,024



Медь	0,04
Железо	0,110
Никель	0,062

Наименьшим удельным сопротивлением обладает чистый металл. Любые примеси, металлические и неметаллические, повышают удельное сопротивление. Даже примесь металла, имеющего меньшее удельное сопротивление, чем данный повышает его сопротивление, если металлы образуют друг с другом твердый раствор. Это объясняется искажением кристаллической решетки основного металла даже небольшим количеством примеси.

Схема электрическая соединений приведена на рис. 2.1. Для удобства присоединения миниблока с испытываемым проводником к измерителю Е7-22 используется наборное поле блока генераторов напряжений.

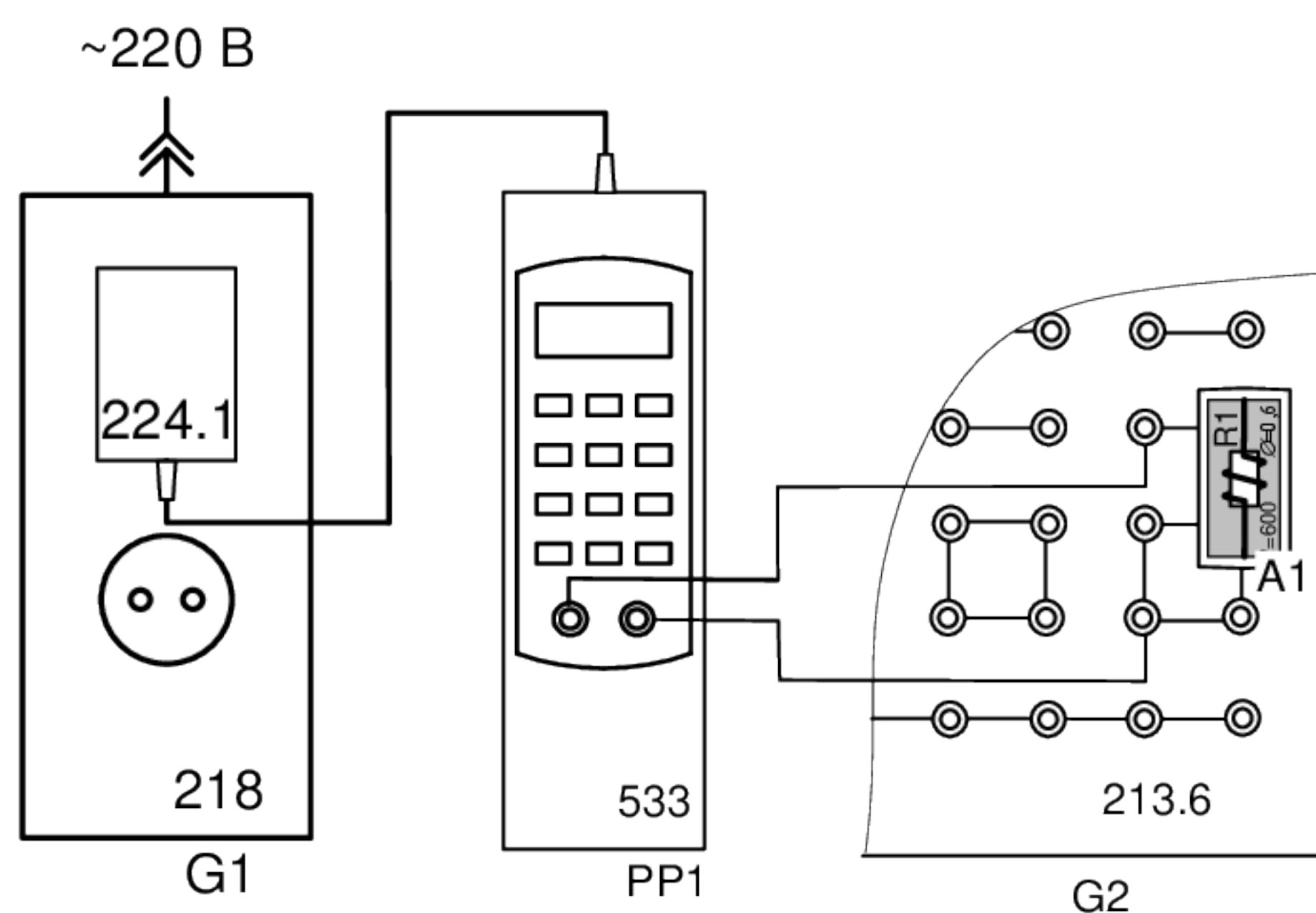


Рисунок 2.1 – Схема электрическая соединений для измерения сопротивлений образцов

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
П2	Блок генераторов напряжений с наборным полем	213.6	± 15 В, 0...+13 В, ~0...12 В, Л 12В. 0,2 Гц...200 кГц
A3	Измеритель R, L, C	534	Цифровой мультиметр Е7-22
А4	Набор миниблоков «Электро-материалы»	600.18	Миниблоки «R1» и «R2»

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.

Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рис. 2.1). При этом миниблок «**R1**» установите в наборную панель и подключите его к измерителю R, L, C. Подключите блок питания 224.1 к разъему на верхней стороне корпуса прибора Е7-22. Вилку блока питания подключите к свободной розетке однофазного источника питания (218).

Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

Если прибор Е7-22 (измеритель R, L, C) не включился, кратковременно нажмите левую верхнюю кнопку на лицевой панели прибора - ❶.

Выберите вид измеряемого параметра, нажимая кнопку «L/C/R» пока на дисплее слева не появится символ R. Запишите значение сопротивления, которое показывает прибор в табл. 2.1.

Измените частоту, нажимая кнопку «ЧАСТ», и убедитесь, что на обеих частотах прибор показывает одно и то же значение сопротивления.

Замените миниблок «**R1**» миниблоком «**R2**» и аналогично измерьте сопротивление установленного в нём резистора.

Вычислите удельные сопротивления испытываемых проводников по формуле:

$$\rho = R \frac{S}{l} \left[\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right]$$

Таблица 2.1

Миниблок	R, Ом	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Материал (предположительно по справочнику)
« R1 »			
« R2 »			

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

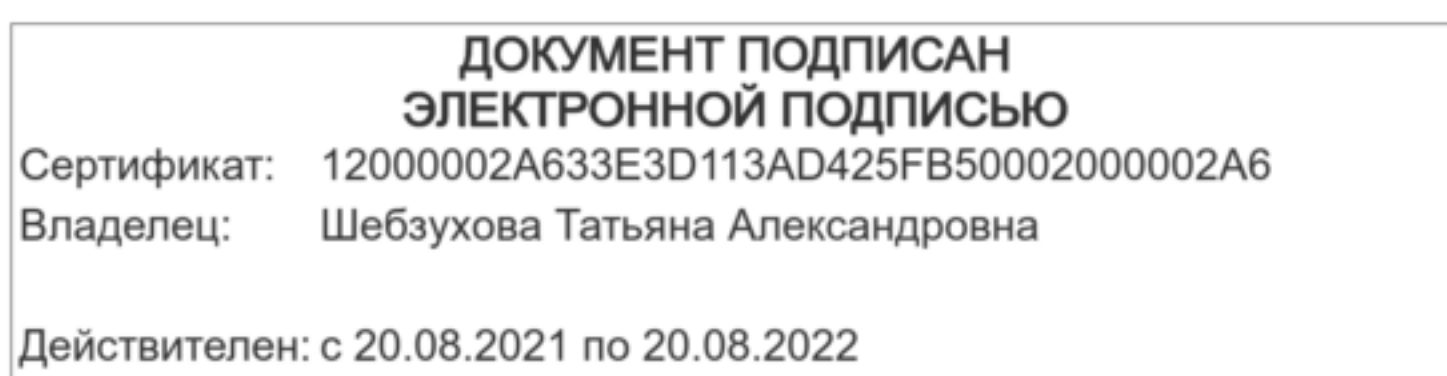
Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Почему удельное сопротивление проводника зависит от рода материала?
2. Зависит ли удельное сопротивление от температуры?
3. Как изменится напряжение на участке электрической цепи, если медную проволоку на этом участке заменить никелевой?
4. Назвать известные вам методы определения сопротивления резистора?
5. Как электронная теория электропроводности металлов объясняет природу электрического сопротивления?
6. Почему наличие примесей в металле приводит к увеличению удельного сопротивления проводника?



Лабораторная работа №3. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов

Цель работы: Определение основных характеристик изоляционных материалов: относительной диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$). Приобретение навыков измерения параметров электрических цепей с помощью прибора Е7-22.

Основы теории:

Потери энергии в диэлектрике называются диэлектрическими потерями.

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

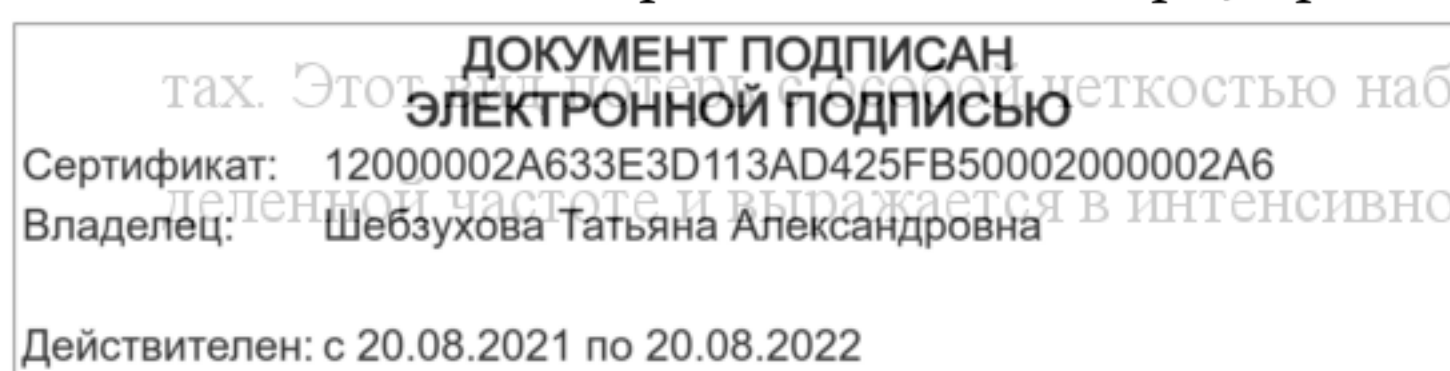
- 1) диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
- 2) диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью;
- 3) ионизационные диэлектрические потери;
- 4) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией особенно отчетливо наблюдаются в веществах, обладающих релаксационной поляризацией: в диэлектриках дипольной структуры и в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов.

Релаксационные диэлектрические потери обусловлены нарушением движения частиц под влиянием сил электрического поля.

В температурной зависимости тангенса угла релаксационных диэлектрических потерь наблюдается максимум при некоторой температуре, характерной для данного вещества. При этой температуре время релаксации диэлектрика примерно совпадает с периодом изменения приложенного электрического поля. Если температура такова, что время релаксации частиц значительно больше полупериода изменения приложенного переменного напряжения, то тепловое движение частиц будет менее интенсивным и потери уменьшатся; если температура такова, что время релаксации частиц значительно меньше полупериода изменения напряжения, то интенсивность теплового движения будет больше, связь между частицами уменьшится, в результате чего потери также снизятся.

К диэлектрическим потерям обусловленным поляризацией, следует отнести также так называемые резонансные потери, проявляющиеся в диэлектриках при высоких частотах. Этот эффект наблюдается в некоторых газах при строго определенном поглощении энергии электрического поля.



Резонансные потери возможны и в твердых веществах, если частота вынужденных колебаний, вызываемых электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества. Наличие максимума в частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta$ характерно также и для резонансного механизма потерь, однако в данном случае температура не влияет на положение максимума.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную объемную или поверхностную проводимость. Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты поля; $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается с частотой по гиперболическому закону.

Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью, возрастают с температурой по экспоненциальному закону $P_{aT}=A \cdot \exp(-b/T)$, где A , b – постоянные материала.

Ионизационные диэлектрические потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии. Ионизационные потери проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значение, соответствующее началу ионизации данного газа. Ионизационные потери можно вычислить по формуле

$$P_{a.u}=A_1 \cdot f \cdot (U-U_u)^3,$$

где A_1 - постоянные коэффициент;

f - частота поля;

U - приложенное напряжение;

U_u – напряжение, соответствующее началу ионизации.

Ионизационное напряжение U_u зависит от давления, при котором находится газ, поскольку развитие ударной ионизации молекул связано с длиной свободного пробега носителей заряда.

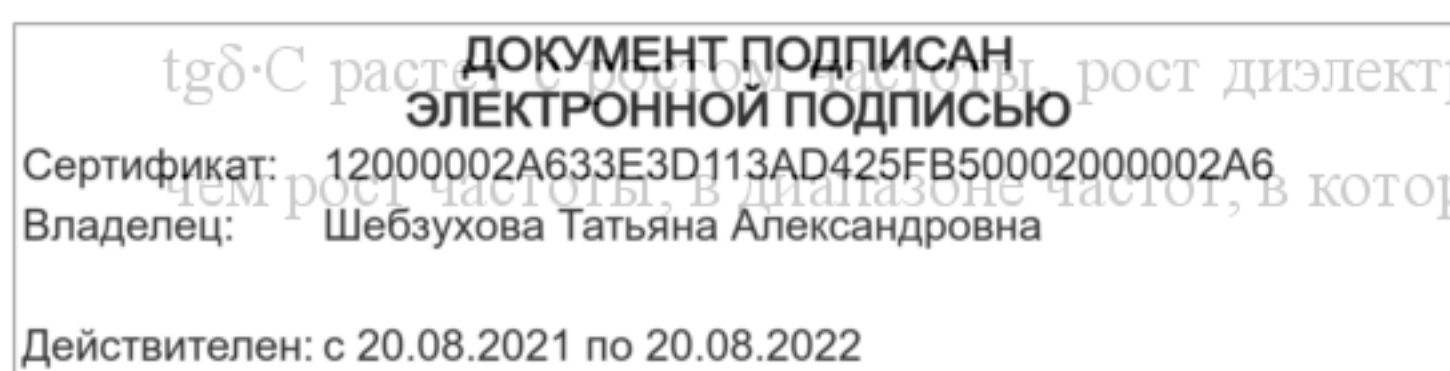
Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, наблюдаются в слоистых диэлектриках, из пропитанной бумаги и ткани, в пластмассах с наполнителем, в пористой керамике, в миканитах и т.д.

Тангенс угла диэлектрических потерь имеет очень важное значение как электрическая характеристика диэлектрика. Мощность диэлектрических потерь прямо пропорциональна частоте:

$$P = \operatorname{tg}\delta \cdot \omega \cdot C \cdot U^2, \text{ Вт}$$

Однако, следует иметь ввиду, что и $\operatorname{tg}\delta$ и C зависят от частоты, причем большим изменениям может подвергаться величина $\operatorname{tg}\delta$. В диапазоне частот, в котором произведение

$\operatorname{tg}\delta \cdot C$ растет с частотой, произведение диэлектрических потерь будет происходить быстрее, чем рост частоты, в диапазоне частот, в котором произведение $\operatorname{tg}\delta \cdot C$ уменьшается с ростом



частоты, величина диэлектрических потерь может увеличиваться с ростом частоты более медленно.

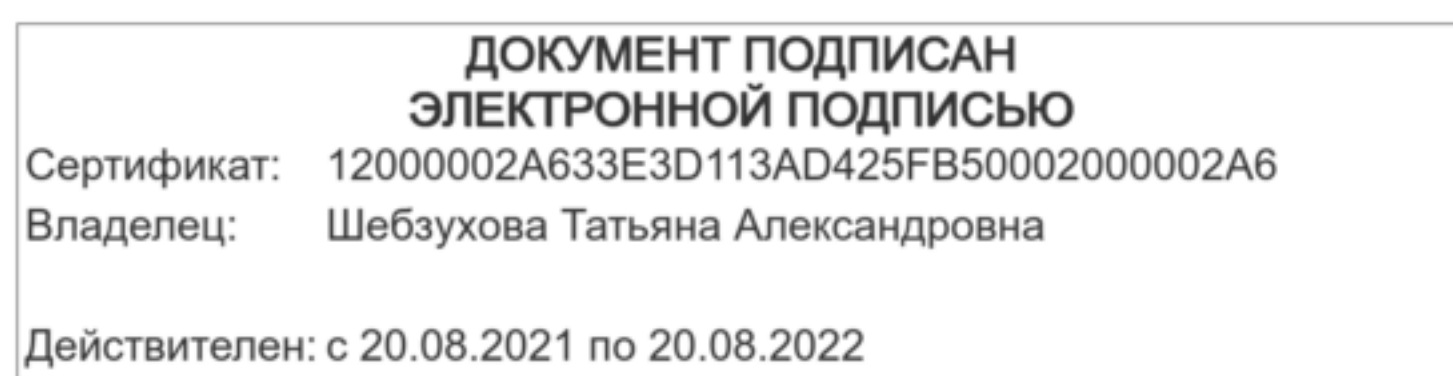
Как правило, при высоких частотах диэлектрические потери больше, чем при низких, что создает определенные трудности при выборе электроизоляционных материалов для высокочастотной техники. В высокочастотной технике вместо $\operatorname{tg}\delta$ часто пользуются понятием добротности изоляции, которую обозначают обычно величиной Q , обратной величине $\operatorname{tg}\delta$.

Тангенс угла диэлектрических потерь, или добротность, могут характеризовать не только конкретный материал, но и изоляционную конструкцию машины, аппарата или прибора в целом. Величина $\operatorname{tg}\delta$ для большинства жидких и твердых диэлектриков колеблется в пределах от десятитысячных до десятых долей единицы.

Так же одной из важнейших характеристик диэлектрика является его относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r . Эта величина представляет собой отношение заряда Q , полученного при некотором напряжении на конденсаторе, содержащем данный диэлектрик, к заряду Q_0 , который можно было бы получить в конденсаторе тех же размеров и при том же направлении, если бы между электродами находился вакуум.

Относительная диэлектрическая проницаемость вещества не зависит от выбора системы единиц. Для вакуума диэлектрическую проницаемость принимают за единицу, а для любого другого вещества она всегда больше единицы. Относительная диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз емкость конденсатора с данным диэлектриком больше емкости аналогичного вакуумного конденсатора.

Для определения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь различных изоляционных материалов измеряются параметры последовательной схемы замещения конденсатора (C и R) с диэлектриком из испытываемого материала. Схема электрическая соединений для измерения параметров конденсатора приведена на рис. 3.1. Плоский конденсатор (блок 2355), между пластинами которого помещен испытываемый диэлектрик, подключается к измерителю параметров RLC E7-22 (блок 533). Блоки питания 218 и 224.1 обеспечивают напряжение питания +12В для E7-22.



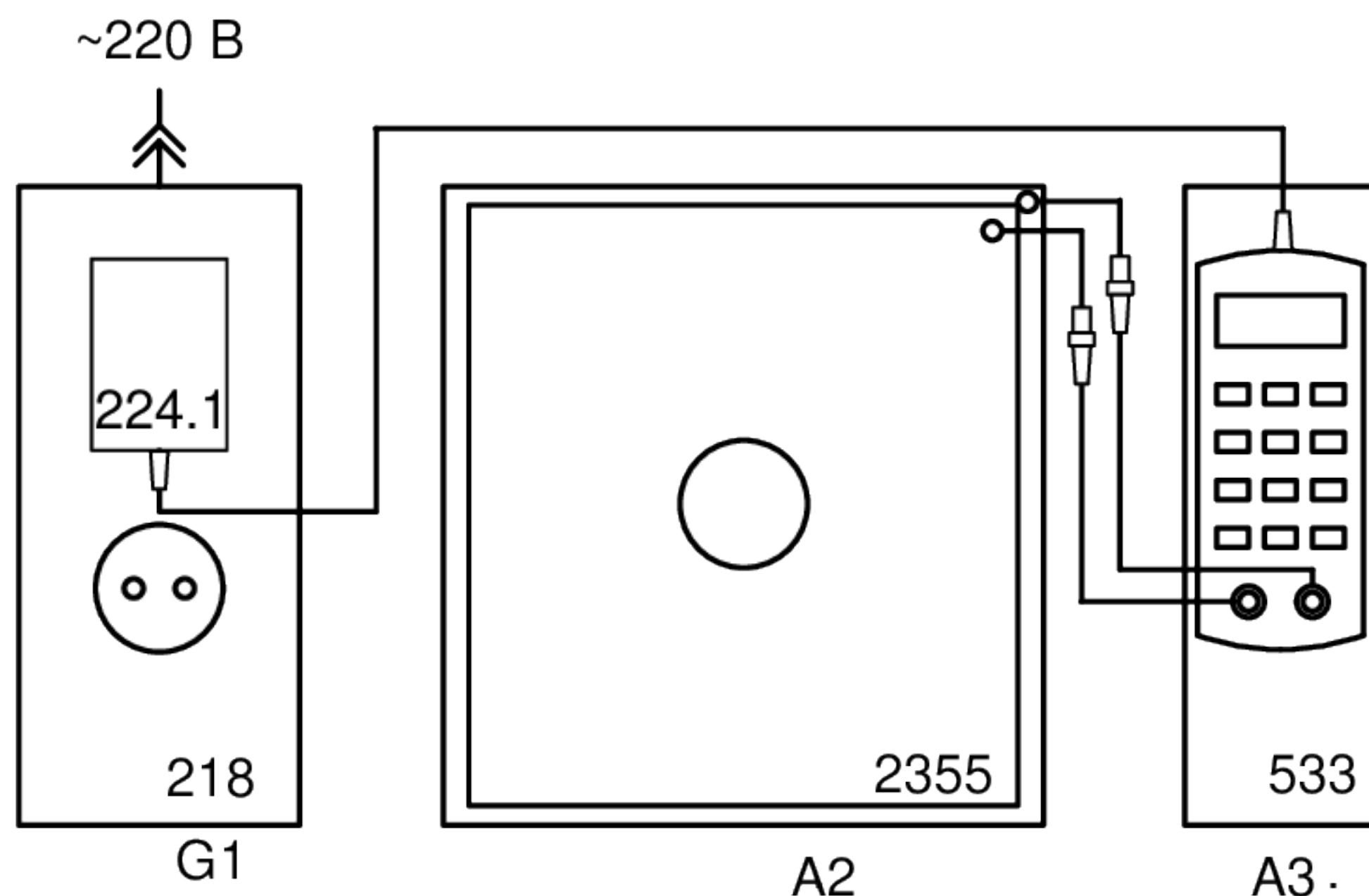


Рисунок 3.1 – Схема электрическая соединений для измерения параметров конденсатора с испытываемым диэлектриком.

Для вычисления относительной диэлектрической проницаемости испытываемого диэлектрика измеренная емкость C сравнивается с расчетной емкостью конденсатора C_0 с теми же геометрическими размерами, но без диэлектрика (среда между пластинами – вакуум с диэлектрической проницаемостью ε_0). Величина $C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$. Отношение емкостей

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S / d}{\varepsilon_0 S / d} = \varepsilon,$$

т. е. равно относительной диэлектрической проницаемости испытываемого диэлектрика.

Тангенс угла диэлектрических потерь определяется для последовательной схемы замещения конденсатора, состоящей из идеального конденсатора с емкостью C и, включенного последовательно с ним, сопротивления R . При измерении на частоте ω

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R}{1/\omega C},$$

т. е. тангенс диэлектрических потерь равен отношению активного (R) и емкостного ($1/\omega C$) сопротивлений цепи. Отсюда можно определить сопротивление R последователь-

ной схемы конденсатора:
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$R = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C}.$$

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
A3	Измеритель R-L-C	533	Измерение R, L, C при частоте 120 Гц и 1 кГц
A2	Блок конденсатора	2355	Площадь пластин 790 кв. см
	Набор образцов диэлектриков	600.20	Образцы диэлектриков размером 285x297 мм

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Подключите блок питания 224.1 к блоку «Измеритель R-L-C» (533) и к розетке «220 В» однофазного источника питания G1 (блок 218) в соответствии со схемой 3.1.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

- Включите выключатель ❶ «Измерителя R-L-C» (533).

Выберите:

- вид измеряемого параметра – емкость C (кнопка «L/C/R»);
- вспомогательный измеряемый параметр – тангенс дельта D (кнопка «Q/D/R»);
- схему замещения элемента – последовательную (кнопка «ПАР/ПОСЛ», «SER» на индикаторе);
- частоту измерения – 120 Гц (кнопка «ЧАСТ»).
- Вложите испытываемый образец диэлектрика между пластинами конденсатора и подключите конденсатор к измерителю RLC, как показано на рис. 3.1. Верхнюю пластину блока конденсатора 2355 необходимо установить примерно по центру нижней пластины с равномерным отступом от краев по всему периметру пластины.
- На расстоянии менее 10...15 см от блока конденсаторов 2355 не должно быть посторонних и электропроводных предметов. **Недопустима подача напряжения от внешних источников на вход прибора и пластины блока конденсатора!**

- Включите конденсатор 2355 с диэлектриком.

