

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Донецк – 2019 р.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

КАФЕДРА «ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Для студентов направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии
материалов»

Рассмотрено:

На заседании кафедры физического материаловедения
протокол № 18 от 20.06.2019 г.

Зав.кафедрой _____ Н.Т.Егоров

Утверждено:

На заседании учебно-методической комиссии по
направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии
материалов».

Председатель комиссии

_____ В.П. Горбатенко

Донецк – 2019 р.

УДК 608.1
ББК 34.2
М54

Рецензенты:

Штычно Алла Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры физического материаловедения ГОУВПО «ДОННТУ»;

Кузин Андрей Викторович - кандидат технических наук, доцент кафедры руднотермических процессов и малоотходных технологий ГОУВПО «ДОННТУ».

Составитель:

Крымов Виталий Николаевич - кандидат технических наук, доцент кафедры физического материаловедения ГОУВПО «ДОННТУ»

Ответственный за выпуск:

Егоров Николай Тимофеевич - кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой физического материаловедения ГОУВПО «ДОННТУ»

Методические указания к практическим работам по курсу “Электротехнические стали и сплавы” (для студентов направления подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов») [Электронный ресурс] / Сост.: Крымов В.Н., – Электрон. дан. (1 файл: 0,7 Мб). - Донецк : ДОННТУ, 2016. - Системные требования: Acrobat Reader.

В методических указаниях приведены теоретические сведения, описана методика выполнения практических работ, составлен перечень контрольных вопросов

Оглавление

1. КЛАССИФИКАЦИЯ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ .	5
2. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОВОДИМОСТЬ СПЛАВОВ.....	12
3. МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ. ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА СТАЛЕЙ.	19
Приложение А.....	27

1. КЛАССИФИКАЦИЯ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ

1.1 Классификация и сортамент электротехнических сталей.

Электротехнические стали (ЭТС) – класс ферромагнитных материалов, применяющихся для изготовления магнитно-активных частей электромашин и приборов, вырабатывающих и преобразующих электрическую энергию: генераторов, трансформаторов, электродвигателей, реле, электромагнитов.

ЭТС производятся по ряду стандартов:

- ГОСТ 3836-83 Сталь электротехническая нелегированная тонколистовая и ленты. Технические условия.
- ГОСТ 11036-75 Сталь сортовая электротехническая нелегированная.
- ГОСТ 21427.1-83 Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия.
- ГОСТ 21427.2-83 Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия.

Электротехнические стали могут классифицироваться по нескольким признакам:

1. Способу производства: холоднокатаная, горячекатаная.

2. Наличию анизотропии свойств: изотропная, анизотропная.

3. По степени легированности. Наиболее важным легирующим элементом является кремний. Кремний повышает электрическое сопротивление, снижая, таким образом, потери на перемагничивание. Содержание кремния ограничивают 4,8%, поскольку при дальнейшем росте его концентрации резко ухудшаются механические свойства стали.

4. По термической обработке: термически обработанная (ТО); без термической обработки.

5. По точности прокатки:

- нормальной точности по ширине;
- нормальной точности по толщине — Н;
- повышенной точности по толщине — П;
- повышенной точности по ширине — Ш.

По способу изготовления ЭТС делятся на горячекатаные и холоднокатаные. Несмотря на то, что химический состав ЭТС обычно не нормируется, они распределяются на группы в зависимости от массовой доли главного легирующего элемента (кремний или кремний совместно с алюминием), как это показано в табл. 1.

Стали могут изготавливаться с незащищённой металлической поверхностью или иметь электроизоляционное покрытие. Термостойкость обозначается в марке буквой Т, улучшение штампуемости – буквой Ш, нетермостойкое покрытие – буквой Н. Если для листовой стали проводился контроль внутренних дефектов, то добавляется буква У.

Таблица 1 - Группы ЭТС по химическому составу

Номер группы	0	1	2	3	4	5
Наименование группы	Нелегированная	Низколегированная	Слаболегированная	Среднелегированная	Повышеннолегированная	Высоколегированная
Si+Al, %	≤0,5	0,5-0,8	0,8-2,1	1,8-2,8	2,5-3,8	3,8-4,8
ρ, кг/м ³	7820	7800	7750	7700	7600	7550

Обозначение марки стали состоит из четырёх или пяти цифр с возможным добавлением одной-двух букв.

Первая цифра означает класс по структурному состоянию и виду прокатки:

- 1 – горячекатаная изотропная,
- 2 – холоднокатаная изотропная,
- 3 – холоднокатаная анизотропная.

Вторая цифра – группа стали по содержанию кремния (см. табл. 1).

Третья цифра – вид стали по основным нормируемым характеристикам магнитных свойств.

- 0 – это величина удельных магнитных потерь при частоте тока в 50 Гц и индукции 1,7 Тл, а также индукция при напряжённости поля 100 А/м;

- 1 – величина удельных магнитных потерь при частоте тока в 50 Гц и индукции 1 и 1,5 Тл, а также индукция при напряжённости поля 2500 А/м;

- 2 – величина удельных магнитных потерь при частоте тока от 200 Гц и индукции 0,75, 1 и 1,5 Тл;

- 6 – величина индукции в слабых полях при напряжённости поля 0,4 А/м;

- 7 – величина индукции в сильных полях при напряжённости поля 10 А/м;

- 8 - релейные стали.

Таким образом, первые три цифры определяют тип стали. Для всех сталей, кроме релейных, четвёртая (последняя) цифра означает уровень основных нормируемых характеристик: 1 – нормальный, 2 – повышенный, 3 – высокий, 4 и более – высшие уровни.

Для релейных сталей четвёртая и пятая цифры задают величину их характеристики (значение коэрцитивной силы в А/м).

По сортаменту и видам продукции ЭТС подразделяются следующим образом:

- для электромашин промышленной частоты тока (трансформаторы, генераторы, электродвигатели) они выпускаются в виде рулонов, листов и резаных лент;

- для аппаратов, работающих при повышенных частотах тока, – в виде лент;

- для магнитопроводов машин и приборов, работающих в режиме включение – отключение (реле, пускатели, электромагниты), – в виде листов, рулонов, лент и профилей из релейных сталей.

Для релейных сталей содержание основных элементов обычно не должно превышать: 0,04% углерода; 0,3% кремния; 0,3% марганца.

1.2. Особенности технологии производства ЭТС.

Выплавка электротехнической стали возможна как в кислородных конвертерах, так и в дуговых сталеплавильных печах. Однако, в конвертерах проще получить требуемое низкое содержание углерода.

При выплавке полупродукта для последующего легирования содержанием углерода в металле должно составлять не более 0,03 – 0,05%, марганца – 0,06 – 0,08%. При получении такого металла в кислородных конвертерах верхнего дутья содержание FeO в шлаке достигает 18 – 24%, что приводит к значительным потерям железа. Поэтому для выплавки полупродукта целесообразно использовать конвертеры комбинированного дутья с продувкой кислородом сверху и подачей малоактивного газа через днище конвертера. В этом случае содержание FeO в шлаке не превышает 14 – 15%. При этом низкое содержание марганца достигается путем увеличения массы конвертерного шлака и частичного его обновления.

Обычно полупродукт выпускают из конвертера с содержанием углерода 0,03 – 0,04%. При циркуляционном вакуумировании не раскисленной стали концентрацию углерода понижают до 0,02 – 0,03%. После этого на поверхность металла в вакуумной камере дают ферросилиций и продолжают обработку до тех пор, пока коэффициент дополнительной рециркуляции достигнет величины 1 – 2. Обычно этого достаточно для равномерного распределения кремния во всем объеме металла.

Особенность легирования электротехнической стали заключается в выделении большого количества тепла при вводе в металл ферросилиция. Даже при присадке твердого ферросилиция без предварительного нагрева тепловой эффект реакции растворения кремния с избытком компенсирует затраты тепла на плавление ферросплава. Так, например, при вводе в сталь 2% кремния с использованием 60%-ного ферросилиция в количестве 3,3% температура металла повышается на 40°C. Это позволяет выпускать металл из сталеплавильного агрегата без перегрева, необходимого для компенсации тепловых потерь при вакуумировании, и легировать сталь во время вакуумной обработки в ковше.

Холоднокатаная сталь подвергается отжигу, при которой происходит, в том числе, рекристаллизация. Ограничение рекристаллизации при отжиге достигается выделением по границам зерен металла ингибиторной фазы (MnS, AlN).

При сульфидном варианте ингибирования раскисление электротехнической стали проводят только кремнием, который одновременно является и легирующим элементом. При сульфонитридном варианте ингибирования для раскисления металла используют также алюминий.

При сульфидном варианте ингибирования электротехнической стали ингибиторной фазой являются включения MnS размером 25 – 50 нм. Для этого в стали должно быть достаточное количество серы. Однако, сера ухудшает пластические свойства стали, поэтому содержание ее не должно превышать 0,015%. Марганец, растворяясь в феррите, ухудшает электротехнические свойства стали, поэтому концентрация его в стали не должна превышать 0,1%. Оптимальное содержание марганца составляет 0,06 – 0,08 %. Содержание азота должно быть не более 0,005%.

При нитридном варианте ингибирования ингибиторной фазой являются включения AlN размером 10 – 50 нм. Для этого содержание азота в стали должно составлять 0,010 – 0,012%, а содержание серы – не более 0,003%.

Фосфор улучшает свойства изотропной электротехнической стали. Как и кремний, он сужает область устойчивого состояния γ -Fe. Однако, влияние фосфора значительно сильнее. При наличии в металле 0,03% С и 1,8% Si фосфор полностью выклинивает область γ -Fe уже при содержании его 0,21%. Вместе с тем замена кремния фосфором приводит к улучшению

штампуемости металла и способствует выравниванию твердости и механических свойств по ширине листа и длине рулона. В обычной изотропной электротехнической стали допускается наличие фосфора в количестве до 0,050%. Производят и легированную фосфором в количестве до 0,2% безкремнистую изотропную электротехническую сталь высокой штампуемости. Для легирования такой стали в ходе вакуумной обработки используют 15 – 16%-ный феррофосфор.

С целью удаления газов, очищения металла от неметаллических включений и дополнительной десульфурации на ряде заводов металл после выпуска подвергают внепечному вакуумированию или вакуумшлаковой обработке. Содержание серы при этом удается понизить до 0,002—0,003%, и практически исключается возможность возникновения рослости слитков.

Разливают ЭТС на слитки массой 0,5—12 т или на установках непрерывной разливки сразу отливают слябы размером 140x630 и 140x1000 мм.

Рассмотрим дальнейшую технологию получения ЭТС на примере получения листовой анизотропной (трансформаторной) стали на НовOLIпецком МК.

Холоднокатаная трансформаторная сталь имеет в направлении прокатки меньшие потери на гистерезис и вихревые токи, и более высокую магнитную индукцию, чем горячекатаная сталь. Это объясняется текстурой стали. Высокие магнитные свойства холоднокатаной трансформаторной стали объясняются также крупным зерном феррита, которое получается в результате высокотемпературного отжига. Чем крупнее зерно, тем меньше границ, препятствующих процессам перемагничивания, тем выше магнитные свойства стали. Следовательно, в технологии необходимо предусмотреть операцию выращивания зерна.

Различают электротехническую сталь с ребровой текстурой или текстурой Госса и электротехническую сталь с кубической текстурой. В ребровой текстуре (110) [100] диагональная плоскость куба (110) совпадает с плоскостью прокатки, а направление — ребро куба [100] совпадает с направлением прокатки (рис. 1). Таким образом, направление легкого намагничивания в решетке к-железа [100] совпадает с направлением прокатки, направление трудного намагничивания [111] находится под углом 45° к направлению прокатки, а направление среднего намагничивания [110] — под углом 90° к направлению прокатки. Следовательно, магнитные свойства стали с ребровой текстурой зависят от направления, в котором они измеряются. Более высокая магнитная индукция и низкие ваттные потери у такой стали будут в направлении холодной прокатки.

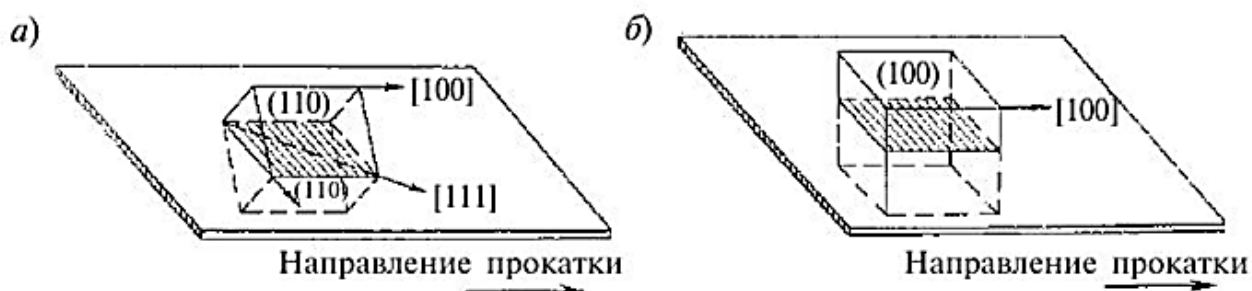


Рисунок 1 - Ребровая (а) и кубическая (б) текстуры электротехнической стали

Анизотропия магнитных свойств трансформаторной стали учитывается при производстве трансформаторов. Конструкция должна быть такова, чтобы магнитный поток в ней совпадал с направлением прокатки, т. е. с направлением наименьших ваттных потерь и максимальной магнитной индукции.

Для изготовления электрических машин и аппаратов с круговым магнитным потоком трансформаторная сталь со значительной анизотропией магнитных свойств не применяется.

Исходный сляб получают либо прокаткой из слитка на слябинге (из Запорожстали), либо отливкой на МНЛЗ (производится на НЛМК). Так как литые слябы склонны к образованию поверхностных трещин, то после разливки они отжигаются в камерных печах. Затем слябы нагреваются до температур около 1200 °С в обычных методических печах. Нагрев ведут с учетом того, что электротехнические стали склонны к обезуглероживанию и росту зерна, что может быть использовано для получения стали с низкими ваттными потерями. Горячую прокатку на многих заводах проводят на непрерывных широкополосных станах с температурой конца прокатки не ниже 815 °С. В интервале отмеченных температур трансформаторная сталь имеет высокую пластичность.

Толщина горячекатаного листа обычно находится в пределах 2,0—3,5 мм. Выбор толщины подката для последующей холодной прокатки сильно влияет на условия холодной прокатки. К горячекатаной полосе, помимо жесткого регламентирования по толщине, предъявляются также следующие требования:

- 1) строгое соблюдение размеров по ширине и длине полос;
- 2) качественное состояние кромок;
- 3) отсутствие внутренних напряжений, обуславливающих волнистость и коробоватость;
- 4) минимальный слой окалины на поверхности;
- 5) высокая чистота поверхности, отсутствие грязи на поверхности;
- 6) равномерная структура по всем трем направлениям;
- 7) высокие механические свойства.

На НЛМК для горячей прокатки трансформаторной стали используют стан 1200, состоящий из двух реверсивных клетей. Черновая универсальная клеть дуо имеет горизонтальные валки 850 мм и вертикальные валки 600 мм. Чистовая клеть кварто 620 мм снабжена моталками в печи (стан Стеккеля). Это позволяет регулировать скорости прокатки и режимы обжатию в более широких пределах, чем на НШПС, выдерживать стабильную температуру прокатки. Это особенно важно для прокатки высококремнистых сталей, имеющих узкий интервал пластичности. Но в целом станы Стеккеля не имеют существенных преимуществ перед НШПС. Более простые электротехнические марки стали прокатываются по обычной технологии на непрерывном широкополосном стане 2000.

При подготовке металла к холодной прокатке первой операцией может быть высокотемпературный черный отжиг. Он осуществляется в колпаковых электрических печах при температуре 760—850 °С без защитной атмосферы. За счет кислорода окалины и кислорода воздуха происходит выгорание углерода. Однако в колпаковых печах происходят неравномерные реакции по разным виткам, поэтому в современных цехах, имеющих АНО, обезуглероживание в колпаковых печах не производят. Эту операцию совмещают с операциями непрерывного отжига на АНО после первой прокатки.

В этом случае следующая технологическая операция — освобождение полосы от окалины — становится первой. Ее также осуществляют на АНТ, применяемых для обработки низкоуглеродистых сталей. Однако травление плотных окислов кремнийсодержащей стали осуществляется значительно медленнее, чем низкоуглеродистых. Для ускорения процесса травления большая роль отводится дрессировочному стану, входящему в состав АНТ. Кроме того, в процессе травления кремнийсодержащих сталей в растворе накапливается кремниевая кислота, замедляющая процесс травления. В связи с этим обработку полосы ведут путем подачи кислоты на поверхность листа струйным методом.

Режим холодной прокатки листа оказывает решающее влияние на конечные свойства трансформаторной стали. На НЛМК прокатку ведут в два этапа с суммарным обжатием на каждом этапе не меньше 60—65 %. Первую прокатку проводят на непрерывном 4-клетевом стане с толщины, например, 2,50 до 0,85 мм. Вторую прокатку проводят на одноклетевом реверсивном стане за четыре-пять проходов до конечной толщины. Для листов толщиной 0,10 и 0,35 мм для второй прокатки применяют 20-валковые станы, обеспечивающие высокую точность, плоскостность и чистоту поверхности листа. Для листов толщиной 0,5 мм

может быть применен одноклетевой реверсивный стан кварто.

В промежутке между прокатками осуществляют светлый отжиг полосы на АНО. Одновременно проводят обезуглероживание стали. Отжиг проводят в горизонтальных или башенных печах непрерывного действия. Как всегда, головная часть агрегата содержит набор установок, обеспечивающих непрерывность процесса. Далее следуют ванны для обезжиривания и очистки поверхности полосы от шламов. Печи для отжига позволяют получать равномерные свойства по длине полосы, а также регулировать процесс обезуглероживания путем изменения скорости движения полосы и состава печной атмосферы. Температура отжига в зависимости от толщины полосы составляет 750—850 °С. Обезуглероживающая атмосфера состоит из водорода, увлажненного водяным паром. В результате обезуглероживания количество углерода в стали сокращается от 0,02—0,05 до 0,004—0,008 %, что улучшает электротехнические характеристики и текстурообразование стали. При такой термообработке происходит также выгорание серы и других вредных примесей.

После второй прокатки лист порулочно на отдельном агрегате покрывают защитным слоем гидрата окиси магния, который должен предотвращать схватывание витков рулона при последующем отжиге. Далее проводится высокотемпературный отжиг в электрических колпаковых печах при температуре 1150—1180 °С в атмосфере чистого водорода или смеси 75 % H₂ + 25 % М₂. Такой отжиг предназначен для выращивания крупных зерен феррита в стали, а также для снятия наклепа, повышения однородности химсостава металла и уменьшения примесей. После длительной выдержки при указанных температурах, необходимой для получения требуемых крупных зерен, печь охлаждают до 600 °С. Затем под муфель подают защитный газ и переносят муфель на другой стенд, где он охлаждается до комнатной температуры. После термообработки рулоны поступают на непрерывный агрегат, на котором лист проходит чистку в моечно-сушильных установках и отпуск в проходных печах при температуре 700—800 °С. Этим устраняются остаточные напряжения в металле, возникшие при высокотемпературном отжиге, которые могут привести к искажению формы листа при хранении на складе.

Рулонная ЭТС может отжигаться в непрерывных печах. Например, башенных и горизонтальных протяжных.

Трансформаторную сталь поставляют заказчику с электроизоляционным двусторонним покрытием, что повышает ее антикоррозионные свойства, уменьшает температуру трансформаторов при эксплуатации и улучшает его характеристики. Нанесение покрытия осуществляют на непрерывном агрегате, который, как всегда, состоит из трех частей. В головной части осуществляются традиционные подготовительные операции по организации непрерывности процесса. Точечная сварка металла внахлест значительно сокращает расходы на эту операцию. На второй части агрегата лист пропускают через водный раствор ортофосфорной кислоты, слой которой на поверхности и является электроизоляционным покрытием. Затем лист проходит ванну с раствором окиси магния, который призван защитить электроизоляционный слой от механических воздействий. После сушки полоса проходит печь отпуска, входящую в состав агрегата, для устранения вновь появившихся остаточных напряжений. На третьей части агрегата вырезается место сварки и производится сматывание полосы в рулон.

Заключительными операциями являются резка на АПР или АКР, контроль качества продукции, упаковка, маркировка и т. д.

При производстве динамной стали, которая содержит кремний в пределах 1,3—1,8 %, нет проблем с пластичностью металла, поэтому ее в горячем состоянии прокатывают на НШПС 2000. Холодная прокатка производится на непрерывном 4-клетевом стане 1400, на котором допустима прокатка в холодном состоянии без отжига до 80 %. Можно ограничиться только одним циклом прокатки-отжига. Отжиг проводится в АНО, в котором совмещены процессы рекристаллизационного отжига и обезуглероживания (при 980—1030 °С во влажной атмосфере). В динамной стали нет ярко выраженной текстуры, нет столь

крупных зерен, как в трансформаторной стали. Поэтому все технологические операции осуществляются по более мягким режимам.

1.3. Практическая часть.

Для заданной марки электротехнической стали выполнить:

- 1) расшифровать марку стали;
- 2) по справочной литературе или по стандартам выписать нормируемые свойства стали;
- 3) назвать преимущественное назначение данной марки стали.

Пример марок ЭТС:

3411, 3412, 3410

2421, 2412, 2411, 2312

10880, 20880, 11880, 21880

1.4. Содержание отчета:

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Результаты выполнения практического задания по п. 1.3.

Вопросы для подготовки

1. Каково назначение электротехнических сталей?
2. С какой целью ЭТС легируют кремнием?
3. Какой термической обработке подвергаются листы и др. полуфабрикаты из ЭТС?
4. Можно ли применять вместо ЭТС техническое железо? Каковы его преимущества и недостатки?

2. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОВОДИМОСТЬ СПЛАВОВ

2.1. Классификация проводниковых материалов

Проводник – это вещество, внутри которого в случае электростатического равновесия электрическое поле равно нулю, а если поле отлично от нуля, то в проводнике возникает электрический ток. Проводники, используемые в современной технике, по агрегатному состоянию подразделяются на газообразные, жидкие, твердые. К газообразным проводникам относят пары веществ и газы при таком значении напряженности электрического поля, которое обеспечивает начало процесса ионизации молекул. Ионизированный газ представляет собой проводник, в котором перенос электрических зарядов осуществляется как электронами, так и ионами. Проводимость газов и паров широко используется в различных газоразрядных приборах.

Плазма - это сильно ионизированный газ, в единице объема которого число электронов равно числу положительных ионов.

Твердые металлы и их сплавы называют проводниками с электронной электропроводностью или проводниками I рода. Металлы в твердом состоянии являются кристаллическими веществами, для которых характерен особый вид металлической связи между атомами. Электропроводность металлов, как в твердом, так и в жидком состоянии обусловлена переносом электрических зарядов только электронами. Твердые проводники являются важнейшими проводниковыми материалами, широко применяемыми в радиоэлектронике и электротехнике.

К жидким проводникам относят различные растворы и расплавы солей, кислот, щелочей и других веществ, проводящие электрический ток. Их называют электролитами или проводниками II рода. При прохождении электрического тока через электролит, в который погружены электроды, электрические заряды переносятся вместе с частицами молекул (ионами) электролита. На электродах происходит выделение веществ из раствора. Электролиты широко используются в технике, в частности в технологии изготовления различных элементов радиоэлектронных устройств. Жидкими проводниками являются также расплавы металлов.

По характеру применения в радиоэлектронных приборах металлические материалы разделяют на материалы *высокой проводимости* (удельное электрическое сопротивление $\rho < 0,1$ мкОм*м) и материалы с *высоким сопротивлением* (удельное электрическое сопротивление $\rho > 0,3$ мкОм*м).

2.2. Свойства проводниковых материалов

К **механическим** свойствам относят: твердость, упругость, вязкость, пластичность, хрупкость, прочность, усталость.

Физико-химические свойства: цвет, плотность, температура плавления, линейное расширение, теплопроводность, тепловое расширение, электропроводность, магнитные свойства, поглощение газов, коррозионную стойкость и другие.

По плотности металлы разделяют на легкие и тяжелые. К легким относят те металлы, плотность которых меньше 5 г/см^3 (литий, натрий, алюминий). К тяжелым относят большинство металлов, используемых в технике (железо, медь, никель, олово).

Основными параметрами, определяющими свойства проводниковых материалов, являются:

- 1) удельное электрическое сопротивление ρ ;
- 2) температурный коэффициент удельного сопротивления α ;
- 3) температурный коэффициент линейного расширения.

Удельное электрическое сопротивление ρ проводника с сопротивлением R постоянным поперечным сечением S и длиной l вычисляют по формуле:

$$\rho = \frac{RS}{l}$$

Температурный коэффициент удельного сопротивления проводников, измеряемый

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

Таким образом, удельное сопротивление металлического проводника при повышенной температуре может быть рассчитано по формуле:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha T),$$

Для проводников, используемых в электровакуумных приборах, важной механической характеристикой материала является температурный коэффициент линейного расширения, позволяющий определить изменение любых геометрических размеров изделий (длины, ширины, толщины) при нагревании. Величина его определяется по формуле:

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$$

2.3. Промышленные проводниковые материалы

В зависимости от удельного электрического сопротивления и применения проводниковые материалы подразделяют на следующие группы:

- 1) металлы и сплавы высокой проводимости,
- 2) припой,
- 3) сверхпроводники,
- 4) контактные материалы,
- 5) сплавы с повышенным электросопротивлением.

К материалам первой группы предъявляются следующие требования: минимальное значение удельного электрического сопротивления, высокие механические свойства, способность легко обрабатываться, что необходимо для изготовления проводов малых и средних сечений; коррозионная стойкость. К ним относятся: цветные металлы – серебро, медь, алюминий, золото, цинк, олово, магний, свинец; черные металлы – железо.

Медь и её сплавы

Медь является одним из лучших токопроводящих материалов. Плотность меди 8,95 г/см³ при 20°С, температура плавления 1083° С. Медь химически мало активна, но легко растворяется в азотной кислоте, а в разбавленной соляной и серной кислотах растворяется только в присутствии окислителей (кислорода). На воздухе медь быстро покрывается тонким слоем окиси темного цвета, но это окисление не проникает вглубь металла и служит защитой от дальнейшей коррозии.

Медь хорошо поддается ковке и прокатке без нагрева.

Свойства меди:

- малое удельное электрическое сопротивление,
- высокая механическая прочность,
- удовлетворительная коррозионная стойкость,
- хорошая паяемость и свариваемость,
- хорошая обрабатываемость.

Для изготовления электрических проводников применяется электролитическая медь в слитках, содержащих 99,93% чистой меди.

Сплавы меди с примесями олова, алюминия, кремния, бериллия и других элементов, среди которых цинк не является основным легирующим элементом, называют **бронзами**.

Например: кадмиевую бронзу (0,9% кадмия, остальное медь) применяют для контактных проводов, сварочных электродов при контактных методах сварки.

Фосфористая бронза (6,5% олова, 0,15% фосфора, остальное медь) отличается низкой электропроводностью. Из неё изготавливают различные малоответственные токопроводящие пружины в электроприборах.

Латуни представляют собой медные сплавы, в которых основным легирующим элементом является цинк (до 43%). Латуни хорошо штампуются и легко подвергаются глубокой вытяжке (колпачки радиотехнических ламп, экраны корпусов).

Алюминий и его сплавы

Алюминий является вторым после меди материалом по применяемости в электротехнике. Алюминий относится к так называемым легким металлам (плотность литого алюминия около 2600, прокатанного - 2700 кг/м³).

Свойства алюминия:

- удельное электрическое сопротивление ρ алюминия (при содержании примесей не более 0,05%) в 1,63 раза больше, чем у меди, поэтому замена меди алюминием не всегда возможна, особенно в радиоэлектронике;

- алюминий приблизительно в 3,5 раза легче меди;

- из-за высоких значений удельной теплоемкости и теплоты плавления алюминия нагревание алюминиевого провода до расплавления требует больших затрат энергии, чем нагревание и расплавление такого же количества меди;

- даже при одинаковой стоимости алюминия и меди в слитках стоимость алюминиевой проволоки почти вдвое ниже, однако использование алюминия для изолированных проводов в большинстве случаев менее выгодно из-за затрат на изоляцию;

- алюминий на воздухе активно окисляется и покрывается тонкой оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением, которая предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов;

- алюминий менее дефицитен, чем медь;

- существенным недостатком алюминия как проводникового материала является низкая механическая прочность, для ее повышения алюминий подвергается механической обработке;

- прокатка, протяжка и отжиг алюминия аналогичны соответствующим операциям для меди;

- примеси значительно снижают проводимость алюминия.

Алюминий уступает меди в электрической проводимости и прочности, но он значительно легче, больше распространен в природе. При замене медного провода алюминиевым последний должен иметь диаметр в 1,3 раза больше, но масса его и в этом случае будет в 2 раза меньше. Так же, как и медь, алюминий используют или в отожженном, или нагартованном состоянии.

Алюминий высокой степени чистоты (примесей не более 0,001...0,01%) марок А999 и А995 используют для изготовления анодной и катодной фольги электролитических конденсаторов и в микроэлектронике для получения тонких пленок.

Менее чистый алюминий марок А97 и А95 (примесей не более 0,03 %) используют для корпусов электролитических конденсаторов, статорных и роторных пластин воздушных конденсаторов. Из алюминиевой фольги и ленты изготавливают экраны радиочастотных коаксиальных кабелей.

Из алюминия изготавливают провода, шины, трубки, листовой материал, фольгу и прочие изделия. Проволока выпускается диаметром от 0,06 до 8 мм, а шины – толщиной от 3 до 12 мм при ширине от 10 до 120 мм. Алюминиевая

фольга толщиной от 0,006 до 0,15 мм используется в качестве обкладок в бумажных и пленочных конденсаторах разных типов.

Алюминий широко применяется в микроэлектронике для формирования токоведущих дорожек, контактных площадок, а также, в окисленном виде – для изоляции элементов и в качестве межуровневой изоляции в многослойных структурах.

Промышленность выпускает алюминиевую проволоку следующих марок: АТП – твердая повышенной прочности, АТ - твердая, АПТ - полутвердая, АМ - мягкая. Основные свойства алюминиевой проволоки приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1 – Основные свойства алюминиевой проволоки

Марка алюминия	АТ	АМ
Плотность D , кг/м ³	2600... 2700	2600... 2700
Удельное электрическое сопротивление ρ , мкОм-м	не более 0,0295	не более 0,0290
Предел прочности при растяжении a , МПа	не менее 160...170	не менее 80
Относительное удлинение при разрыве, %	1,5... 2,0	10... 18

Железо – значительно уступает меди и алюминию по проводимости, но имеет большую прочность, что в некоторых случаях оправдывает его применение как проводникового материала. Используют низкоуглеродистые качественные стали ($C < 0,15\%$), а также стали обыкновенного качества. Эти стали идут на изготовление шин, трамвайных рельсов, рельсов метро и железнодорожных дорог с электрической тягой. Сечение провода определяется не электрической проводимостью, а механической прочностью материала.

Неметаллические проводниковые материалы.

Из числа твердых неметаллических проводниковых материалов наибольшее значение имеют материалы на основе углерода (электротехнические угольные изделия, сокращенно электроугольные изделия).

К электроугольным изделиям, применяемым в электротехнике и технике, связи, относятся: электрические щётки для коллекторов электромашин, электроугли, применяемые в лампах и электропечах, электроды - в гальванических элементах, угольные мембраны, угольные порошки. Из угля делают высокоомные резисторы, разрядники для телефонных сетей; угольные изделия применяют в электровакуумной технике.

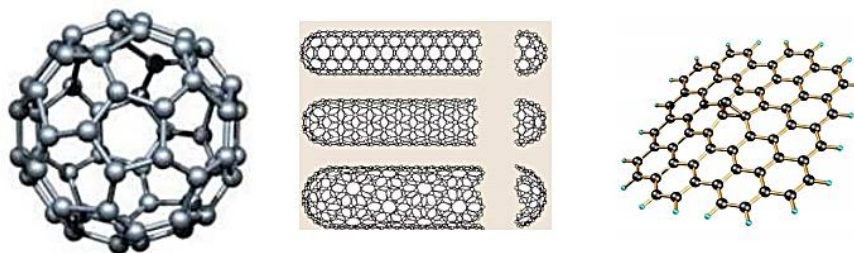
Новыми углеродными проводниками являются наноразмерные материалы, структура которых основана на соединении шестичленных углеродных колец пятичленными циклами.

Фуллерены – шарообразные высокомолекулярные структуры (рис.1). Одна из формул C_{60} .

Углеродные **нанотрубки** – цилиндрические полые структуры диаметром 1...100 нм и длиной несколько микрометров. Могут быть в многостенном

(МУНТ) и одностенном (ОУНТ) варианте. По сути, нанотрубки – это лист **графена**, свернутый в трубочку.

Эти материалы обладают высокими тепло- и электропроводностью, механической прочностью. Возможно гибкое регулирование этих свойств благодаря квантоворазмерным эффектам. Эти материалы могут применяться в качестве наполнителей для композитов с необычными свойствами. В электротехнике их применение связано с производством полупроводников, вакуумных приборов, суперконденсаторов, топливных элементов, в зондовых технологиях.



а) фуллерены б) углеродные нанотрубки (УНТ) в) графен

Рисунок 1 – Схемы структуры фуллерена (а) нанотрубки (б), графена (в)

В настоящее время промышленность производит полимеры и резины, армированные углеродными нанотрубками. Такие материалы становятся проводниками и приобретают необычные свойства.

Контактолы, используемые в качестве токопроводящих клеев, красок, покрытий и эмалей, представляют собой маловязкие либо пастообразные полимерные композиции. В качестве связующего вещества в них используют различные синтетические смолы (эпоксидные, фенол-формальдегидные, кремнийорганические и др.), а токопроводящим наполнителем являются мелкодисперсные порошки металлов (серебра, никеля, палладия). Необходимая вязкость Контактолов перед их нанесением на поверхность обеспечивается введением растворителей (ацетон, спирт и т.п.).

Большую роль в формировании контактов между частицами металлов в композиции играют внутренние напряжения, возникающие при отверждении в результате усадки из-за улетучивания растворителя и полимеризации связующего вещества. Внутренние напряжения приводят к появлению контактного давления между частицами наполнителя, что обуславливает резкое уменьшение контактных сопротивлений.

Контактолы используют для получения контактов между металлами, металлами и полупроводниками, для создания электродов на диэлектриках, экранирования помещений и приборов от помех, для токопроводящих коммуникаций на диэлектрических подложках, в гибких волноводах и других изделиях электронной промышленности.

2.4. Практическая часть.

Для заданных свойств проводника выполнить следующие расчеты:

1) найти в справочной литературе подходящий по свойствам проводниковый материал;

2) рассчитать массу и сопротивление 1 погонного метра проводника из этого материала диаметром 2 мм;

3) рассчитать электрическое сопротивление и реальный размер этого проводника при температуре, равной 0,4Тпл.

Варианты заданий и необходимые справочные данные помещены в приложениях.

2.5. Содержание отчета:

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Результаты выполнения практического задания по п. 1.3.

Вопросы для подготовки

1. Перечислите основные свойства проводниковых материалов?
2. Какое значение для проводников имеют механические свойства?
3. В каких случаях необходимо учитывать термическое расширение проводников?
4. Как, по вашему мнению, явление термического расширения влияет на сопротивление проводника?

3. МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ. ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА СТАЛЕЙ.

3.1. Группы магнитомягких материалов

К магнитомягким относят материалы, обладающие свойствами ферромагнетика или ферримагнетика. Причём их коэрцитивная сила по индукции, (в соответствии с ГОСТ 19693-74 «Материалы магнитные. Термины и определения») составляет не более 4 кА/м. Такие материалы также обладают высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на гистерезис.

Магнитомягкие материалы используются в качестве сердечников трансформаторов, электромагнитов, в измерительных приборах и в других случаях, где необходимо при наименьшей затрате энергии достигнуть наибольшей индукции. Для уменьшения потерь на вихревые токи в трансформаторах используют материалы с повышенным удельным электрическим сопротивлением. Обычно магнитопроводы этих устройств собираются из отдельных изолированных друг от друга тонких листов.

Перечислим основные группы магнитомягких материалов.

Железо (низкоуглеродистая сталь). Технически чистое железо обычно содержит небольшое количество примесей углерода, серы, марганца, кремния и других элементов, ухудшающих его магнитные свойства. Благодаря сравнительно низкому удельному электрическому сопротивлению технически чистое железо используется довольно редко, в основном для магнитопроводов постоянного магнитного потока. Обычно технически чистое железо изготавливается рафинированием чугуна в мартеновских печах или конверторах и имеет суммарное содержание примесей до 0,08—0,1%. За рубежом такой материал известен под названием «армко-железо».

Низкоуглеродистая электротехническая листовая сталь — это одна из разновидностей технически чистого железа, выпускается в виде листов толщиной от 0,2 до 4 мм, содержит не свыше 0,04% углерода и не свыше 0,6% других примесей. Максимальное значение магнитной проницаемости для различных марок — не менее 3500—4500, коэрцитивная сила — соответственно не более 100—65 А/м.

Особо чистое железо (менее 0,05% примесей), может быть получено двумя способами:

1. Электролитическое железо изготавливают электролизом раствора сернокислого или хлористого железа, причем анодом служит чистое железо, катодом — пластина мягкой стали. Осажденное на катоде железо (толщина слоя 4—6 мм) после тщательной промывки снимают и измельчают в порошок в шаровых мельницах, после чего производят вакуумный отжиг или переплавку в вакууме.

2. Карбонильное железо получают термическим разложением пентакарбонила железа согласно уравнению $\text{Fe}(\text{CO})_5 = \text{Fe} + 5\text{CO}$. Пентакарбонил железа представляет собой жидкость, получаемую воздействием окиси

углерода на железо при температуре около 200°C и давлении около 15 МПа. Карбонильное железо имеет вид тонкого порошка, что делает его весьма удобным для изготовления прессованных высокочастотных магнитных сердечников.

Листовая электротехническая сталь является основным магнитно-мягким материалом массового потребления. Введением в состав этой стали кремния достигается повышение удельного сопротивления, что дает снижение потерь на вихревые токи. Кроме того, присутствие в стали кремния способствует выделению углерода в виде графита, а также почти полному раскислению стали. Это дает увеличение μ , уменьшение H_c и снижение потерь на гистерезис. Вместе с тем кремний неблагоприятно влияет на механические свойства железа, увеличивая его хрупкость и затрудняя прокатку в листы и штамповку. При содержании кремния до 4% сталь обладает еще достаточно хорошими механическими свойствами, но при содержании кремния выше 5% она становится очень хрупкой. Путем комбинированной горячей и холодной прокатки кремнистой стали и особой термической обработки можно изготовить текстурованную сталь крупнокристаллического строения, причем кристаллы оказываются ориентированными таким образом, что ось их легкого намагничивания совпадает с направлением прокатки. Магнитные свойства такой стали в направлении прокатки значительно выше, чем стали, не подвергавшейся подобной обработке.

Высоколегированная сталь находит применение главным образом для сердечников трансформаторов. Применение этой стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить массу и габаритные размеры на 20—25%, а в радио трансформаторах — на 40%.

К характеристикам электротехнической стали относятся:

- 1) магнитная индукция B с числовым индексом, который определяет соответствующую напряженность магнитного поля (кА/м);
- 2) суммарные удельные потери мощности в ваттах на килограмм стали (отдельные листы стали изолированы друг от друга), находящейся в переменном магнитном поле, обозначаемые буквой P с индексом в виде дроби, числитель которой представляет собой амплитудное значение магнитной индукции в теслах, а знаменатель — частоту в герцах.

Пермаллои. Это железоникелевые сплавы, обладают весьма большой начальной магнитной проницаемостью в области слабых полей, что связано с практическим отсутствием у них анизотропии и магнитострикции. Различают высоко никелевые и низконикелевые пермаллои. Высоко никелевые пермаллои содержат 72—80% Ni, низконикелевые 40—50% Ni.

Очень легкую намагничиваемость пермаллоев в слабых полях объясняют практическим отсутствием у них анизотропии. Магнитные свойства пермаллоев очень чувствительны к внешним механическим напряжениям, зависят от химического состава и наличия инородных примесей в сплаве, а также очень резко меняются от режимов термообработки материала (температуры, скорости нагрева и охлаждения, состава окружающей среды и т. д.). Термическая

обработка высоконикелевых пермаллоев сложнее, чем низконикелевых. Индукция насыщения высоко никелевых пермаллоев почти в два раза ниже, чем у электротехнической стали, и в полтора раза ниже, чем у низконикелевых пермаллоев. Магнитные проницаемости высоко никелевых пермаллоев в несколько раз выше, чем у низконикелевых, и намного превосходят проницаемости электротехнических сталей. Удельное сопротивление высоко никелевых пермаллоев почти в 3 раза меньше, чем низконикелевых, поэтому при повышенных частотах предпочтительно использовать низконикелевые пермаллои. Кроме того, и магнитная проницаемость пермаллоев сильно снижается с увеличением частоты, и тем резче, чем больше ее первоначальное значение. Это объясняется возникновением в материале заметных вихревых токов из-за небольшого удельного сопротивления. Стоимость пермаллоев определяется содержанием в их составе никеля.

Альсиферы. Сплавы железа с кремнием и алюминием. Оптимальный состав альсифера: 9,5%Si, 5,6%Al, остальное Fe. Такой сплав отличается твёрдостью и хрупкостью, но может быть изготовлен в виде фасонных отливок. Основные свойства альсифера: $\mu=35500$, $\mu_{\text{макс}}=120000$, $H_c=1,8$ А/м, $\rho=0,8$ мкОм*м, т. е. не уступают свойствам высоконикелевых пермаллоев. Изделия из альсифера: магнитные экраны, корпуса приборов и т. д.— изготавливаются методами литья с толщиной стенок не менее 2—3 мм из-за хрупкости сплава. Эта особенность ограничивает применение данного материала. Благодаря хрупкости альсифера его можно размалывать в порошок и использовать наряду с карбонильным железом для изготовления высокочастотных прессованных сердечников.

Магнитодиэлектрики представляют собой одну из разновидностей магнитных материалов, предназначенных для использования при повышенных и высоких частотах, так как они характеризуются большим удельным электрическим сопротивлением, а следовательно, и малым тангенсом угла магнитных потерь. Магнитодиэлектрики получают путём прессовки порошкообразного ферромагнетика с изолирующей зёрна друг от друга органической или неорганической связкой. В качестве основы применяют карбонильное железо, размолотый альсифер и др. Изолирующей связкой служат фенолоформальдегидные смолы, полистирол, стекло и т. п. От основы требуется наличие высоких магнитных свойств, от связки — способность образовывать между зёрнами сплошную, без разрыва электроизоляционную плёнку. Такая плёнка должна быть по возможности одинаковой толщины и должна прочно связывать зёрна между собой. Магнитодиэлектрики характеризуют эффективной магнитной проницаемостью, которая всегда меньше μ ферромагнетика, составляющего основу данного магнитодиэлектрика. Это объясняется двумя причинами: наличием неферромагнитной связки и тем, что магнитную проницаемость магнитодиэлектриков часто приходится измерять у готовых сердечников, а не у тороидов.

Однако основным материалом для изготовления магнитопроводов

является ЭТС. Сортамент и технология производства ЭТС были рассмотрены на первом занятии.

Ниже (табл. 1 – 6) приводятся основные показатели магнитных свойств ЭТС различных марок. Здесь и далее частота задаётся в герцах, магнитная индукция – в теслах. Таким образом, например, P1,5/50 означает величину удельных магнитных потерь в Вт/кг при магнитной индукции, равной 1,5 Тл, и частоте тока 50 Гц.

В таблицах 1-4 приведены основные свойства анизотропных и изотропных сталей

Таблица 1 - Удельные показатели магнитных свойств анизотропной тонколистовой стали

Марка стали	Толщина, мм	P1/50	P1,5/50	P1,7/50	B, Тл, при H, А/м, не менее	
					100	2500
Вт/кг, не более						
3311	0,8	4,0	—	—	—	1,75
3311	0,7	3,8	—	—	—	1,75
3411	0,5	—	2,45	—	—	1,75
3412		—	2,00	—	—	1,80
3413		—	1,75	—	—	1,85
3414		—	1,50	—	—	1,88
3411	0,35	—	1,75	—	—	1,75
3412		—	1,50	—	—	1,80
3413		—	1,30	—	—	1,85
3404		—	—	1,60	1,60	—
3405		—	—	1,50	1,61	—
3406		—	—	1,43	1,62	—
3407		—	—	1,36	1,72	—
3408		—	—	1,30	1,74	—
3409		—	—	1,24	1,74	—
3412	0,3	—	1,30	—	—	1,80
3413		—	1,19	—	—	1,85
3404		—	—	1,50	1,60	—
3405		—	—	1,40	1,61	—
3406		—	—	1,33	1,62	—
3407		—	—	1,26	1,72	—
3408		—	—	1,20	1,74	—
3409	—	—	1,14	1,74	—	
3413	0,27	—	1,15	—	—	1,85
3405		—	—	1,38	1,61	—
3406		—	—	1,27	1,62	—
3407		—	—	1,20	1,72	—
3408		—	—	1,14	1,74	—
3409	—	—	1,08	1,74	—	

Таблица 2 - Магнитные свойства изотропной тонколистовой стали

Марка стали	Толщина, мм	$P_{1,5/50}$, Вт/кг, не более	B_{2500} , Тл, не менее	ΔB_{2500} , Тл, не более
2421	0,27	$P_{1/400} \leq 19,5$	1,47	0,16
2431	0,35	2,5	1,50	0,16
2412		2,7	1,50	
2411		3,0	1,50	
2414	0,5	2,7	1,49	0,16
2413		2,9	1,50	
2412		3,1	1,50	
2411		3,6	1,49	
2312		3,8	1,58	
2216		4,0	1,60	
2215		4,5	1,64	
2214		4,8	1,62	
2213		5,0	1,65	
2212		5,0	1,60	
2211	5,5	1,56		
2112	6,0	1,62		
2111	7,0	1,60		
2013	6,5	1,65		
2012	7,0	1,62		
2011	8,0	1,60		

Таблица 3 - Магнитные свойства тончайшей ленты из анизотропной ЭТС

Марка стали	Толщина, мм	$P_{1,5/400}$		H_c , А/м, не более	B , Тл, при H , А/м, не менее					
		Вт/кг, не более			40	80	200	400	1000	2500
3421	0,15	23	—	0,34	0,50	0,80	1,10	1,30	1,45	1,70
	0,08	22	—	0,36	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
	0,05	—	24	0,40	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
3422	0,15	20	—	0,32	0,60	0,95	1,25	1,40	1,55	1,75
	0,08	19	—	0,32	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
	0,05	—	24	—	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
3423	0,15	19	—	0,26	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,08	17	—	0,28	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
	0,05	—	22	—	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
3424	0,15	18	—	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,08	16	—	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,05	—	22	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
3425	0,15	17	—	—	1,10	1,35	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,08	15	—	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,05	—	20	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82

Таблица 4 - Значения магнитной индукции и проницаемости для релейных сталей

Марка	Толщина	Коэрцитивная	Максимальная	Магнитная индукция, В, Тл,
-------	---------	--------------	--------------	----------------------------

стали	листа, мм	сила, Н _c , А/м, не более	я магнитная проницаемост ь, μ, мГн/м	при напряженности магнитного поля, Н, А/м					
				500	1000	2500	5000	10000	30000
				не менее					
10895 20895 11895 21895	0,1-3,9	95,0	3,8	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05
10880 20880 11880 21880	0,1-3,9	80,0	5,0						
10860 20860 11860 21860	0,1-3,9	60,0	5,6						
10848 20848 11848 21848	0,7-3,9	48,0	6,0						
10832 20832 11832 21832	0,7-3,9	32,0	6,3						

Механические свойства ЭТС существенно влияют на их способность к обработке (штамповке, обточке, прокатке) и на себестоимость изделия.

Должен быть обеспечен определённый запас пластичности, чтобы предотвратить поломку пластин и лент магнитопроводов при вырезке, сборке и навивке. В табл. 5, 6 приведены сведения о механических характеристиках и необходимом числе перегибов для листов и лент основных ЭТС.

Таблица 5 - Механические свойства тонколистовых изотропных и анизотропных ЭТС

Марки	σ_b , Н/мм ²	δ , %	HV ² , кгс/мм ²
<i>Изотропные стали</i>			
2011-2013	290-490	15-35	120-160
2111, 2112	300-450	20-35	110-145
2211-2216	300-450	20-35	120-145
2312	330-470	20-35	120-160
2411-2414	370-600	15-30	140-210
<i>Анизотропные стали</i>			
3311	<u>280-335</u> 335-380	<u>10-16</u> 35-50	140-160
3411-3414	<u>295-345</u> 345-390	<u>9-15</u> 30-50	145-170
3404-3406	<u>295-345</u>	<u>9-15</u>	145-175

	345-390	30-50	
3407-3409	<u>290-340</u> 360-395	<u>10-14</u> 40-50	145-175
<i>1 В числителе – вдоль прокатки, в знаменателе – поперёк прокатки.</i>			
<i>2 При нагрузке 50 Н.</i>			

Таблица 7.

Таблица 6 - Число перегибов (не менее) тонких листов и лент из ЭТС

Анизотропные стали		Изотропные стали				Анизотропная тончайшая лента ²	
Толщина, мм	Число перегибов	Марки стали	Число перегибов при толщине, мм			Толщина, мм	Число перегибов
			0,27	0,35	0,50		
0,27	4(1)	2111, 2112	—	—	10(3)	0,05	5(2)
0,30	4(1)	2211, 2212	—	—	10(2)	0,08	5(2)
0,35	3(1)	2311, 2312	—	—	7(2)	0,15	5(2)
0,50	2(1)	2411–2413	—	3(2)	3(1)	—	—
0,80	(1)	2421	3(1)	—	—	—	—

1 В скобках – минимальное число для каждого образца.
2 Из ЭТС марок 3421–3425.
Примечание . Число перегибов – среднее арифметическое на основе испытаний четырёх образцов.

Отметим, что для каждой группы анизотропных сталей требуемое число перегибов зависит лишь от толщины листа.

Что касается релейных сталей, то они должны иметь при испытаниях на растяжение $\sigma_b \geq 270$ Н/мм², $\delta \geq 24\%$, $\Psi \geq 60\%$, а твёрдость НВ ≤ 131 .

3.2. Практическая часть.

Для заданных магнитных свойств листовой ЭТС выполнить следующее:

- 1) выбрать по справочной литературе подходящую по свойствам ЭТС;
- 2) выписать в отдельную таблицу все остальные свойства этого материала;
- 3) по сортаменту сталей, приведенному в соответствующем ГОСТе выбрать оптимальную толщину листа. При этом необходимо помнить, что более тонкий лист позволяет уменьшить потери на перемагничивание.

Варианты заданий

№	В, Тл (не менее)	P^I , Вт/кг (не более)	Прочие свойства
1	1,7	5	
2	1,6	6,5	Нс не более 60 А/м
3	1,5	2,5	Нс не более 80 А/м

Примечание: 1) при напряженности поля 2500 А/м

3.3. Содержание отчета:

1. Наименование и цель работы.

2. Краткие теоретические сведения.
3. Результаты выполнения практического задания по п. 3.3.

Вопросы для подготовки

1. Поясните практическое значение величины магнитной индукции ЭТС?
2. Какое значение для ЭТС имеет величина коэрцитивной силы?
3. Поясните причины, по которым возникают потери мощности в магнитопроводах. Какие факторы оказывают влияние на величину потерь?
4. Почему происходит нагрев трансформатора при работе? Как можно понизить температуру нагрева?

Приложение А

Задания и справочные материалы для выполнения практического задания 2

Таблица А.1 – Варианты заданий к практическому занятию

1. Проводник с сопротивлением не более и плотностью не более 9 г/см^3 .
2. Проводник с сопротивлением не более $20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, плотность не регламентируется.

№	Удельное сопротивление (не более), $\text{Ом}\cdot\text{м}$	Плотность (не более), г/см^3	Другие требования
1	7	9	-
2	20	Не реглам.	Повышенная коррозионная стойкость в серной к-те
3	3	5	Минимальная стоимость
4	1,5	Не реглам.	Стоимость не реглам.
5	Не реглам.	Не реглам.	Сохранение прочности при повышенных температурах

Таблица А.2 – Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления некоторых металлов при 0°C

Проводник	ρ_0 , $10^{-8}\text{Ом}\cdot\text{м}$	α , 10^{-3}град^{-1}
Алюминий (Al)	2,5	4,60
Вольфрам (W)	4,89	35,10
Железо (Fe)	8,60	6,51
Золото (Au)	2,06	4,02
Медь (Cu)	1,55	4,33
Молибден (Mo)	5,05	4,73
Никель (Ni)	6,14	6,92
Палладий (Pd)	9,77	3,77
Свинец (Pb)	19,2	4,28
Серебро (Ag)	1,49	4,30

Таблица А.3 – Некоторые физические свойства металлов

№ п/п	Me	$T_{\text{пл.}}$, $^\circ\text{C}$	Плотность ρ , кг/м^3	Мол. масса μ , кг/моль	ТКЛР α , град^{-1}	Уд. сопротивление, ρ_0 , $\text{Ом}\cdot\text{м}$	ТКС α_0 , град^{-1}
1	Cu	1083	8930	$63,55 \cdot 10^{-3}$	$16,6 \cdot 10^{-6}$	$1,67 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
2	Ag	960	10500	$107,87 \cdot 10^{-3}$	$18 \cdot 10^{-6}$	$1,47 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
3	Au	1063	19300	$196,97 \cdot 10^{-3}$	$14 \cdot 10^{-6}$	$2,07 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
4	Be	1283	1840	$9,012 \cdot 10^{-3}$	$10,5 \cdot 10^{-6}$	$2,78 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
5	Mg	1244	1741	$24,31 \cdot 10^{-3}$	$25,9 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
6	Ca	850	1550	$40,08 \cdot 10^{-3}$	$22,5 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$

7	Sr	770	2540	$87,62 \cdot 10^{-3}$	$20,6 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
8	Ba	710	3780	$137,33 \cdot 10^{-3}$	$19,5 \cdot 10^{-6}$	$36 \cdot 10^{-8}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$
9	Zn	419	6920	$65,38 \cdot 10^{-3}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$5,92 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
10	Cd	321	8648	$112,41 \cdot 10^{-3}$	$29 \cdot 10^{-6}$	$7,4 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
11	Al	660	2700	$26,98 \cdot 10^{-3}$	$23,1 \cdot 10^{-6}$	$2,69 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
12	Ga	29	6093	$69,72 \cdot 10^{-3}$	$18,1 \cdot 10^{-6}$	$13,7 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
13	In	156	7280	$114,82 \cdot 10^{-3}$	$30,5 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$
14	Pb	327	11342	$207,20 \cdot 10^{-3}$	$28,3 \cdot 10^{-6}$	$20,6 \cdot 10^{-8}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$
15	Sn	231	7290	$118,69 \cdot 10^{-3}$	$26,2 \cdot 10^{-6}$	$12,8 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$