|  |  |
| --- | --- |
| Лабораторная работа  **Магнитные и сверхпроводящие материалы**  Cуществуют магнитвердые и магнитомягкие материалы. Среди магнитотвердых материалов наибольший интерес представляют сплавы с высокой одноосной анизотропией на основе РЗМ полей рассеивания на основе Fe – Cr – Co новые технологии получения анизотропных высокоэнергетических магнитов из этих сплавов. Создание нанокристаллической структуры с ультра мелким размером зерен и обусловленным этим уникальным комплексом физических и механических свойств следует отнести к одной из основных тенденций развития современного материаловедения. Особое место по перспективам развития занимают пленочные постоянные магниты.  Среди магнитомягких материалов большой интерес вызывают сплавы с аморфной, нано – и микрокристаллической структурой, а также традиционные электротехнические стали с микрокристаллической структурой, а также традиционные электротехнические стали с низкими потерями на перемагничивание, различные сплавы на основе Fe – Ni и Co с высокими значениями магнитной проницаемости, индукцией насыщении и прямоугольностью петли гистерезиса.  .Среди ферритов новый импульс в развитии получили ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса для использования в импульсной технике и в СВЧ – устройствах в сочетании с высокотемпературными сверхпроводящими пленками  **Основные магнитные характеристики материалов**  Для характеристики магнитных свойств материалов используются следующие понятия:  **В – магнитная индукция** (плотность магнитного потока). Магнитная индукция материала является векторной суммой магнитных индукций внешнего (намагничивающего) и внутреннего магнитных полей;  **Н – напряженность магнитного поля**, А/м;  **M – относительная магнитная проницаемость** (или магнитная проницаемость) – величина безразмерная. Относительная магнитная проницаемость характеризует способность материала намагничиваться. Она показывает во сколько раз магнитная индукция поля, созданного в данном материале, больше, чем в вакууме.  По магнитным свойствам все материалы традиционно разделяли на три основные группы: диамагнитные (диамагнетики), парамагнитные (парамагнетики) и ферромагнитные (ферромагнетики). Значительно позже в самостоятельные группы были выделены еще два вида магнитных материалов: антиферромагнитные (антиферромагнетики) и ферримагнитные (ферримагнетики).  Диа-, пара- и антиферромагнетики относятся к слабомагнитным, а ферро- и ферримагнетики – к сильномагнитным материалам.  **Диа-, пара-,ферро-,ферри- и антиферромагнетики**  Всякое вещество является **магнетиком**, т. е. оно способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться).  https://studfiles.net/html/2706/129/html_SJDKKEeTIl.U8WH/img-aVGEor.jpg  электронные орбиты атома под действием внешнего магнитного поля совершают прецессионное движение, которое эквивалентно круговому току. у атома появляется составляющая магнитного поля, направленная проти­воположно внешнему полю. Наведенные составляющие магнитных полей атомов (молекул) складываются и образуют собственное магнитное поле вещества, ослабляющее внешнее магнитное поле. Этот эффект получил название **диамагнитного эффекта**, а вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле против направления поля, называются **диамагнетиками**.  В отсутствие внешнего магнитного поля диамагнетик немагнитен,. К диамагнетикам относятся многие металлы (например, Bi, Ag, Au, Сu), большинство органических соединений, смолы, углерод и т. д.  **парамагнитные** — вещества, нама­гничивающиеся во внешнем магнитном поле по направлению поля.  вследствие теплового движе­ния молекул их магнитные моменты ориентированы беспорядочно, поэтому парамаг­нитные вещества магнитными свойствами не обладают. парамагнетик намагничивается, создавая собственное маг­нитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его. Этот эффект называется **парамагнитным**. При ослаблении внешнего магнитного поля да нуля ориентация магнитных моментов вследствие теплового движения нарушается и парамагнетик размагничивается. К парамагнетикам относятся редкоземельные эле­менты, Pt, Аl и т.д.  **ферромагнетики** при температурах ниже точки Кюри обладают спонтанной намагниченностью независимо от наличия внешнего намагничивающего поля.  https://studfiles.net/html/2706/129/html_SJDKKEeTIl.U8WH/img-oXuEbM.png  При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных до­менов ориентированы хаотически и компенсируют друг друга, поэтому результиру­ющий магнитный момент ферромагнетика равен нулю и ферромагнетик не намаг­ничен. с ростом *Н*намагниченность *J* (см. рис. 192) и магнит­ная индукции *В* (см. рис. 193) уже в довольно слабых полях растут очень быстро. Этим объясняется также увеличение *μ* ферромагнетиков до максимального значения в слабых полях (см. рис. 194). При ослаблении внешнего магнитного поля до нуля ферромагнетики сохраняют остаточное намагничение, так как тепловое движение не в состоянии быстро дезориен­тировать магнитные моменты столь крупных образований, какими являются домены. Поэтому и наблюдается явление магнитного гистерезиса (рис. 195). Для того чтобы ферромагнетик размагнитить, необходимо приложить коэрцитивную силу; размаг­ничиванию способствуют также встряхивание и нагревание ферромагнетика. Существуют вещества, в которых обменные силы вызывают *антипараллельную*ориентацию спиновых магнитных моментов электронов. Такие тела называются **антиферромагнетиками**. В последнее время большое значение приобрели полупроводниковые ферромаг­нетики — **ферриты**, химические соединения типа МeО⋅Fе2О3, где Me — ион двухва­лентного металла (Mn, Co, Ni, Сu, Mg, Zn, Cd, Fe). Они отличаются заметными ферромагнитными свойствами и большим удельным электрическим сопротивлением (в миллиарды раз большим, чем у металлов). Ферриты применяются для изготовления постоянных магнитов, ферритовых антенн и т.д.  **На практике под магнитными материалами понимают материалы, обладающие свойствами ферромагнетика или ферримагнетика.**  К **ферромагнетикам** относятся три переходных металла (**Fe, Co, Ni**) и сплавы на их основе, шесть редкоземельных металлических элементов (**гадолиний Gd, тербий Tb, диспрозий Dy, гольмий Ho, эрбий Er и тулий Tm**), сплавы системы **Mn – Cu – Al**(сплавы Гейслера) и соединения **MnSb, MnBi** и др., в которых атомы марганца находятся на больших расстояниях, чем в решетке кристалла чистого марганца.  У ферромагнетиков магнитные моменты атомов (ионов) обусловлены некомпенсированными в них спиновыми магнитными моментами электронов. При этом магнитные моменты атомов ферромагнетиков расположены не беспорядочно, а в результате обменного взаимодействия ориентированы параллельно друг другу с образованием магнитных доменов.  **Магнитные домены** представляют собой элементарные объемы ферромагнетиков, находящиеся в состоянии магнитного насыщения. В домене некомпенсированные спиновые магнитные моменты электронов всех атомов выстроены параллельно друг другу. Доменная структура образуется в отсутствие внешнего магнитного поля в результате самопроизвольной (спонтанной) намагниченности, которая происходит при температурах ниже некоторой, называемой **точкой Кюри** Тк. В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты доменов направлены так, что результирующий магнитный момент равен или близок к нулю.  При нагревании ферромагнетика его магнитная проницаемость увеличивается, так как облегчаются процессы смещения доменных границ. При температуре равной или выше Тк интенсивное тепловое движение ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки, начнет изменять параметры этой решетки. В результате разрушится спонтанная намагниченность, домены перестанут существовать, и материал перейдет из ферромагнитного состояния в парамагнитное. При этом магнитная проницаемость материала M приблизится к единице (рисунок 2.1). Для чистого железа Тк = 768оС, для никеля Тк = 358оС, для кобальта Тк = 1131оС.  Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетиков от температуры  **Рисунок 2.1** – Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетиков от температуры  **Ферримагнетики** имеют доменную структуру, состоящую из двух или более подрешеток, связанных антиферромагнитно (антипараллельно). Поскольку подрешетки образованы атомами (ионами) различных химических элементов или неодинаковым их количеством, они имеют различные по величине магнитные моменты, направленные антипараллельно В результате появляется отлична от нуля разность магнитных моментов подрешеток, приводящая к спонтанному намагничиванию кристалла.  Свое название ферримагнетики получили от **ферритов** – сложных систем оксидов металлов с общей химической формулой MeO•Fe2O3, где MeO – оксид двухвалентного металла. У ферритов, как и у ферромагнетиков, доменная структура образуется при температурах ниже точки Кюри. | |
|  | |
| **Магнитный гистерезис**  Если предварительно размагниченный образец ферромагнитного материала подвергнуть намагничиванию до состояния технического насыщения, то с увеличением напряженности магнитного поля Н магнитная индукция образца В будет изменяться в соответствии с кривой ОАБ (рисунок 2.2).  Предельная петля магнитного гистерезиса  **Рисунок 2.2** – Предельная петля магнитного гистерезиса  В точке А при H = Hs магнитная индукция образца достигнет **индукции насыщения** Bs. При уменьшении напряженности поля Н намагниченность образца уменьшается по кривой БАBr, и при Н = 0 образец будет обладать некоторой индукцией, величина которой будет отлична от нуля. Эта индукция называется остаточной и обозначается Вr. Остаточная индукция (остаточная намагниченность) обусловлена тем, что при размагничивании, когда Н = 0, магнитные моменты доменов оказываются ориентированными вдоль оси легкого намагничивания, направление которой близко к направлению внешнего.  Для достижения полного размагничивания образца к нему необходимо приложить противоположное по знаку поле определенной напряженности. Напряженность такого поля называют **коэрцитивной силой** Нс. При дальнейшем усилении отрицательного поля магнитная индукция тоже становится отрицательной и в точке A' при H = –Hs достигает значения индукции технического насыщения (B = –Bs). После уменьшения отрицательного поля, а затем увеличения положительного поля кривая перемагничивания опишет петлю, называемую **предельной петлей магнитного гистерезиса**, которая является важной технической характеристикой магнитных материалов.  Таким образом, предельная петля магнитного гистерезиса – это кривая изменения магнитной индукции при изменении внешнего магнитного поля от +Hs до –Hs и обратно. Пользуясь предельной петлей магнитного гистерезиса можно определить основные параметры материала: коэрцитивную силу Нс, индукцию насыщения Bs, остаточную индукцию Br и др.  Такие характеристики материала, как точка Кюри и индукция насыщения, зависят только от химического состава магнитных материалов. Коэрцитивная сил Нс, магнитная проницаемость M и площадь петли гистерезиса являются структурно-чувствительными. Чем больше размер зерна (меньше суммарная удельная поверхность зерен) и более совершенна структура кристаллической решетки (меньше дислокаций, внутренних напряжений, примесей и других дефектов), тем меньше Нс и больше M, а материал легче намагничивается и перемагничивается.  По величине коэрцитивной силы магнитные материалы подразделяются на **магнитомягкие** и **магнитотвердые**. Материалы, у которых Нс < 4 кА/м, относятся к магнитомягким, у которых Нс > 4 кА/м – к магнитответдым (ГОСТ 19693 – 74).  Для магнитомягких материалов характерно малое значение коэрцитивной силы. У промышленных образцов наименьшая Нс = 0,4 А/м. Поэтому они намагничиваются до индукции технического насыщения при невысоких напряженностях поля. У магнитомягких материалов высокая магнитная проницаемость, малые потери на перемагничивание и узкая петля гистерезиса при высоких значениях магнитной индукции.  Для магнитотвердых материалов характерна широкая петля гистерезиса с большой коэрцитивной силой. У промышленных образцов наибольшая Нс = 800 кА/м. Магнитотвердые материалы намагничиваются при высокой напряженности внешнего магнитного поля, но зато длительное время сохраняют сообщенную энергию. | | |

|  |
| --- |
| **Магнитомягкие материалы**  **Магнитомягкие материалы** применяют для изготовления магнитопроводов постоянного и переменного тока. Они предназначены для изготовления якорей и полюсов машин постоянного тока, роторов и статоров асинхронных двигателей, для магнитных цепей крупных электрических машин, силовых трансформаторов, аппаратов, приборов и т.д.  Магнитомягкие материалы должны отвечать следующим требованиям: высокая магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила, малые потери на перемагничивание, высокое электрическое сопротивление для уменьшения потерь, связанных с возникновением вихревых токов.  Ранее было сказано, что значения коэрцитивной силы Нс и магнитной проницаемости M металлических магнитных материалов зависят от степени деформации кристаллической решетки и размеров зерен. Чем меньше содержание примесей в материале, однороднее его структура (она должна быть однофазной), меньше внутренних напряжений, дислокаций и других дефектов, тем меньше Нс и больше M. Поэтому металлические магнитомягкие материалы должны иметь: минимальную концентрацию вредных примесей (особенно кислорода, углерода, серы и фосфора), которые образуют нерастворимые в металле химические соединения (оксиды, карбиды, сульфиды, фосфиды), а также крупнозернистую структуру и минимальное количество внутренних напряжений, дислокаций и других дефектов.  К магнитомягким материалам относятся: железо; кремнистая электротехническая сталь; сплавы с высокой начальной магнитной проницаемостью; магнитодиэлектрики и ферриты. |

**Железо**

Термин **«железо»** соответствует названию химического элемента, которым условно называют низкоуглеродистые стали и чистое железо.

**Чистое железо** содержит не более 0,6% примесей, в том числе углерода не более 0,04%. Наиболее вредными примесями всех марок магнитного железа являются углерод, кислород, сера и фосфор. Особенно сильно ухудшает магнитные свойства железа углерод в виде цементита.

Чистое железо является основным компонентом большинства современных магнитных материалов. Его достоинства – высокие показатели индукции насыщения (Br = 2,18 Тл), пластичности, коррозионной стойкости, высокая технологичность, низкая цена и доступность. Недостатки – низкое удельное сопротивление (*p* = 1•10-7 Ом•м) и, как следствие этого, большие потери на вихревые токи. Поэтому чистое железо применяется только в изделиях, работающих в постоянном магнитном поле, и в виде магнитной фазы в магнитодиэлектриках.

В зависимости от концентрации примесей магнитные свойства железа, в первую очередь Нс и M, могут изменяться в широких пределах. Чем меньше примесей и менее дефектна кристаллическая решетка, тем лучше магнитные свойства материала.

Для улучшения магнитных свойств все виды чистого железа подвергают специальной термической обработке – отжигу, проводимому при температуре 900оС в течение 2 – 4 часов, затем медленному охлаждению до 600оС. Весь цикл термической обработки осуществляют для предотвращения окисления металла или в вакууме, или в защитной среде (чистом водороде или диссоциированном аммиаке, состоящем из 75% водорода и 25% азота). При термообработке в железе уменьшаются внутренние напряжения, количество дислокаций и других дефектов кристаллической решетки и укрупняется зерно, в результате чего уменьшается суммарная удельная поверхность зерен.

Железо подвержено **магнитному старению** вследствие структурных превращений, в результате которых со временем увеличивается коэрцитивная сила, иногда более чем в 1,5 – 2 раза. Магнитное старение уменьшают путем легирования некоторыми химическими элементами (например кремнием или алюминием), а также искусственным старением, заключающемся в выдерживании материала при 100оС в течение 100 – 150 часов.

Деформация и внутренние напряжения, возникающие при механической обработке, значительно ухудшают магнитные свойства железа. Например, деформация на 0,5 – 1% вызывает увеличение Нс на 15 – 20% и снижение M на 25 – 30%. Внутренние напряжения снимают отжигом.

В качестве чистого железа в электро- и радиотехнике используют технически чистое и особо чистое железо. Они содержат меньше углерода и других примесей, чем конструкционные стали, и поэтому обладают гораздо лучшими магнитными свойствами.

**Технически чистое железо** содержит не более 0,025% углерода и не более 0,08 – 0,15 других примесей. В электротехнике его иногда называют [«армко железом»](http://uas.su/glossary/eng/A/armcoiron.php) (от первых букв названия фирмы «American Rolling Mill Company»). Из-за малого удельного сопротивления его в основном используют для магнитопроводов постоянного магнитного потока, когда потери на вихревые токи не существенны.

**Особо чистое железо** содержит менее 0,03% примесей. К этой группе относится электролитическое и карбонильное железо, а также особо чистое железо и его монокристаллы, особо тщательно отожженные в водороде.

**Электролитическое железо** содержит менее 0,02% углерода. Его получают путем электролиза водных растворов сернокислого или хлористого железа. Анодом служит чистое железо, а катодом – пластина мягкой стали. Слой осажденного на катоде железа толщиной 2 – 6 мм тщательно промывают, снимают с катода и измельчают в порошок на шаровой мельнице. Электролитическое железо неизбежно содержит следы водорода, для удаления которого порошок переплавляют в вакууме или подвергают отжигу в вакууме.

**Карбонильное железо** содержит не более 0,005% углерода. Его получают путем термического разложения пентакарбонила железа Fe(CO)5, представляющего собой желтоватую жидкость, устойчивую на воздухе (Ткип = 103оС).

При сгорании паров пентакарбонила железа на воздухе образуется мелкодисперсный оксид железа Fe2O3, который применяют в качестве активного слоя магнитофонных лент.

В отсутствие воздуха пары Fe(CO)5 при температуре 350оС разлагаются на оксид углерода и металлическое железо по реакции

**Fe(CO)5 = Fe + 5CO - 2.1**

Образовавшийся очень мелкий порошок (размер частиц 0,5 – 20 мкм) для уменьшения содержания вредных примесей подвергают отжигу в водороде.

Карбонильное железо применяется в качестве магнитной фазы в магнитодиэлектриках, из него изготавливают листы различной толщины.

Сталь низкоуглеродистая электротехническая нелегированная является разновидностью технически чистого железа. Такая сталь должна содержать не более, %: 0,035 **C**, 0,3 **Mn**, 0,3 **Si**, 0,020 **S**, 0,020 **P**, 0,3 **Cu**. Ее выпускают тонколистовой и сортовой. Сталь отжигают при 900оС описанным выше способом.

|  |
| --- |
| **Кремнистая электротехническая сталь**  Для улучшения магнитных свойств железа широко применяют легирование технически чистого железа кремнием или кремнием и алюминием.  **Кремнистая электротехническая сталь** – магнитомягкий материал массового потребления. Его широко применяют для изготовления магнитных цепей, работающих при частоте 50 – 400 Гц. Преимуществом этого материала является высокая индукция насыщения и относительно невысокая стоимость.  В зависимости от содержания основного легирующего элемента – кремния – электротехнические тонколистовые стали подразделяют на пять групп (таблица 2.1).  **Таблица 2.1** – Группы легирования и свойства кремнистой электротехнической стали в зависимости от содержания кремния  Группы легирования и свойства кремнистой электротехнической стали в зависимости от содержания кремния  Кремний, образуя с железом твердый раствор, увеличивает его удельное электрическое сопротивление, которое линейно возрастает от 0,1 мкОм•м при нулевом содержании кремния до 0,6 мкОм•м при содержании кремния 5% (таблица 2.1). При этом плотность сталей снижается. Положительное действие кремния заключается еще и в том, что способствует переходу углерода из наиболее вредной для магнитных свойств формы – цементита в графит. Кроме того, кремний выполняет роль раскислителя, а также способствует образованию крупнозернистой структуры и уменьшает магнитную анизотропию и константу магнитоскрипции. В результате указанных изменений улучшаются магнитные свойства стали: уменьшается Нс, увеличиваются M, снижаются потери на вихревые токи и гистерезис. При содержании кремния 6,5 – 6,8% M достигает наибольшего значения, а константа магнитоскрипции приближается к нулю. Кремний также повышает стабильность магнитных свойств стали во времени.  Однако с повышением содержания кремния механические свойства стали ухудшаются – увеличиваются твердость и хрупкость. Например, при содержании кремния 4 – 5% сталь выдерживает не более 1 – 2 перегибов на угол 90о и, что очень нежелательно, снижается индукция насыщения Br. Поэтому в кремнистой электротехнической стали содержание кремния не превышает 4,8%.  Электротехническую сталь производят горячекатаной и холоднокатаной. Горячекатаная сталь изотропна, то есть ее магнитные свойства одинаковы в различных направлениях относительно направления прокатки. Она дешевле холоднокатанной и широко применяется в электромашиностроении.  Свойства стали можно значительно улучшить путем холодной прокатки и последующего отжига. В результате холодной прокатки происходит преимущественная ориентация границ зерен. Однако деформация в холодном состоянии приводит к образованию больших внутренних напряжений и, следовательно, к увеличению коэрцитивной силы. Внутренние напряжения снимают отжигом при температуре 900 – 1000оС. При отжиге происходит рекристаллизация, сопровождающаяся ростом зерен и одновременной их ориентацией с образованием кристаллической текстуры материала.  Магнитные свойства **текстурированной стали** или стали с так называемой **ребровой текстурой** (рисунок 2.3) существенно выше вдоль направления прокатки.  Положение элементарных ячеек кристаллической решетки в листе с ребровой текстурой (а) и кубической текстурой (б) (стрелкой показано направление прокатки)  **Рисунок 2.3** – Положение элементарных ячеек кристаллической решетки в листе с ребровой текстурой (а) и кубической текстурой (б) (стрелкой показано направление прокатки)  Текстурированную сталь применяют в магнитопроводах такой конструкции, при которой магнитный поток проходит в направлении наилучших магнитных свойств, например, в трансформаторостроении. При производстве мощных трансформаторов замена горячекатаной стали текстурированной позволяет снизить потери энергии на 30%, массу трансформатора до 10% и расход стали до 20%. Однако это условие трудно выполнимо для магнитопроводов электрических машин с круглой формой статора и ротора. В этих случаях применяют **малотекстурированные стали** или стали не с ребровой, а с **кубической текстурой**. У последних наилучшие магнитные свойства обеспечиваются при прохождении магнитного потока в трех направлениях – вдоль, поперек и перпендикулярно направлению прокатки. |

|  |
| --- |
| **Ферриты**  **Ферриты** – это ферримагнитная керамика, сочетающая в себе высокие магнитные свойства и высокое удельное электрическое сопротивление и, следовательно, низкие потери на вихревые токи. Это позволяет применять их в области высоких и СВЧ, т.е. там, где металлические магнитомягкие материалы применять уже нельзя.  Ферриты представляют собой сложные системы оксидов железа и двухвалентного (реже одновалентного) металла, имеющие общую формулу**MeO\*Fe2O3**. В качестве металла применяют **Ni, Mn, Co, Fe, Zn, Cd, Li** и др., котрые и дают название ферриту. Например, **NiO\*Fe2O3** – никелевый феррит, **ZnO\*Fe2O3** – цинковый феррит. Применяющиеся в технике ферриты называют также называют также оксиферами. В последнее время широко применяют ферриты с общей формулой **3Me2O3\*5Fe2O3** (где **Ме** – двух- или трехвалентный металл).  Свойства ферритов и соответственно изделий из них сильно зависят от их состава и технологии получения. В промышленности используют наиболее простую технологию, которая заключается в спекании оксидов при повышенной температуре: в подготовленный ферритовый порошок, состоящий из обожженных оксидов соответствующих металлов, тонко измельченных и тщательно перемешанных, добавляют пластификатор (обычно раствор поливинилового спирта), из полученной массы под большим давлением прессуют изделия требуемой формы и обжигают их при температуре 1100 – 1400оС. В процессе обжига и формируется феррит, представляющий собой твердый раствор оксидов. При этом происходит усадка, которая может составлять 10 – 20%. Очень важно, чтобы обжиг происходил в окислительной атмосфере (обычно в воздухе). Присутствие даже небольшого количества водорода может вызвать частичное восстановление оксидов, что приведет к увеличению магнитных потерь. Полученные ферритовые изделия являются твердыми, хрупкими и не позволяют производить какую-либо механическую обработку, кроме шлифования и полирования.  Ферриты имеют гранецентрированную плотно упакованную кристаллическую решетку, в которой ионы кислорода образуют тетраэдры и октаэдры. В центре тетраэдра располагается ион металла. Если этим ионом является **Fe2+**, материал обладает магнитными свойствами. Примером таких материалов могут служить никелевый (**NiO\*Fe2O3**) и марганцевый (**MnO\*Fe2O3**) ферриты. Если этим ионом является **Zn2+** или **Cd2+**, образуется немагнитный цинковый (**ZnO\*Fe2O3**) или кадмиевый (**CdO\*Fe2O3**) феррит. Указанные явления объясняются тем, что в ферритах между магнитными моментами соседних атомов осуществляется косвенное обменное взаимодействие, которое приводит к их антипараллельной ориентации. В связи с этим в магнитном отношении кристаллическую решетку ферритов можно представить как состоящую из двух подрешеток, имеющих противоположные направления магнитных моментов ионов (атомов). В магнитном феррите намагниченность подрешеток не одинакова, в результате чего возникает суммарная спонтанная намагниченность, а в немагнитном феррите суммарная намагниченность равна нулю.  К магнитомягким ферритам в первую очередь относятся две группы ферритов: никель-цинковые и марганец-цинковые, представляющие собой трехкомпонентные системы **NiO – ZnO – Fe2O3** и **MnO – ZnO – Fe2O3**.  В основу маркировки магнитомягких ферритов положена величина начальной магнитной проницаемости. Первое число в обозначении марки феррита указывает номинальное значение Mн. Следующая за ним буква Н или В обозначает низкочастотный или высокочастотный материал. Далее следует буква, указывающая на состав феррита: Н – никель-цинковый, М – марганец-цинковый. Например, марка 2000НМ означает низкочастотный марганец-цинковый феррит с Mн = 2000.  В ряде случаев в конце маркировки добавляют букву, которая указывает на область преимущественного использования данной марки феррита: С – в сильных полях, П – в контурах, перестраиваемых подмагничиванием, Т – для магнитных головок, РП – для радиопоглощающих устройств.  Специальные индексы в маркировке этих ферритов – цифры 1, 2 и 3, которые ставятся в конце обозначения, означают различия в свойствах.  Основные недостатки ферритов – трудность получения точных размеров изделий из-за большой усадки при обжиге (до 20%), недостаточно высокая воспроизводимость магнитных свойств, невысокие значения индукции насыщения и температуры Кюри, невысокая стабильность магнитных параметров во времени. |

|  |
| --- |
| **Магнитотвердые материалы**  Магнитотвердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов, используемых в различной аппаратуре, устройствах электромагнитной записи, фокусирующих устройствах телевизоров, микрофонах, электроизмерительных приборах, микроэлектронике, СВЧ-приборах и т.д.  Основными характеристиками магнитотвердых материалов являются коэрцитивная сила Нс, остаточная индукция Вr и максимальная удельная магнитная энергия Wм отдаваемая материалом в пространство. Магнитная энергия пропорциональна произведению Вr и Нc. Поскольку Вr ограничена магнитным насыщением ферромагнетика (железа), увеличение магнитной энергии достигается повышением коэрцитивной силы Нc.  Коэрцитивная сила магнитотвердых материалов на 1 – 4 десятичных порядка больше, чем у магнитомягких материалов, однако магнитная проницаемость M у них меньше. При этом чем больше Нс, тем меньше M.  Магнитный поток постоянного магнита с течением времени уменьшается. Это явление называют **старением магнита**. Старение магнитов может быть обратимым и необратимым.  **Обратимое старение** происходит под действием ударов, толчков, резких колебаний температуры, воздействия внешних постоянных полей. Оно приводит к снижению Вr на 1 – 3 %. Магнитные свойства при этом старении можно восстановить путем повторного намагничивания.  **Необратимое старение** связано с изменением структуры материала во времени и повторным намагничиванием не устраняется.  Высокая коэрцитивная сила у магнитотвердых материалов достигается созданием в кристаллической решетке большого количества внутренних напряжений, дислокаций и других дефектов путем легирования материала и последующей термической обработки. Кроме того, очень высокую Нс получают у материалов, состоящих из смеси магнитной и немагнитной фаз. При этом частицы магнитной фазы являются настолько мелкими, что не делятся на домены.  По составу и способу получения магнитотвердые материалы подразделяются на следующие группы: углеродистые и легированные стали мартенситной структуры; литые высококоэрцитивные сплавы; металлокерамические и металлопластические магниты; магнитотвердые ферриты; сплавы на основе редкоземельных элементов; сплавы для магнитных носителей информации. |

|  |
| --- |
| **Сплавы для магнитных носителей информации**  Материалы этой группы должны иметь высокую остаточную индукцию для повышения уровня считываемого сигнала, а коэрцитивная сила Нс должна иметь оптимальное. Это требование объясняется это тем, что при низких значениях Нс облегчается процесс стирания записи, но увеличивается эффект саморазмагничивания, что приводит к потере записанной информации, и наоборот. Опыт показал, что хорошие результаты дают материалы, у которых соотношение Hс/Br > 8 кА/(м\*Тл).  Для записи и воспроизведения информации используют металлические ленты (толщиной 0,005 – 0,01 мм) и проволоку (диаметром до 0,1 мм) из специальной нержавеющей стали (Нс = 32 кА/м, Вr = 0,7 Тл) и викаллоя (Hс = 36 кА/м, Вr = 1 Тл). Недостатком этих сплавов является высокая стоимость и быстрый износ записывающих и воспроизводящих устройств.  В качестве магнитного носителя информации широко используют магнитотвердые порошковые покрытия, нанесенные на различные основания: металлические или пластмассовые ленты, металлические диски и барабаны. В качестве магнитного порошка используют оксиды железа Fe2O3 и Fe3O4, имеющие соответственно светло-коричневый и черный цвета, магнитотвердые ферриты (феррит кобальта), сплавы типа альни (Fe – Ni – Al).  Магнитные свойства лент, дисков и других устройств существенно зависят от размера частиц порошка, их ориентации и объемной плотности в рабочем слое. Размер частиц колеблется от долей микрометра до нескольких микрометров. Наиболее широкое применение в качестве основы магнитных лент нашли ацетилцеллюлозные или лавсановые ленты толщиной 20 – 50 мкм, на которые нанесен слой лака, содержащий магнитный порошок. Магнитные параметры пленки: Нс = 6,4 – 20 кА/м и Вr = 0,8 – 0,4 Тл. Качество поверхности ленты влияет на ее частотные показатели. Шумы при записи и воспроизведении являются следствием шероховатости поверхности, которая зависит от размера частиц порошка. При мелком помоле порошка шумы получаются незначительными. Поэтому для улучшения качества лент их рабочие поверхности полируют. |

|  |
| --- |
| **Парамагнитные материалы**  В электротехнике, приборостроении, судостроении и специальных областях техники требуются немагнитные (парамагнитные) стали. С этой целью используют аустенитные стали 17Х18Н9, 12Х18Н10Т, 55Г9Н9ХЗ, 50Г18Х4, 40Г14Н9Ф2, 40Х14Н9ХЗЮФ2 и др.  Недостатком этих сталей является низкий (150 – 350 МПа) предел текучести, что затрудняет их использование для высоконагруженных деталей машин. Прочность может быть повышена за счет деформационного и дисперсионного упрочнения. Повышение износостойкости деталей, работающих в узлах трения, достигается азотированием. |

|  |
| --- |
| **Проводниковые металлы и сплавы**  Проводниковые металлы и сплавы должны обладать высокой электропроводностью, достаточно высокими механическими свойствами, сопротивляемостью к атмосферной коррозии, способностью поддаваться обработке давлением в горячем и холодном состоянии.  После серебра наиболее высокой электропроводностью обладают медь и алюминий. Они и являются наиболее распространенными проводниковыми материалами. Проводимость отожженного проводникового алюминия составляет приблизительно 62% проводимости стандартной меди. Но плотность алюминия мала, поэтому проводимость 1 кг алюминия составляет 214% проводимости 1 кг меди. Следовательно, алюминий экономически более выгоден для использования в качестве проводникового материала.  Применяемые в настоящее время проводниковые материалы можно разделить на следующие группы: проводниковая медь, проводниковый алюминий, проводниковые сплавы, проводниковое железо, сверхпроводники.  **Проводниковая медь**. При наличии в меди даже небольшого количества примесей ее электропроводность быстро уменьшается (рисунок 3.1).  Влияние примесей на электропроводность меди  **Рисунок 3.1** – Влияние примесей на электропроводность меди  Для изготовления электрических проводов применяют электролитическую (катодную) медь, с суммарным содержанием примесей не более 0,05%. Катоды переплавляются в слитки, при этом содержание примесей в меди повышается. Проводниковая медь марки Ml должна содержать не более 0,1% примесей, в том числе не более, %: 0,001 Bi; 0,002 Sb; 0,002 As; 0,005 Fe; 0,002 Ni; 0,005 Pb; 0,002 Sn; 0,005 S; 0,05 O; 0,003 Ag. Фосфор для раскисления меди марки М1 не применяется.  Проводниковая медь имеет в отожженном состоянии имеет предел прочности 270 МПа. Предел прочности меди может быть повышен до 480 МПа путем холодной деформации, но при этом ее удельное сопротивление увеличивается (рисунок 3.2).  Зависимость механических свойств и удельного электрического сопротивления меди марки М1 от степени деформации  **Рисунок 3.2** – Зависимость механических свойств и удельного электрического сопротивления меди марки М1 от степени деформации  **Проводниковый алюминий**. Недостатком алюминия является его сравнительно низкая прочность. Отожженный алюминий почти в три раза менее прочен на разрыв, чем медь. Поэтому при изготовлении проводов его упрочняют путем холодной деформации. В этом случае предел прочности составляет 250 МПа, что является недостаточным для сопротивления сильному натяжению, которое испытывают провода в линиях электропередач. Поэтому для линий электропередач применяют провода со стальной сердцевиной.  Для кабельных и токопроводящих изделий применяют алюминий марок А00, А0, Al, A2. Проводниковый алюминий обычно содержит десятые доли процента примесей, из которых основными являются железо и кремний (таблица 3.1).  химический состав технически чистого алюминия  Термическая обработка проводникового алюминия для снижения его сопротивления обычно не применяется, так как холодная обработка алюминия мало снижает его электропроводность. Так при обжатии до 95 – 98% электропроводность уменьшается не более чем на 1,2% электропроводности стандартной меди.  **Проводниковые сплавы**. В тех случаях, когда требуется повышенная прочность или специальные свойства (например, повышенное сопротивление истиранию), применяют сплавы на алюминиевой и медной основе. Композицию сплавов подбирают таким образом, чтобы легирующий металл не растворялся в основном металле, а упрочнение сплавов достигалось за счет интерметаллических фаз.  **Проводниковое железо**. Удельное электрическое сопротивление железа в 7 – 8 раз выше, чем у меди. Тем не менее, железо применяют в промышленности, т.к. оно является недефицитным материалом и имеет повышенную механическую прочность. При использовании железа в качестве проводникового материала оно должно быть достаточно чистым. Обычно для этих целей применяют [армко-железо](http://uas.su/glossary/eng/A/armcoiron.php" \t "_blank).  Железо используют при изготовлении биметаллических проводов, в этом случае сердцевину провода изготовляют из железа, а поверхностный слой из материала, имеющего более высокую электрическую проводимость (медь, алюминий). |

|  |
| --- |
| **Сверхпроводимость**  С понижением температуры наблюдается монотонное падение электрического сопротивления материалов. Вблизи абсолютного нуля у многих металлов и сплавов происходит резкое падение электрического сопротивления, и они становятся сверхпроводниками (рисунок 3.3).  Влияние температуры на электрическое сопротивление сверхпроводниковых материалов  **Рисунок 3.3** – Влияние температуры на электрическое сопротивление сверхпроводниковых материалов  **Сверхпроводимость** – способность материалов не оказывать сопротивления электрическому току при температурах ниже характерной для них критической температуры Тк.  Впервые сверхпроводимость обнаружил в 1911 г. голландский ученый Гейке Камерлинг-Оннес, который наблюдал скачкообразное исчезновение сопротивления ртути до неизмеримо малой величины при температуре 4,2 К.  К настоящему времени сверхпроводимость обнаружена у большинства чистых металлов, причем сверхпроводящее состояние легче всего возникает в металлах с низкой обычной проводимостью. Открыто и изучено около трех тысяч сверхпроводящих сплавов и интерметаллических соединений, и их число непрерывно растет. Чистые металлы принято относить к сверхпроводникам первого рода, а сплавы и соединения – к сверхпроводникам второго рода.  Напряженность магнитного поля в объеме сверхпроводников при температурах ниже критической равна нулю. Металл становится диамагнетиком – материалом, приобретающим во внешнем магнитном поле магнитный момент, направленный против намагничивающего поля. Поэтому при переходе материала в сверхпроводящее состояние внешнее магнитное поле «выталкивается» из его объема и остается лишь в тонком поверхностном слое толщиной около 10–5 мм. Это явление называется **эффектом Мейснера**.  Перевод материала в сверхпроводящее состояние связан с фазовым переходом. Новое фазовое состояние характеризуется тем, что свободные электроны перестают взаимодействовать с ионами кристаллической решетки и вступают во взаимодействие между собой. Электроны с противоположными спинами объединяются в пары, и результирующий спиновый момент становится равным нулю. Электронные пары называют куперовскими по имени Леона Купера, впервые показавшего, что сверхпроводимость в металлах связана с их образованием.  В обычном, неспаренном состоянии электроны рассеиваются на примесях, имеющихся в металле, или на тепловых колебаниях кристаллической решетки – фононах. Рассеивание электронов приводит к возникновению электрического сопротивления. Куперовские пары не рассеиваются, так как энергия фононов, которую пара может получить от взаимодействия с ними или дефектами решетки при криогенных температурах, слишком мала. Не испытывая рассеяния, куперовские пары движутся сквозь решетку кристалла без сопротивления, что и приводит к явлению сверхпроводимости.  Сверхпроводящее состояние может быть разрушено как при нагреве материала до температуры выше критической, так и в результате воздействия сильных внешних магнитных полей с напряженностью Нк, превышающей критическое значение. Критическое магнитное поле подобно критической температуре является основной характеристикой сверхпроводящего материала. При превышении Тк или Нк происходит скачкообразное восстановление электрического сопротивления, и магнитное поле проникает в металл. Одним из главных преимуществ сверхпроводников является возможность достижения высоких плотностей тока. Чем выше плотность тока, тем компактнее приборы, меньше расход дорогостоящих сверхпроводящих материалов и меньше масса, которую необходимо охлаждать. Высокая плотность тока позволяет снизить капитальные и эксплуатационные расходы установок на сверхпроводниках. |

|  |  |
| --- | --- |
| **Сверхпроводящие материалы и технология их производства**  Из всех чистых металлов, способных переходить в сверхпроводящее состояние, наивысшую критическую температуру перехода имеет [ниобий](http://uas.su/glossary/eng/N/niobium.php) (Ткр = 9,2 К). Однако для ниобия характерны низкие значения критического магнитного поля (около 0,24 Тл), что недостаточно для его широкого применения. Хорошим сочетанием критических параметров Тк и Вк отличаются сплавы и интерметаллидные соединения ниобия с цирконием, [титаном](http://uas.su/glossary/eng/T/titanium.php), оловом и германием. В таблице 3.2 приведены критические параметры сверхпроводников, представляющих практический интерес.  критические параметры сверхпроводящих материалов  Сплавы и соединения ниобия переходят в сверхпроводящее состояние при достаточно высоких температурах. Они могут выдерживать довольно сильные магнитные поля и характеризуются высокой плотностью тока. В жидком гелии при внешнем поле с индукцией 2,5 Тл критическая плотность тока составляет: для Nb – Zr – 1 кА/мм2; для Nb – Ti – 2,5 кА/мм2; Nb3Sn – 17 кА/мм2; V3Ga – 5 кА/мм2.  К наиболее распространенным сверхпроводящим материалам относится сплав Nb (основа) с 46,5 % Ti (по массе). Этот сплав отличается высокой технологичностью, из него обычными методами плавки, обработки давлением и термической обработки можно изготавливать проволоку, кабели, шины. Интерметаллиды, хотя и обладают более высокими критическими параметрами, имеют высокую хрупкость, что затрудняет изготовление из них длинномерных проводов традиционными методами металлургической технологии.  При изготовлении сверхпроводящего кабеля в бруске меди просверливают множество отверстий и в них вводят тонкие Nb – Ti стержни. Брусок протягивают в тонкую проволоку, вновь разрезают ее на куски, которые снова вводят в новые бруски. Повторяя многократно эту операцию, получают кабель с большим числом сверхпроводящих жил, из которого делают катушки для электромагнитов (рисунок 3.4).  Поперечное сечение многожильного сверхпроводящего композита с 361 ниобий-титановой жилой в медной матрице  **Рисунок 3.4** – Поперечное сечение многожильного сверхпроводящего композита с 361 ниобий-титановой жилой в медной матрице  Если в какой-либо жиле сверхпроводимость случайно нарушится, то высокая электро- и теплопроводность медной матрицы дает возможность осуществить термическую стабилизацию сверхпроводника в докритическом режиме.  Применение хрупких интерметаллидов значительно усложняет изготовление кабеля. Для получения проводов из сверхпроводящего соединения Nb3Sn применяют так называемую бронзовую технологию, основанную на селективной твердофазной диффузии. Тонкие нити пластичного ниобия запрессовывают в матрицу из бронзы, содержащую 10 – 13 % Sn. В результате многократного волочения и повторяющихся запрессовок с промежуточными отжигами и последующей термической обработки происходит диффузия олова в ниобий и на его поверхности образуется тонкая пленка Nb3Sn. Из-за ничтожной растворимости медь в ниобий практически не диффундирует. Схема бронзовой технологии представлена на рисунке 3.5. Полученные провода достаточно пластичны, легко гнутся и укладываются плетением в кабель, сохраняя целыми пленки Nb3Sn.  1  **Рисунок 3.5** – Схема бронзовой технологии изготовления многожильных проводов на основе Nb3Sn: А – сборка, волочение и отжиг; Б – термообработка  Для получения сверхпроводящих лент из соединений интерметаллидов кроме того применяют метод химического осаждения из газовой фазы. Его использование позволяет синтезировать соединение Nb3Ge, имеющее наиболее высокую критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние.  Простота изготовления, благоприятное сочетание электрических и механических свойств и сравнительно низкая стоимость позволяют рекомендовать сверхпроводники на основе твердого раствора Nb – Ti в качестве основных материалов до Вк = 8 Тл при Тк = 4,2 К. В более сильных полях, когда плотность тока существенно падает, целесообразно использовать интерметаллические соединения типа Nb3Sn.  В конце 1980-х годов была открыта высокотемпературная сверхпроводимость в керамических материалах.  В 1986 г. впервые были получены сверхпроводящие керамические оксидные образцы системы La – Ва – Сu – О с температурой перехода в сверхпроводящее состояние Тк = 35 К. Позднее на иттриевых керамиках системы Y – Ва – Сu – О была достигнута температура перехода в сверхпроводящее состояние Тк около 90 К, дающая возможность использовать дешевый и доступный жидкий азот в качестве хладагента. Керамика на основе соединений оксида меди с оксидом стронция, висмута и щелочноземельных элементов, например состава 2SrO\*СаО\*Bi2O3\*2CuO, имеет еще более высокую Тк – до 100 – 115 К. В настоящее время исследователями ряда стран разработано большое число керамических материалов с переходом при температурах 250 К и даже при комнатной температуре. Значительная часть разработанных материалов характеризуется нестабильностью и большой хрупкостью.  Поиск новых сверхпроводников продолжается, хотя пока проблема остается чисто научной. В перспективе необходимо разработать технологию производства и применения высокотемпературных сверхпроводников.   |  | | --- | | **Перспектива использования сверхпроводящих материалов**  Наиболее важными областями применения сверхпроводников является создание сильных магнитных полей, получение и передача электроэнергии. Соленоид из сверхпроводящего материала может работать без подвода энергии извне сколь угодно долго, поскольку однажды возбужденный в нем ток не затухает. Поддержание соленоида в сверхпроводящем состоянии не требует больших энергетических затрат. При нулевом сопротивлении легко решается проблема теплоотвода. Кроме того, сверхпроводящие магниты намного компактнее обычных. Каждый килограмм массы сверхпроводящего магнита создает магнитное поле, эквивалентное по силе полю 20-тонного электромагнита с железным сердечником.  Сверхпроводящие магниты используют для исследований в области физики высоких энергий, создания мощных магнитных кольцевых ускорителей частиц и систем управления движением пучков частиц на выходе из ускорителя. Сверхпроводящие магнитные системы применяют в жидководородных пузырьковых камерах, в которых по кривизне траекторий от пузырьков вскипающей жидкости определяют знак заряда и импульс пролетающих частиц.  Проблемы термоядерной энергетики не могут быть решены без применения мощных сверхпроводящих магнитов. Для осуществления управляемого термоядерного синтеза ядер гелия из ядер дейтерия и трития необходимо удерживать в реакционном пространстве горячую тритий-дейтериевую плазму, нагретую до 108 – 109°С. Только сверхпроводящие магниты способны создать поля такой мощности.  В ближайшем будущем большой вклад в решение энергетической проблемы возможен за счет повышения термодинамического коэффициента полезного действия тепловых электростанций с использованием МГД-генераторов, принципиальная схема которых показана на рисунке 3.6.  Принципиальная схема МГД-генератора: 1 – потребитель; 2 – соленоид; 3 – электрод; 4 – поток плазмы  **Рисунок 3.6** – Принципиальная схема МГД-генератора: 1 – потребитель; 2 – соленоид; 3 – электрод; 4 – поток плазмы  Ионизированные горячие продукты сгорания топлива в виде низкотемпературной плазмы с температурой около 2500°С пропускают с большой скоростью через сильное магнитное поле. Образовавшуюся электроэнергию снимают электродами, расположенными вдоль плазменного канала. Таким образом, с помощью МГД-генератора осуществляется прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.  В перспективе передачу энергии большой мощности целесообразно осуществлять с помощью сверхпроводящих кабельных подземных линий. Расчеты показали, что по сверхпроводящему кабелю толщиной в руку можно пропускать всю пиковую мощность, вырабатываемую электростанциями США. Из технико-экономического анализа следует, что при передаче энергии большой мощности (порядка 3 – 4 ГВ\*А) благодаря малой удельной материалоемкости и меньшей ширине трассы сверхпроводящий кабель будет в 2 – 3 дешевле обычного. При этом он характеризуется большей пропускной способностью и меньшими потерями. Принципиально конструкции сверхпроводящих кабелей постоянного и переменного тока не отличаются друг от друга (рисунок 3.7).  Схема сечения сверхпроводящих кабелей трехфазного тока с коаксиальными парами проводников (а) и постоянного тока с концентрически расположенными проводниками  **Рисунок 3.9** – Схема сечения сверхпроводящих кабелей трехфазного тока с коаксиальными парами проводников (а) и постоянного тока с концентрически расположенными проводниками: 1 – вакуумированное пространство; 2 – каналы для жидкого азота; 3 - термостатирующая изоляция; 4 – каналы для жидкого гелия; 5 – сверхпроводники; 6 – электрическая изоляция  Сверхпроводящие кабели имеют поперечное сечение в виде ряда мно-гослойных труб с вакуумной изоляцией между ними. Внутренние трубы по-крыты слоем сверхпроводящего материала толщиной около 0,3 мм и заполнены жидким гелием. В качестве сверхпроводника может быть использован сплав ниобия с титаном или цирконием. Кабели подобной конструкции прошли производственные испытания в России, США и Японии.  Сверхпроводимость позволяет также решить проблему запаса электро-энергии впрок с выдачей ее при пиковых нагрузках. Индуктивный накопитель энергии представляет собой тороидальный криостат диаметром несколько метров, по виткам обмотки которого практически без потерь циркулирует ток.  Обычный железнодорожный поезд, движущийся по стальным рельсам, имеет принципиальный предел скорости около 350 км/ч. При его превышении нарушается надежное сцепление колес с рельсами, резко возрастает сила аэродинамического сопротивления, появляется «токосъемный барьер», препятствующий нормальному функционированию системы подвески контактного провода вследствие слишком больших вибраций.  Использование эффекта сверхпроводимости позволяет создать поезд без колес с магнитной подвеской и тягой – поезд на магнитной подушке (рисунок 3.8).  Эскиз поезда на магнитной подушке  **Рисунок 3.8** – Эскиз поезда на магнитной подушке  В днище вагонов поезда установлены сверхпроводящие электромагниты 4, охлаждаемые жидким гелием 5. При движении поезда в алюминиевых полосах-рельсах 1 наводятся токи, в свою очередь создающие магнитные поля. Согласно правилу Ленца, магнитное поле индуцированного тока противоположно по направлению внешнему магнитному полю, и между магнитом и алюминиевой полосой возникают силы отталкивания, приподнимающие вагон над эстакадой. Применение сверхпроводящих магнитов позволяет поднять вагон над дорогой на высоту более 100 мм.  Тяга создается с помощью линейного бесконтактного электродвигателя. Линейный двигатель 3 можно представить как модификацию обычного вращающегося двигателя, который разрезали вдоль образующей, развернули и уложили на плоскости. На полотно дороги между алюминиевыми полосами проложен третий активный рельс, который играет роль статора, а сверхпроводящая катушка вагона – ротора. Вдоль пути движется тянущая поезд магнитная волна, скорость которой пропорциональна частоте переменного тока в рельсе.  Колеса в поезде на магнитной подушке используются, как в самолете, только для разгона и торможения. По аналогии такие поезда называют магнитопланами.  В Японии проложена скоростная магистраль между Токио и Осакой протяженностью 500 км, по которой курсируют сверхпроводниковые поезда со скоростью 500 км/ч.  Криогенные сверхпроводящие материалы, находящие применение в электродвигателях и трансформаторах, позволяют уменьшить их объем, снизить массу на 80 %, довести коэффициент полезного действия при этом до 98 %.  Вращающийся сверхпроводящий шар из сплавов ниобия при взаимодействии с внешним магнитным полем способен парить без опор в воздухе или в вакууме. Такой шар является идеальным ротором гироскопа – основного прибора для ориентации космических кораблей.  Криогенные сверхпроводники используют в магнитных насосах, позволяющих перекачивать магнитные поля из больших объемов в малые, тем самым увеличивая их напряженность Н. Разработан проект реактивной подводной лодки без гребного винта с магнитогидродинамическим двигателем (рисунок 3.9).  Схема реактивной подводной лодки с МГД-двигателем  **Рисунок 3.9** – Схема реактивной подводной лодки с МГД-двигателем  Ток, проходящий через сверхпроводящие обмотки, порождает магнитное поле, бегущее от носа лодки к корме. В заполненном водой кольцевом канале, расположенном между внешним и внутренним корпусом лодки, индуцируются токи. Взаимодействие этих токов с магнитным полем сверхпроводника создает силу, двигающую лодку. Расчетная скорость хода реактивной подводной лодки может составить не менее 90 км/ч.  Сильные магнитные поля криогенных сверхпроводящих устройств позволяют защищать космические корабли от повышенной радиации. |   ***Задание на самостоятельную работу :*** *Представленный лабораторный материал содержит краткое содержание по описанию свойств магнитопроводящих материалов. В работе рассмотрены сверхпроводящие материалы. Большое распространение в настоящий момент в мире получили оптоволоконные системы для сверхскоростной передачи информации. На основании изучения первоисточников раскрыть вопросы использования таких систем и применения специальной оптоволоконной кабельной продукции.* |