

**Владимирский государственный университет**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
"МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ  
СВОЙСТВАМИ"**

**Владимир 2022**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Владимирский государственный университет**  
**имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**  
**(ВлГУ)**  
**Институт машиностроения и автомобильного транспорта**  
Кафедра технологии функциональных и конструкционных материалов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ**  
**ПО ДИСЦИПЛИНЕ**  
**"МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ"**

Составитель  
В.Н.Шаршин

Владимир 2022

УДК 621.74.002.3:669.

Рецензент  
Кандидат технических наук, доцент  
Владимирского государственного университета  
*А.В.Жданов*

**Переработанные и дополненные Методические** указания к практическим работам по дисциплине "Материалы с особыми свойствами" /Владим. гос. ун-т; Сост. В.Н.Шаршин. Владимир, 2022. 51 с.

Изложено содержание практических работ по материалам с особыми и специальными свойствами. Приведены краткие теоретические обоснования формирования специальных свойств, технологические особенности изготовления материалов, а также контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Составлены в соответствии с учебными планами подготовки бакалавров по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Табл. 2. Ил. 15. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.74.002.3:669.018.28

## ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Практические работы – это вид учебной деятельности, направленной на формирование и развитие компетенций и умений применять теоретические знания в практической деятельности.

Выполнение практических работ имеет особое значение при изучении технических дисциплин: они являются связующим звеном между теорией и практикой, эффективным средством внутри- и межпредметных связей и способствуют формированию технического мышления.

Работа на занятиях нацелена на закрепление теоретических знаний полученных при изучении лекционного материала, а также развитие у студентов навыков самостоятельного исследования в области материаловедения материалов с особыми свойствами с помощью применения современных методов и инструментов.

Цель освоения дисциплины – обеспечение теоретической подготовки студентов по профилю специальности. Изучение основных специальных, а также физических и механических свойств металлов и сплавов с особыми свойствами. Обучение студентов научным основам выбора материала с особыми свойствами для решения специальных технических задач.

В результате освоения данной дисциплины у студентов формируются основные профессиональные компетенции, отвечающие требованиям ФГОС ВО, к результатам освоения ОПОП ВО по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Обучающийся должен демонстрировать результаты образования, соответствующие компетенциям ПК-1, ПК-2.

## Практическая работа №1

### МАГНИТНЫЕ СПЛАВЫ

#### Общие сведения

Термин «магнит», как правило, используется в отношении объектов, которые имеют собственное магнитное поле даже в отсутствие приложенного магнитного поля.

Такое возможно лишь в некоторых классах материалов.

В большинстве же материалов магнитное поле появляется в связи с приложенным внешним магнитным полем; это явление известно как **магнетизм.**

Существует несколько типов магнетизма, и все материалы имеют, по крайней мере, один из них.

В целом поведение магнитного материала может значительно варьироваться в зависимости от структуры материала и, не в последнюю очередь, его электронной конфигурации.

Многочисленные опыты свидетельствуют о том, что все вещества, помещенные в магнитное поле, намагничиваются и создают собственное магнитное поле, действие которого складывается с действием внешнего магнитного поля:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1$$

где  $\vec{B}$  — магнитная индукция поля в веществе;

$\vec{B}_0$  — магнитная индукция поля в вакууме,

$\vec{B}_1$  — магнитная индукция поля, возникшего благодаря намагничиванию вещества.

Вещество может либо усиливать, либо ослаблять магнитное поле.

Влияние вещества на внешнее магнитное поле характеризуется величиной  $\mu$ , которая называется **магнитной проницаемостью вещества**  $\mu = B / B_0$ .

**Магнитная проницаемость** — это физическая скалярная величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в данном веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме.

Все вещества состоят из молекул, молекулы - из атомов.

Электронные оболочки атомов можно условно рассматривать состоящими из круговых электрических токов, образованных движущимися электронами.

Круговые электрические токи в атомах должны создавать собственные магнитные поля.

На электрические токи должно оказывать действие внешнее магнитное поле, в результате чего можно ожидать либо усиления магнитного поля при сонаправленности атомных магнитных полей с внешним магнитным полем, либо

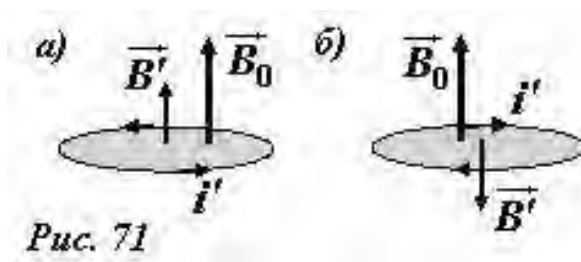
их ослабления при их противоположной направленности.

Гипотеза о существовании магнитных полей в атомах и возможности изменения магнитного поля в веществе полностью соответствует действительности.

Во всех случаях изменение магнитного поля обусловлено появлением токов намагниченности.

Если поле токов намагниченности направлено так же, как и внешнее поле, то индукция суммарного поля будет больше внешнего поля (Рис. 71. а) – в этом случае мы говорим, что вещество усиливает поле.

Если же поле токов намагниченности направлено противоположно внешнему полю, то суммарное поле будет меньше внешнего поля (Рис. 71.б) – именно в этом смысле мы говорим, что вещество ослабляет магнитное поле.



Магнитные свойства различных веществ обладают громадным разнообразием.

Имеется несколько классов веществ, принципиально различающихся по своим магнитным свойствам:

- некоторые ослабляют внешнее магнитное поле (подобно тому, как все диэлектрики ослабляют электрическое поле) – они называются **диамагнетиками**;
- некоторые усиливают его – они называются **парамагнетиками**.

Такое распространенное вещество, с которого и началась история изучения и использования магнетизма, как железо, относится к особому классу, которому оно и дала название – **ферромагнетики**.

Заметим, что вещества, взаимодействующие с магнитным полем, получили обобщающее название – **магнетики**.

Таким образом, все вещества по действию на них внешнего магнитного поля и степени магнитной восприимчивости материалов можно разделить на **три основные группы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики**.

**Ферромагнетики** — материалы, которые обычно и считаются магнитными. Они притягиваются к магниту достаточно сильно — так, что притяжение ощущается. Только эти материалы могут сохранять намагниченность и стать постоянными магнитами.

**Парамагнетики** — вещества, относящиеся к классу ферромагнетиков такие, как платина, алюминий и кислород, которые слабо притягиваются к магниту. Этот эффект в сотни тысяч раз слабее, чем притяжение ферромагнитных материалов, поэтому он может быть обнаружен только с помощью чувствительных инструментов или очень сильных магнитов.

Диамагнетики — вещества, намагничивающиеся против направления внешнего магнитного поля. Диамагнитные вещества, такие как углерод, медь, вода и пластики, отталкиваются от магнита. Проницаемость диамагнитных материалов меньше проницаемости вакуума. Все вещества, не обладающие одним из других типов магнетизма, являются диамагнитными; к ним относится большинство веществ.

**Магнитная восприимчивость** — способность намагничиваться в магнитном поле, определяется отношением намагниченности единицы объёма вещества к напряжённости намагничивающего магнитного поля.

По своему смыслу восприимчивость является величиной безразмерной.

$$\chi = J/H$$

где  $J$  — намагниченность вещества под действием магнитного поля,  
 $H$  — напряженность магнитного поля.

Реальные объекты могут обладать как положительными, так и отрицательными магнитными восприимчивостями.

Диамагнетики - вещества с отрицательной восприимчивостью — их намагниченность по направлению противоположна приложенному магнитному полю.

Ферромагнетики обладают положительной восприимчивостью, например, парамагнетики.

Магнитная восприимчивость диамагнетиков и парамагнетиков мала (для диамагнетиков она отрицательна) и составляет величину порядка  $10^{-4}$ —  $10^{-6}$ , при этом она практически не зависит от напряжённости приложенного магнитного поля.

Заметные отклонения наблюдаются только в области сильных полей или низких температур.

В ферромагнетиках магнитная восприимчивость может достигать весьма больших значений, составляя величины от нескольких десятков до многих тысяч единиц, причём наблюдается её сильная зависимость от напряжённости приложенного поля.

В отсутствие поля магнитная восприимчивость **ферромагнетиков** отлична от нуля и имеет некоторое положительное значение  $\chi_a$ , называемое начальной магнитной восприимчивостью.

С увеличением **напряжённости поля  $H$**  величина восприимчивости растёт, пока не достигнет **максимальной магнитной восприимчивости  $\chi_{max}$** , после чего вновь уменьшается.

В области очень сильных полей магнитная восприимчивость ферромагнетиков (при температурах, не очень близких к точке Кюри) падает практически до нуля, сравниваясь с величиной восприимчивости обычных **парамагнетиков** (эта область параметров называется **областью парапроцесса**).

Вид зависимости магнитной восприимчивости ферромагнетика от

напряжённости намагничивающего поля носит название Столетова и обусловлен сложными механизмами намагничивания ферромагнетиков (рис.1).

Магнитная восприимчивость большинства веществ (за исключением большей части диамагнетиков и некоторых парамагнетиков) обычно зависит от температуры вещества.

У парамагнетиков магнитная восприимчивость уменьшается с температурой.

У ферромагнетиков магнитная восприимчивость с ростом температуры увеличивается, достигая резкого максимума вблизи точки Кюри.

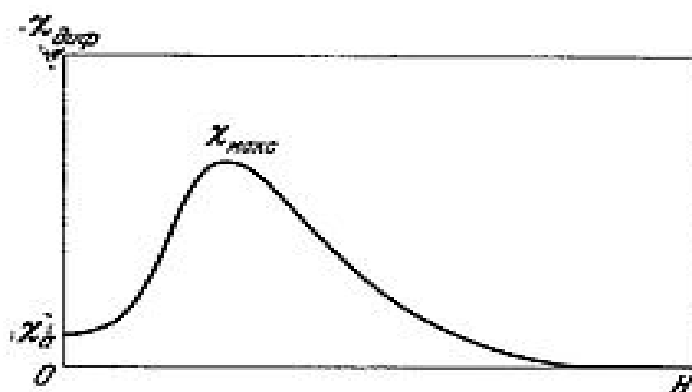


Рис.1. Кривая зависимости магнитной восприимчивости от напряжённости магнитного поля Столетова

Типичные значения  $\chi_a$ ,  $\chi_{max}$ : Fe ~1100 и ~22000; Ni~12 и ~80  
сплав пермаллой ~800 и ~8000 (в нормальных условиях).

### Типы магнетиков

В отличие от диэлектриков, которые всегда уменьшают напряженность электрического поля, -

магнетики могут, как уменьшать индукцию внешнего магнитного поля (для этих веществ магнитная восприимчивость отрицательна  $\chi < 0$ , магнитная проницаемость меньше единицы  $\mu < 1$ ), так ее и увеличивать (для этих веществ  $\chi > 0$ , а  $\mu > 1$ ), причем в некоторых случаях весьма значительно (для них  $\mu \gg 1$ ).

Рассмотрим более подробно основные классы магнетиков и механизмы их намагничивания.

### Диамагнетики

Диамагнетиками называются вещества, молекулы которых не обладают собственным магнитным моментом.



Под действием внешнего магнитного поля в атомах и молекулах наводится (индуцируется) магнитный момент, направленный противоположно вектору индукции внешнего поля.

Диамагнетики обладают отрицательной магнитной восприимчивостью.

Они намагничиваются противоположно приложенному магнитному полю и таким образом ослабляют его.

Такое направление индуцированного магнитного момента приводит к тому, что диамагнетики выталкиваются из магнитного поля.

В отсутствие внешнего магнитного поля диамагнетики немагнитны.

Под действием внешнего магнитного поля:

- каждый атом диамагнетика приобретает магнитный момент  $I$ ; пропорциональный магнитной индукции  $B$  и направленный навстречу полю (!);
- каждая единица объёма — суммарную намагниченность  $M$ .

Поэтому магнитная восприимчивость  $\chi = M/H$  у диамагнетиков всегда отрицательна.

По абсолютной величине диамагнитная восприимчивость  $\chi$  мала и слабо зависит как от напряжённости магнитного поля, так и от температуры.

Другими словами, магнитная восприимчивость  $\chi < 1$  и слабо зависит как от напряжённости магнитного поля, так и от температуры.

Диамагнитный эффект присущ всем веществам без исключения, однако во многих случаях он маскируется другими более сильными магнитными явлениями.

К диамагнетикам относятся полупроводники (Si, Ge), диэлектрики (полимеры), ряд непереходных металлов, таких как Be, Si, Ag, Pb.

Для большинства диамагнетиков намагниченность пропорциональна индукции внешнего поля.

Кроме того, их восприимчивость (и соответственно, магнитная проницаемость) практически не зависят от температуры.

## Парамагнетики

**Парамагнетики** – вещества, молекулы, которых обладают собственным магнитным моментом.

Во внешнем магнитном поле парамагнетики намагничиваются по направлению внешнего поля, что приводит к усилению последнего.

Парамагнетики характеризуются слабой намагниченностью под действием внешнего поля.

К парамагнетикам относятся K, Na, Al, а также такие переходные металлы, как Mo, W, Ti.

**Парамагнетики** - вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении внешнего магнитного поля ( $J \uparrow H$ ) и имеют положительную магнитную восприимчивость.

Парамагнетики относятся к слабомагнитным веществам, магнитная проницаемость незначительно отличается от единицы  $\mu > 1$ .

Термин «Парамагнетизм» ввёл в 1845 году Майкл Фарадей, который разделил все вещества (кроме ферромагнитных) на диа- и парамагнитные.

Атомы (молекулы или ионы) парамагнетика обладают собственными магнитными моментами, которые под действием внешних полей ориентируются по полю и тем самым создают результирующее поле, превышающее внешнее. Парамагнетики втягиваются в магнитное поле.

В отсутствие внешнего магнитного поля парамагнетик не намагничен, так как из-за теплового движения собственные магнитные моменты атомов ориентированы совершенно беспорядочно.

К парамагнетикам относятся алюминий (Al), платина (Pt), многие другие металлы (щелочные и щелочно-земельные металлы, а также сплавы этих металлов), кислород ( $O_2$ ), оксид азота (NO), оксид марганца (MnO), хлорное железо ( $FeCl_3$ ) и другие.

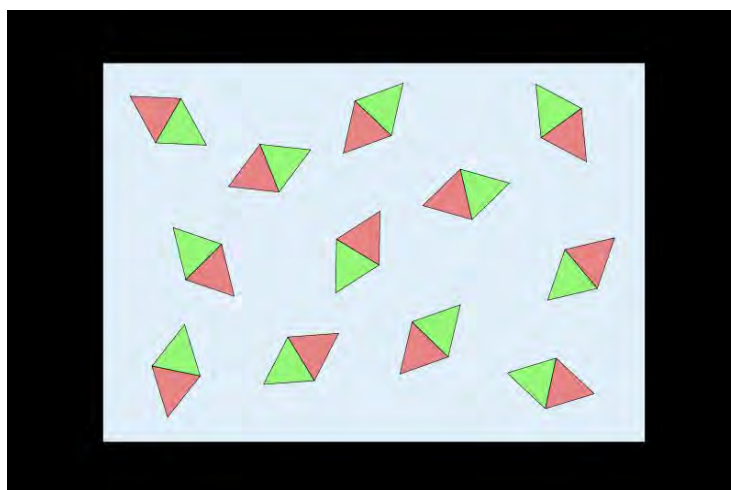
Парамагнетиками становятся ферро- и антиферромагнитные вещества при температурах, превышающих, соответственно, температуру Кюри (температуру фазового перехода в парамагнитное состояние).

В отсутствие магнитного поля магнитные моменты атомов и молекул вследствие теплового движения ориентированы хаотически, поэтому их средняя намагниченность равна нулю (рис. ниже и рис. 75).

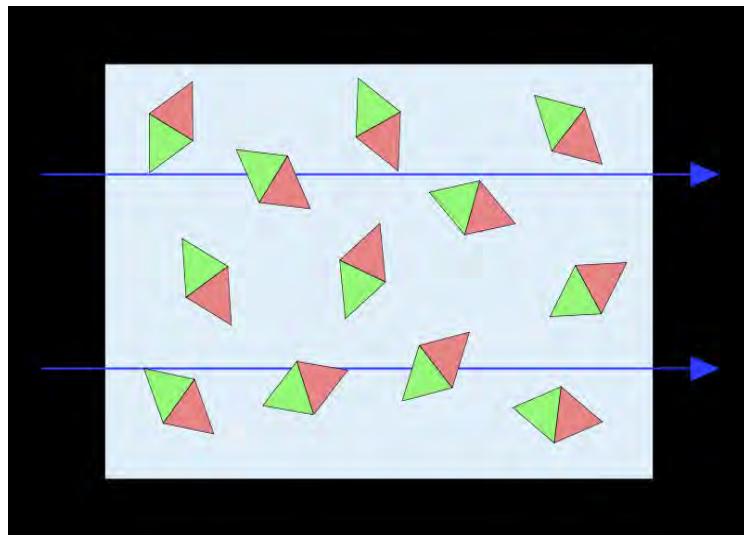
При наложении внешнего магнитного поля на атомы и молекулы начинает действовать момент сил, стремящийся повернуть их так, чтобы магнитный момент был ориентирован параллельно полю.

Ориентация молекул парамагнетика приводит к тому, что вещество намагничивается, то есть приобретает магнитный момент.

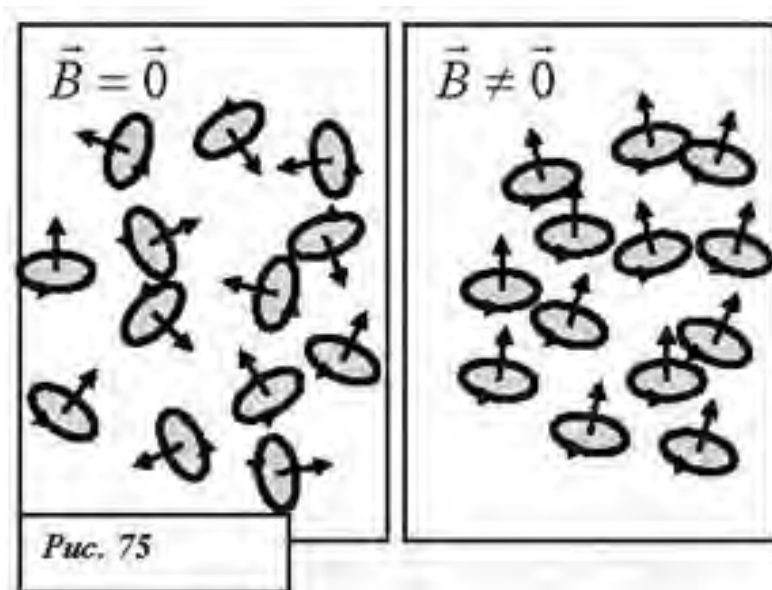
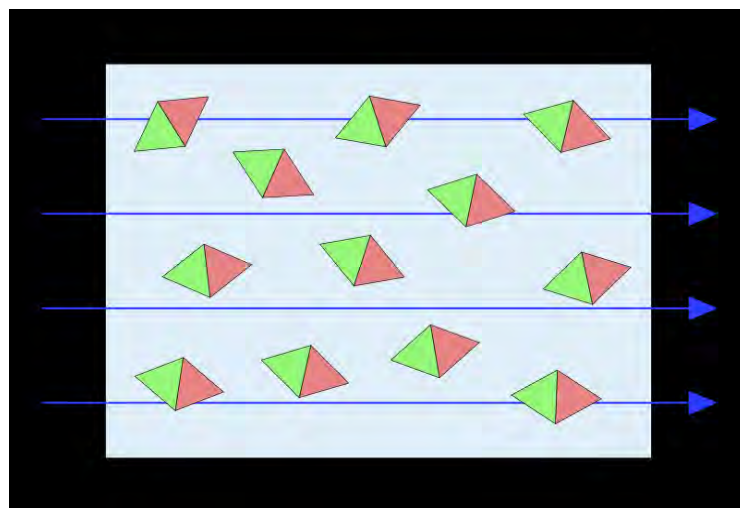
Парамагнетик в отсутствие магнитного поля



Парамагнетик в присутствии слабого магнитного поля



Парамагнетик в присутствии сильного магнитного поля



Таким образом, магнитное поле, создаваемое индуцированным магнитным моментом направлено так же, как и внешнее поле.

То есть, парамагнетики усиливают внешнее поле.

Указанное намагничивание приводит к тому, что парамагнетики втягиваются в область более сильного магнитного поля.

Полной ориентации молекул в магнитном поле препятствует их тепловое движение, поэтому магнитная восприимчивость парамагнетиков зависит от температуры.

Очевидно, что с ростом температуры магнитная восприимчивость парамагнетиков уменьшается.

Описанный механизм намагничивания присущ ряду газов (например, кислороду, азоту), растворам некоторых солей (в которых парамагнетизм обусловлен наличием собственных магнитных моментов у ионов металлов, например, хром  $\text{Cr}^{3+}$ , медь  $\text{Cu}^{2+}$ , неодим  $\text{Nd}^{3+}$ ).

Несколько иной механизм намагничивания реализуется во многих металлах (например, литий, натрий, магний, алюминий и др.).

Большинство физических свойств металлов (таких как высокие теплопроводность и электропроводность, характерный металлический блеск) обусловлено наличием в кристаллах значительного числа свободных электронов.

Каждый электрон обладает собственным механическим моментом (который также называется **спин**) и связанным с ним собственным магнитным моментом.

Парамагнетизм этих веществ объясняется ориентацией свободных электронов в магнитном поле.

Важно подчеркнуть, что магнитные свойства веществ в твердом состоянии зависят не только от их химического состава, но и от структуры кристаллической решетки.

Ярким примером, подтверждающим это утверждение, является олово.

Известны две модификации этого металла в твердом состоянии: белое олово является парамагнетиком, а серое – диамагнетиком.

## Ферромагнетики

**Ферромагнетики** обладают высокой магнитной восприимчивостью.

Из всех металлов только четыре — **железо, кобальт, никель и гадолиний** — обладают высокими ферромагнитными свойствами.

Открытие, первые исследования и применения магнетизма связаны с достаточно уникальными магнитными свойствами такого распространенного вещества как металлическое железо.

Само название этого класса магнитных материалов происходит от латинского имени железа – Ferrum.

Главная особенность этих веществ заключается в способности сохранять намагниченность в отсутствие внешнего магнитного поля.

Все постоянные магниты относятся к классу ферромагнетиков.

Кроме железа ферромагнитными свойствами обладают его «соседи» по таблице Менделеева – **кобальт** и **никель**.

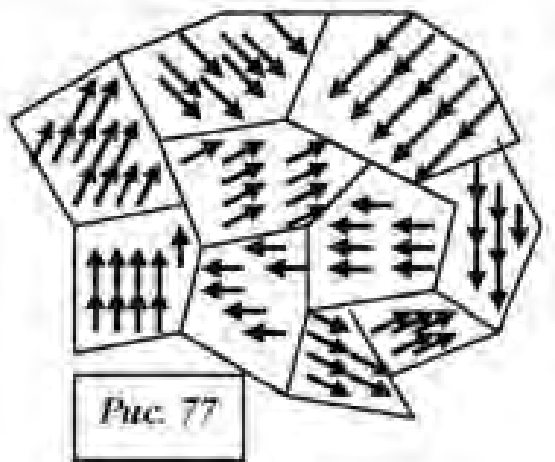
Ферромагнетики находят широкое практическое применение в науке и технике, поэтому разработано значительное число сплавов, обладающих различными ферромагнитными свойствами.

Все приведенные примеры ферромагнетиков относятся к металлам переходной группы, электронная оболочка которых содержит несколько не спаренных электронов, что и приводит к тому, что эти атомы обладают значительным собственным магнитным моментом.

В кристаллическом состоянии благодаря взаимодействию между атомами в кристаллах возникают области самопроизвольной (спонтанной) намагниченности – домены.

Размеры этих доменов составляют десятые и сотые доли миллиметра ( $10^{-4}$ – $10^{-5}$  м), что значительно превышает размеры отдельного атома ( $10^{-9}$  м).

В пределах одного домена магнитные моменты атомов ориентированы строго параллельно, ориентация магнитных моментов других доменов при отсутствии внешнего магнитного поля меняется произвольно (Рис.77).



Таким образом, и в не намагниченном состоянии внутри ферромагнетика существуют сильные магнитные поля, ориентация которых при переходе от одного домена к другому меняется случайным хаотическим образом.

Эти внутренние поля обнаружены экспериментально.

Отдельные домены можно увидеть с помощью микроскопа, если на полированную поверхность железа нанести незначительное количество мелкого железного порошка, то его частицы располагаются по границам доменов, что и делает их видимыми.

Если размеры тела значительно превышают размеры отдельных доменов, то среднее магнитное поле, создаваемое доменами этого тела, практически отсутствует.

При помещении ферромагнетика во внешнее магнитное поле происходит ориентация магнитных моментов целых доменов (всех атомов одновременно),

поэтому даже относительно слабые магнитные поля приводят к практически полной ориентации магнитных моментов всех атомов.

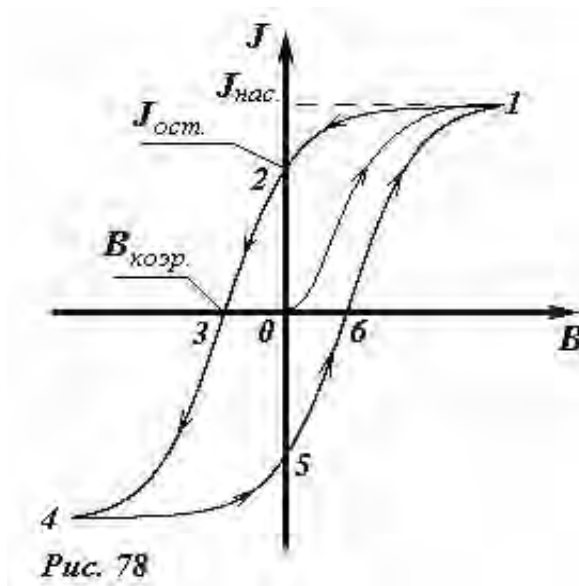
Как и для парамагнетиков, ориентации магнитных моментов препятствует тепловое движение, поэтому магнитные свойства ферромагнетиков сильно зависят от температуры.

Более того, для каждого ферромагнетика существует значение температуры, при котором доменная структура полностью разрушается, и ферромагнетик превращается в парамагнетик.

Это значение температуры называется точкой Кюри.

Так для чистого железа значение температуры Кюри приблизительно равно  $900^{\circ}\text{C}$ .

Процесс намагничивания ферромагнетиков существенно отличается от намагничивания диамагнетиков и парамагнетиков.



Пусть изначально не намагниченный железный брусок помещается в магнитное поле, индукцию которого будем медленно изменять.

На рис. 78 схематически показана зависимость его **намагниченности  $J$**  от **индукции внешнего магнитного поля  $B$** .

При включении магнитного поля и увеличении его индукции возрастает и намагниченность образца (кривая  $0-1$  на рис.).

Даже для не намагниченного образца и слабого магнитного зависимость намагниченности от индукции поля является нелинейной.

Сначала при возрастании индукции магнитная восприимчивость возрастает, достигает максимального значения, а затем спадает до нуля.

Такой вид зависимости объясняется доменной структурой – при слабом внешнем поле переориентируются только домены малых размеров, в сильном поле все магнитные моменты оказываются полностью ориентированными, поэтому дальнейшее увеличение поля не приводит к возрастанию намагниченности: намагниченность достигает предельного значения

(**намагниченность насыщения  $J_{\text{нас}}$**  - точка 1 на графике), а восприимчивость стремится к нулю.

Если после достижения насыщения начать уменьшать индукцию внешнего поля  $B$ , то намагниченность  $J$  также начнет уменьшаться (участок 1-2 на графике).

Однако зависимость  $J(B \rightarrow 0)$  будет отличаться от этой же зависимости при намагничивании – при размагничивании будет проявляться «эффект запаздывания», магнитные моменты доменов частично сохраняют первоначальную ориентацию, намагниченность оказывается больше (кривая размагничивания 1-2 лежит выше кривой намагничивания 0-1).

Даже при полном снятии внешнего поля образец остается частично намагниченным (точка 2).

Намагниченность образца при выключенном внешнем поле называется остаточной намагниченностью  $J_{\text{ост}}$ .

Именно наличие остаточной намагниченности ферромагнетиков делает возможным существование постоянных магнитов, которые и являются ферромагнитными телами с остаточной намагниченностью, сохраняющейся в отсутствии внешних полей.

Если к рассматриваемому образцу с остаточной намагниченностью приложить внешнее поле, вектор индукции которого направлен противоположно вектору намагниченности (на рисунке, соответствующие значения индукции отрицательны), то намагниченность образца будет уменьшаться (участок 2-3).

Значение индукции внешнего поля, при котором образец оказывается полностью размагниченным, называется коэрцитивной силой  $B_{\text{коэр}}$  (точка 3).

При дальнейшем увеличении модуля индукции поля процесс повторится – образец достигнет насыщения в противоположном направлении (точка 4).

При изменении внешнего поля намагниченность образца будет описываться кривой 4-5-6-1.

Таким образом, для ферромагнетика намагниченность определяется не только намагничивающим полем, но предысторией образца.

Это явление называется **магнитным гистерезисом**, а рассмотренная зависимость намагниченности от внешнего поля – **петлей гистерезиса**.

Вид кривой намагничивания (петли гистерезиса) существенно различается для различных ферромагнитных материалов, которые нашли очень широкое применение в научных и технических приложениях.

Некоторые магнитные материалы имеют широкую петлю с высокими значениями остаточной намагниченности и коэрцитивной силы, они называются **магнитно-жесткими** и используются для изготовления **постоянных магнитов**.

Для других ферромагнитных сплавов характерны малые значения коэрцитивной силы, такие материалы легко намагничиваются и перемагничиваются даже в слабых полях.

Такие материалы называются **магнитно-мягкими** и используются в различных электротехнических приборах – реле, трансформаторах, магнитопроводах и др.

Помимо того, что магнитные свойства ферромагнетиков зависят от температуры, они также могут заметно изменяться под действием механических нагрузок.

Для монокристаллических образцов магнитная восприимчивость зависит от направления магнитного поля (магнитная анизотропия).

Площадь внутри гистерезисной петли ферромагнетика характеризует энергетические потери на гистерезис или перемагничивание.

Для ферромагнитных материалов основными характеристиками являются:

- остаточная индукция  $B_r$ ;
- коэрцитивная сила  $H_c$ ;
- магнитная проницаемость  $\mu = B/H$ .

**Остаточной индукцией**, измеряемой в теслах ( $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$ ), называют магнитную индукцию, остающуюся в образце после его намагничивания и снятия магнитного поля.

**Коэрцитивной силой**, измеряемой в А/м, называют напряженность магнитного поля обратного знака, которая должна быть приложена к образцу для его размагничивания.

**Магнитная проницаемость**,  $\mu$  — физическая величина, коэффициент (зависящий от свойств среды), характеризующий связь между магнитной индукцией  $B$  и напряжённостью магнитного поля  $H$  в веществе.

Для разных сред этот коэффициент различен, поэтому говорят о магнитной проницаемости конкретной среды (подразумевая ее состав, состояние, температуру и т. д.).

Магнитная проницаемость, измеряемая в Генри на метр, характеризует интенсивность намагничивания и определяется как тангенс угла наклона к первичной кривой намагничивания  $B = f(H)$ .

### **Единицы измерения магнитных величин**

**Генри на метр** — абсолютная магнитная проницаемость вещества, в котором при напряженности магнитного поля в один ампер на метр магнитная индукция равна одному теслу:  $\mu = B/H$ ,  $1 \text{ Г/м} = (10^7/4\pi) \text{ Гс/Э}$ .

В системе СГС напряжённость магнитного поля измеряется в эрстедах (Э), в системе СИ — в амперах на метр (А/м). В технике эрстед постепенно вытесняется единицей СИ — ампером на метр,  $1 \text{ А/м} = 4\pi/1000 \text{ Э} \approx 0,01256637 \text{ Э}$ .

**Эрстед** (русское обозначение Э) — единица измерения напряжённости магнитного поля в системе СГС. Введена в 1930 году в честь датского физика Ганса Христиана Эрстеда,  $1 \text{ Э} = 1000/(4\pi) \text{ А/м} \approx 79,5775 \text{ А/м}$ .

**Магнитная индукция  $B$**  — векторная величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля (его действия на заряженные частицы) в данной точке пространства. Определяет, с какой силой  $F$  магнитное поле действует на заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $v$



Также магнитная индукция может быть определена как отношение максимального механического момента сил, действующих на рамку с током помещенную в однородное поле, к произведению силы тока в рамке на её площадь.

В системе СГС магнитная индукция поля измеряется в гауссах (Гс), в системе СИ — в теслах (Тл),

**Га́усс** (русское обозначение **Гс**, международное — **G**) — единица измерения магнитной индукции в системе СГС. Названа в честь немецкого физика и математика Карла Фридриха Гаусса.  $1 \text{ Гс} = 100 \text{ мкТл}$ ;  $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$ .

**Тэ́сла** (русское обозначение: **Тл**; международное обозначение: **T**) — единица измерения индукции магнитного поля в системе СИ, равная индукции такого однородного магнитного поля, в котором на 1 метр длины прямого проводника, перпендикулярного вектору магнитной индукции, с током силой 1 ампер действует сила 1 ньютон,  $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Классификация материалов по магнитным свойствам.
2. Природа ферромагнетизма.
3. Особенности ферромагнитных материалов.
4. Процессы намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков.
5. Магнитные потери.
6. Классификация магнитных материаловедения
7. Магнитомягкие материалы.
8. Магнитотвёрдые материалы.
9. Понятия о магнетизме и магнетиках: магнитная проницаемость, магнитная восприимчивость, ферромагнетики, парамагнетики, диамагнетики.
10. Магнитная восприимчивость магнетиков.
11. Типы магнетиков. Диамагнетики.
12. Типы магнетиков. Парамагнетики.
13. Типы магнетиков. Ферромагнетики.
14. Явление магнитного гистерезиса. Петля гистерезиса. Понятия: остаточная индукция, коэрцитивная сила.

## Практическая работа №2

### МАГНИТНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

#### Общие сведения

Различают три группы магнитных сталей и сплавов:

**магнитотвердые, магнитомягкие и парамагнитные.**

В зависимости от формы гистерезисной кривой и значений основных магнитных характеристик, различают:

магнитотвердые и магнитомягкие сплавы.

**Магнитотвердые сплавы** (рис. 1,а) характеризуются широкой петлей гистерезиса, высоким значением коэрцитивной силы  $H_c$  и применяются для изготовления *постоянных магнитов*.

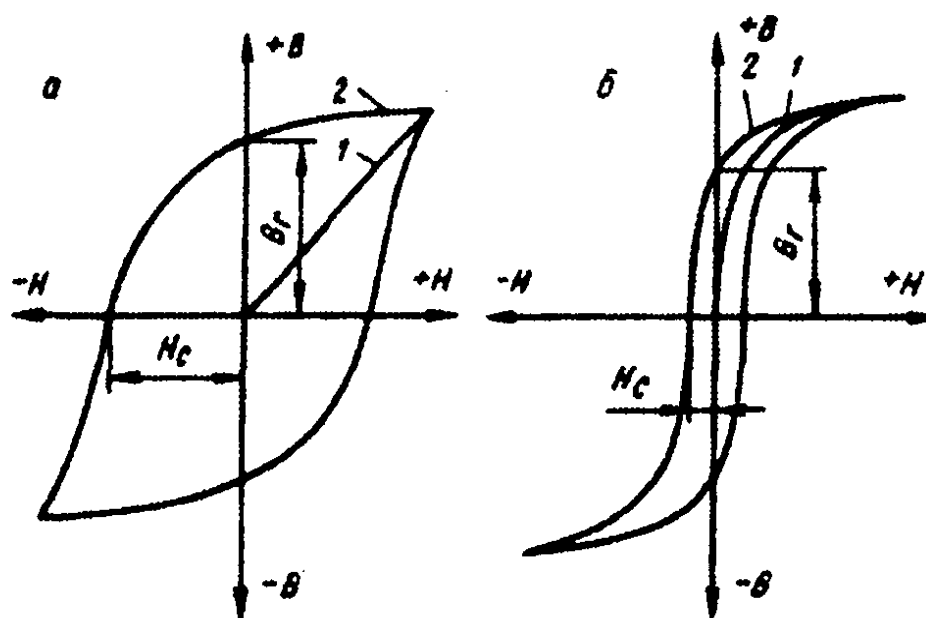


Рис.1. Зависимость магнитной индукции  $B$  от напряжённости магнитного поля  $H$ :

а) магнитотвёрдые материалы; б) магнитомягкие материалы;

1 — первичная кривая намагничивания;

2 — гистерезисная кривая намагничивания.

**Магнитомягкие сплавы** работают в условиях циклически изменяющихся магнитных полей и непрерывного перемagnetивания.

Они, наоборот, имеют узкую петлю гистерезиса, малые значения  $H_c$  и характеризуются небольшими потерями на гистерезис (рис.1,б).

Из них изготавливают сердечники трансформаторов, электродвигателей и генераторов, детали слаботочной техники, т. е. такие изделия, которые подвергаются многократному переменному намагничиванию.

## Магнитотвёрдые стали и сплавы

Такие стали и сплавы применяют для изготовления постоянных магнитов.

Магнитная энергия постоянного магнита тем выше, чем больше остаточная индукция  $B_r$  и коэрцитивная сила  $H_c$ .

Магнитная энергия пропорциональна произведению  $B_r$  x  $H_c$  (площади гистерезиса на графике).

Учитывая, что величина остаточной индукции  $B_r$  ограничена магнитным насыщением ферромагнетика, (железа), увеличение магнитной энергии (площади гистерезиса) достигается повышением коэрцитивной силы  $H_c$ .

Эта группа материалов должна обладать высокими значениями коэрцитивной силы и остаточной индукции и сохранять высокий уровень этих свойств в течение длительного времени.

Для получения высокой коэрцитивной силы стали должны иметь неравновесную структуру, обычно — мартенсит с большим количеством дефектов строения (дислокаций, блоков, границ-зерен и т. д.), являющихся источником искажений кристаллической решетки и внутренних напряжений.

Условно к магнитотвердым материалам (высококоэрцитивным) относят материалы  $H_c > 4$  кА/м.

Изделия из магнитотвердых материалов работают в магнитной цепи, включающей воздушный зазор и магнитопровод из магнитомягкого материала.

Благодаря наличию воздушного зазора образуются свободные магнитные полюса и размагничивающее поле, в котором находится магнитотвердый материал.

Для полной характеристики магнитотвердого материала необходимо знать остаточную индукцию  $B_p$ , коэрцитивную силу  $H_c$  и величину  $(BH)_{\max}$ .

Остаточная индукция определяет магнитный поток, создаваемый магнитотвердым материалом в магнитной цепи.

Коэрцитивная сила — сопротивляемость данного материала воздействию собственного размагничивающего поля и внешних размагничивающих полей.

Произведение  $(BH)_{\max}$  — энергию магнитного поля в материале.

Заготовки для постоянных магнитов обычно изготавливают литьем или методами порошковой металлургии.

Для постоянных магнитов применяют **высокоуглеродистые стали** со структурой мартенсита, содержащие около 1 % С, дополнительно легированные хромом (3%) — ЕХЗ, а также одновременно хромом и кобальтом — ЕХ5К5, ЕХ9К15М2.

Например, сталь ЕХ6К6 содержит 1 % С, 6 % Сг и 6 % Со. Легирующие элементы повышают магнитные характеристики, одновременно улучшая механическую и температурную стабильность постоянных магнитов. Эти стали подвергают нормализации, закалке и низкому отпуску.

Высокие магнитные свойства и наибольшее промышленное значение имеют

**сплавы на основе Fe—Ni—Al и Fe—Ni—Al—Co с добавкой 2-4 % Си.**

Иногда их называют сплавами типа «альнико».

В маркировке этих сплавов присутствуют те же буквы, что и в маркировке сталей.

Химический состав и магнитные свойства ряда литых сплавов для постоянных магнитов приведены в табл.1 ( в конце лекции).

Эти сплавы тверды, хрупки и не поддаются деформации, поэтому магниты производят в литом виде.

После литья проводят только шлифование.

Сплавы этой системы подвергают термомагнитной обработке, которая состоит из нагрева до 1280-1300 °С, выдержки при этой температуре для получения однофазного состояния, быстрого охлаждения до 900 °С с последующим медленным охлаждением в магнитном поле с  $H_c = 160-280$  кА/м.

Затем проводится отпуск при 560 - 630 °С, длительность которого определяется маркой сплава.

В процессе охлаждения при 900-650 °С в магнитном поле анизотропные по форме выделившиеся частицы фазы с высоким магнитным насыщением располагаются своей длинной осью в направлении, параллельном вектору напряженности магнитного поля.

Для изготовления небольших и точных по размерам магнитов из сплавов типа «альнико» применяют методы порошковой металлургии.

По составу спеченные сплавы близки к литым, они легче обрабатываются, но по магнитным свойствам несколько им уступают.

Очень хорошие, но дорогие магниты изготавливают из сплавов с высоким содержанием кобальта, составляющего 25-50 %.

Эти сплавы известны под названием «пермендур» (50%Fe, 50%Co), «перминвар» (45 % Ni, 25 % Co, 23 % Fe).

Их обычно легируют небольшими добавками Mo, V или Cr.

Недавно разработанный сплав *гиперко 5-HS* содержит 2 %V, 48,5%Co, остальное — железо.

**Сплавы системы Fe—Cr—Co** по своим магнитным свойствам близки к сплавам типа «альнико», но обладают более высокими механическими свойствами и деформируются не только в горячем, но и в холодном состоянии. Сплавы подвергают закалке при 950-1000 °С, холодной прокатке и старению при 600 °С.

Магнитные свойства сплавов системы Fe—Cr—Co представлены в табл. 2.

Высокая коэрцитивная сила в **сплавах системы Fe—V—Co («викаллоу»)** возникает в результате  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения (V - ванадий).

Магнитные свойства формируются благодаря холодному деформированию и последующему отпуску.

В сплавах этой системы  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение происходит при холодном деформировании.

Увеличение степени деформирования (обычно не менее 80-90 %) приводит к полному  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращению и созданию в сплаве кристаллической текстуры.

Рост  $H_c$  происходит в процессе последующего отпуска в двухфазной  $\alpha + \gamma$ -области вследствие обратного превращения.

**Сплавы, содержащие 12 % Co и 10-20 % Mo, называют «комол».**

Эти сплавы деформируются только в горячем состоянии, так как высокое значение коэрцитивной силы достигается в результате распада пересыщенного твердого раствора.

Постоянные магниты по порошковой технологии изготавливают как из хрупких сплавов систем Fe—Ni—Al и Fe—Co—Ni—Al, так и из пластичных сплавов систем Si—Ni—Co, Fe—Co—Mo и др.

Как правило, в качестве исходных материалов используют порошки чистых металлов и лигатур.

Порошки смешивают в пропорции, необходимой для получения порошкового сплава заданного состава.

Полученную смесь прессуют в виде магнитов нужной формы и проводят высокотемпературное спекание в защитной атмосфере или вакууме.

В настоящее время созданы новые магнитные материалы с применением таких редкоземельных элементов, как **неодим и самарий**.

В России широко осуществляют производство магнитов на основе химического соединения **Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B (неодим — железо - бор)**., полученные методом порошковой металлургии с последующим прессованием и спеканием в атмосфере аргона при 1370 °С.

Необходимость расширения области применения магнитотвердых материалов позволила разработать принципиально новые материалы: **магнитопласты и магнитоэласты**.

В них используется смесь резины и пластмассы с размолотым порошком магнитотвердого феррита.

Вместо феррита применяют порошки «альнико», соединений РЗМ, например Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B (неодим — железо - бор).

Существенное преимущество формообразования магнитов с помощью различных связующих веществ — возможность получения сложных магнитных текстур, например, в многополюсных кольцевых магнитах с количеством полюсов от двух до нескольких десятков.

## Магнитомягкие материалы

Основными требованиями к магнитомягким материалам, относящимся к ферромагнетикам, являются:

- низкие значения коэрцитивной силы и высокая магнитная проницаемость;
- способность намагничиваться до насыщения в слабых полях;
- малые потери при перемагничивании и на вихревые токи.

Для удовлетворения этих требований металл должен обладать гомогенной структурой, быть чистым от примесей и включений и иметь крупнозернистое строение, свободное от внутренних напряжений, вызываемых наклепом.

Общие требования, предъявляемые к магнитомягким материалам: высокая магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила и малые потери при перемагничивании.

Для получения минимальной коэрцитивной силы и высокой магнитной

проницаемости ферромагнитный материал должен быть чистым от примесей и включений, иметь гомогенную структуру (чистый металл или твердый раствор).

Наиболее вредными примесями являются углерод (в виде  $\text{Fe}_3\text{C}$ ), кислород и сера.

Магнитная проницаемость возрастает с увеличением зерна феррита.

Наклеп, даже слабый, снижает магнитную проницаемость и повышает  $H_c$ , поэтому материал должен быть полностью рекристаллизован для устранения внутренних напряжений, вызываемых наклепом.

В качестве магнитомягкого материала применяют **технически чистое железо**, в котором все примеси, особенно углерод, являются вредными.

Содержание углерода не должно быть более 0,025 %.

Для устранения наклепа и получения крупного зерна листовой металл подвергают высокотемпературному отжигу в безокислительной атмосфере.

Технически чистое железо применяют для изготовления реле, сердечников, электромагнитов постоянного тока.

Низкое удельное электрическое сопротивление увеличивает потери при перемагничивании.

Поэтому применение технически чистого железа ограничивается устройствами с постоянным магнитным полем.

Магнитную текстуру получают с помощью термомагнитной обработки. С этой целью изделие подвергают высокотемпературному отжигу и охлаждают затем в магнитном поле.

**Магнитомягкие стали (электротехнические тонколистовые стали).**

Эти стали применяют для якорей и полюсов электротехнических машин, магнитопроводов, статоров и роторов электродвигателей, для силовых трансформаторов и т. д.

Широко применяют **низкоуглеродистые (0,05 — 0,005% C) железокремнистые сплавы (0,8 — 4,8% Si).**

**Кремний**, образуя с железом твердый раствор, сильно повышает электросопротивление, а следовательно, уменьшает потери на вихревые токи, повышает магнитную проницаемость, немного снижает коэрцитивную силу и потери на гистерезис вследствие вызываемого им укрупнения зерна, графитизирующего действия и лучшей раскисления стали.

Однако кремний понижает индукцию в сильных полях и повышает хрупкость сплава, особенно при содержании его в количестве 3 - 4%.

Листовую электротехническую сталь (сплавы Fe—Si) для рекристаллизации, укрупнения зерна и выгорания углерода подвергают специальному отжигу.

Лучшие результаты дает отжиг в водороде, диссоциированном аммиаке или в вакууме при 1100 — 1200°C.

Резание, холодная штамповка, навивка ленточных сердечников ухудшают магнитные свойства стали; возрастает коэрцитивная сила, а следовательно, и потери на гистерезис, резко падает индукция в слабых и средних полях.

Для восстановления магнитных свойств рекомендуется отжиг при нагреве до 750-900°C.

Электротехническую сталь, предназначенную для магнитных цепей электрических машин, аппаратов и приборов, изготавливают в виде рулонов, листов и резаной ленты.

Сталь подразделяют (ГОСТ 21427.0 — 75):

а) по структурному состоянию и виду прокатки на классы:

1. Горячекатаная изотропная (ГОСТ 21427.3 — 75);
2. Холоднокатаная изотропная (ГОСТ 21427.2 — 75);
3. Холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой (ГОСТ 21427.1—75);

б) по содержанию кремния на группы:

0 — с содержанием кремния до 0,4%,

1-е 0,4- 0,8% Si,

2-е 0,8-1,8% Si,

3-е 1,8-2,8% Si,

4-е 2,8-3,8% Si,

5-с 3,8-4,8% Si;

в) по основной нормируемой характеристике на группы в зависимости от удельных потерь при магнитной индукции (в Теслах) и частоте (Гц).

*Холоднокатаную изотропную тонколистовую электротехническую сталь* выпускают следующих марок: 2011, 2012, 2013; 2111, 2112, 2211, 2212; 2311, 2312; 2411 и 2412. Удельные потери у этих сталей ниже, чем у горячекатаной стали. Чем тоньше лист, тем меньше потери. Магнитная индукция при напряжении магнитного поля 2500 А/м составляет для малокремнистых сплавов 1,6 Т и для сплавов, содержащих 4,0% Si,— 1,5 Т.

Холоднокатаная анизотропная (текстурованная) листовая содержит 2,8-3,8% Si (марки 3411, 3412, 3413; 3414, 3415, 3416, 3404, 3405 и 3406). Эта сталь относится к ферритному классу сталей, не испытывающих при нагреве  $\alpha$  и  $\gamma$ -превращений.

Магнитные свойства анизотропной стали в продольном направлении прокатки значительно выше, чем в поперечном. Это связано с тем, что в каждом зерне текстурованной стали кристаллографическая решетка ориентирована так, что в плоскости прокатки лежит плоскость (ПО), а в направлении прокатки — ребро куба [100]. Такую текстуру называют ребровой. Для железа и сплавов Fe — Si ребро куба [100] является направлением легкого намагничивания. Подобная текстура достигается многократной холодной прокаткой и отжигом.

– В текстурованной холоднокатаной стали по сравнению с изотропной сталью, содержащей то же количество кремния, при больших значениях индукции (1,75 — 1,9 Т) потери на перемагничивание меньше.

*Магнитномягкие сплавы классифицируют по химическому составу, магнитным свойствам и качеству.*

*По химическому составу* сплавы разделяют на:

- сплавы железа с никелем;
- железа с кобальтом;
- железа с алюминием;
- железа с хромом.

*Пермаллои* — *железоникелевые сплавы* с высокими значениями магнитной

проницаемости  $\mu$ . Пермаллоиды содержат никель в количестве 30-35 %, 45-53 %, 64-68 % и 71-83 %.

Для получения высоких значений индукции в слабых магнитных полях используют сплавы с высокой начальной и максимальной магнитной проницаемостью, называемые пермаллоем.

Различают пермаллоиды:

1) низконикелевые: 50Н, 65НП, 50НХС (40 — 65% Ni), у которых начальная проницаемость  $\mu_0 < 4000$  Гс/Э и намагниченность насыщения  $\sim 15\,000$  Гс;

2) высоконикелевые 79НМА (78 — 80% Ni)  $\mu_0 < 35\,000$  Гс/Э, но меньшей намагниченностью насыщения — 7500 Гс.

Пермаллоиды нередко легируют молибденом и хромом, которые уменьшают чувствительность к механической деформации и повышают удельное электросопротивление и магнитную проницаемость. Медь повышает электросопротивление и стабилизирует свойства. Пермаллоиды изготовляют из чистейших сортов железа и никеля вакуумной переплавкой. Термическая обработка сводится к отжигу при 1100 — 1300°C в вакууме (водороде) с последующим охлаждением с определенной скоростью.

Наивысшую магнитную проницаемость имеют пермаллоиды с наиболее высоким содержанием никеля — 72-83 %.

**Железкокобальтовые сплавы** характеризует большая магнитострикция, низкое  $\rho$  (0,06 мкОм·м) и низкая технологическая пластичность.

Пластичность сплавов с 50 % кобальта улучшают легированием ванадием (1,5-2,0 %), а в сплавах с низким содержанием кобальта (18-27%) для этой цели используют хром (0,5-0,7 %).

**Тройные сплавы являются основой для перминваров и изопермов** — сплавов, которые сохраняют постоянной магнитную проницаемость с точностью  $\pm 5\%$  в магнитных полях невысокой напряженности.

К ним относятся сплавы железа с 45-47 % никеля и 25 % кобальта.

Сохранение постоянной магнитной проницаемости в слабых полях свойственно также тройным сплавам **железо—никель—медь** при содержании 47 % никеля и 5 % меди.

Главным достоинством сплавов **железа с хромом (13 — 17 %)** является их хорошая коррозионная стойкость в пресной и морской воде, атмосфере (в том числе во влажной и морском тумане) и различных слабоагрессивных промышленных средах. По сравнению с коррозионностойкими сталями с тем же содержанием хрома, магнитомягкие сплавы содержат не более 0,02 % углерода во избежание образования карбидов хрома и ухудшения магнитных характеристик.

## Парамагнитные стали

Многие детали приборов и машин должны быть изготовлены из немагнитного материала. Ранее для этой цели применяли цветные металлы (латунь, бронзу). В настоящее время широко используют парамагнитные аустенитные стали 12Х18Н9, 55Г9Н9Х3.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Классификация магнитных материаловедения
2. Магнитомягкие материалы. Основные характеристики.
3. Низкочастотные магнитомягкие материалы.
4. Высокочастотные магнитомягкие материалы.
5. Магнитные материалы специального назначения.
6. Магнитотвёрдые материалы.
7. Понятия: намагниченность насыщения, остаточная намагниченность магнитно-мягкие, магнитно-жесткие материалы.
8. Магнитно-твёрдые стали и сплавы. Примеры составов. Свойства. Применение.
9. Магнитно-мягкие материалы. Примеры составов. Свойства. Применение.
10. Классификация магнитно-мягких сплавов по химическому составу, магнитным свойствам и качеству.

## Практическая работа №3

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

### Общие сведения

#### Электротехнические стали

К электротехническим сталям (ЭТС) относится большой класс магнитомягких ферромагнитных материалов, используемых для изготовления магнитопроводов электрических машин и приборов, вырабатывающих или преобразующих электрическую энергию.

Электротехнические стали используют в генераторах, электродвигателях, трансформаторах, реле, пускателях, электромагнитах и др.

Для экономии электроэнергии очень важно снижение магнитных потерь и повышение магнитной проницаемости, т. е. улучшение.

В качестве ЭТС можно использовать технически чистое железо.

Однако низкое электрическое сопротивление железа увеличивает потери при перемагничивании.

Более высокое электрическое сопротивление имеют электротехнические низкоуглеродистые стали, дополнительно легированные 0,8-4,8 % кремния.

Кремний образует с  $\alpha$ -железом легированный твердый раствор.

Благодаря более высокому электрическому сопротивлению снижаются потери на вихревые токи.

Введение кремния одновременно повышает магнитную проницаемость, а вследствие роста зерна снижаются потери на гистерезис.

Однако при содержании около 4 % Si происходит охрупчивание стали, что затрудняет получение тонколистового металла.

Листовую электротехническую сталь после прокатки подвергают высокотемпературному отжигу в вакууме или в атмосфере сухого водорода при 1100-1200 °С.

Для уменьшения тепловых потерь сердечники кремнистой стали изготавливают из тонких (менее 1 мм) листов с прослойками из изоляционных материалов.

Кристаллы  $\alpha$ -железа характеризуются ярко выраженной анизотропией магнитных свойств.

В анизотропных ЭТС, благодаря определенной ориентации зерен (текстуры), можно получать очень высокие магнитные свойства вдоль направления легкого намагничивания.

В решетке  $\alpha$ -Fe таким направлением является ребро куба (100), вдоль диагонали (111) намагничивание происходит труднее и наиболее трудно — вдоль диагонали куба (110).

При одинаковой толщине листа и химическом составе наибольшие удельные потери имеет горячекатаная изотропная сталь, а наименьшие —

холоднокатаная анизотропная.

В холоднокатаной листовой стали с высоким содержанием кремния можно получить такое расположение кристаллитов, когда направление прокатки будет совпадать с направлением легкого намагничивания (ребро куба (100)), а направление поперек прокатки в плоскости листа будет совпадать с диагональю (100) плоскости элементарной кубической ячейки (рис.1).

По имени изобретателя такая текстура называется текстурой Госса (Goss-Texture).

Современная технология производства высших сортов электротехнической стали предусматривает ее выплавку с минимальным содержанием углерода и заданным содержанием кремния, прокатку листа в горячем состоянии на толщину около 2,5 мм, отжиг при 800 °С и холодную прокатку на толщину 0,35-0,50 мм.

При большей холодной деформации (45-60 %) сталь получает текстурированную до 90 % структуру, при деформации около 10 % — малотекстурированную структуру.

Если прокатка проводится только в горячем состоянии, то текстура не образуется, и магнитные свойства вдоль и поперек прокатки будут одинаковы.

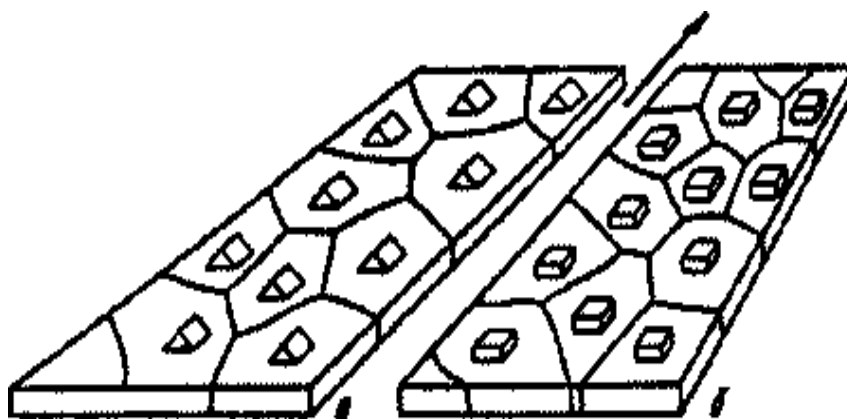


Рис. 1. Положение элементарных ячеек кристаллической решетки в листе с ребровой текстурой (текстурой Госса) (а) и кубической текстурой (б) (стрелкой показано направление прокатки)

Основными деталями таких электрических машин, как электродвигатели, генераторы, трансформаторы, дроссели и т. д., являются магнитопроводы, составленные из тонких листов.

После технологических операций (штамповки, резки и т. д.), необходимых для изготовления деталей магнитопроводов, во избежание наклепа и для укрупнения зерна проводят отжиг при 1100-1200 °С в атмосфере водорода.

Анизотропную сталь применяют для изготовления таких электромашин, в которых возможно направить магнитный поток в направлении прокатки, где сталь имеет самые высокие магнитные свойства, — крупногабаритных трансформаторов и электромашин, а также электромашин и приборов с витым сердечником.

Чем лучше магнитные свойства ЭТС, тем больше ухудшаются ее свойства при отклонении магнитного потока от направления прокатки и тем выше

требования к конструкции машины и технологии изготовления ее магнитопровода.

**Изотропные ЭТС** применяют в основном для изготовления электромашин с вращающимся магнитопроводом.

Используют их также в распределительных трансформаторах некоторых видов, сварочных трансформаторах, силовых трансформаторах радиоаппаратуры, реле и других изделиях, где магнитный поток не вращается, но охватывает все направления в плоскости листа, что делает применение анизотропных сталей неэффективным.

Требуемые показатели магнитных свойств изотропных ЭТС (а следовательно, диапазон массовой доли кремния) устанавливают в зависимости от типа и размера изготавливаемых из них электромашин.

Вследствие роста цен на топливо и электроэнергию, главным фактором является повышение экономичности машин, повышение их КПД.

Поэтому область применения ЭТС с низким содержанием кремния и легированных — двигатели мощностью не более 2-3 кВт.

Для машин мощностью 400-1000 кВт и более все шире применяют лучшие сорта высоколегированной стали.

Для работы в слабых магнитных полях, например в телекоммуникационных системах, применяют *пермаллои*, представляющие собой Fe—Ni сплавы с определенными узкими пределами содержания никеля (около 79 %).

Иногда их дополнительно легируют Mo и Cr, улучшающими способность сплавов к пластической деформации и их магнитную проницаемость.

Высоко никелевые пермаллои 79НМ, 81НМА характеризуются очень высокой магнитной проницаемостью в слабых полях, в десятки раз превышающей магнитную проницаемость чистого железа.

Пермаллои получают вакуумным переплавом, прокатывают на ленты и листы магнитопроводов с последующим отжигом при 1100-1300 °С в вакууме или водороде.

Для работы в слабых полях (радио, телефон) разработан заменитель дорогих пермаллоев — сплав *альсифер*, содержащий 5,4 %Al, 9,6%Si, остальное — железо.

Из-за хрупкости альсифера изделия из него изготавливают в виде тонкостенных отливок или методом порошковой металлургии.

Для высокочастотной техники необходимы материалы с чрезвычайно высоким электросопротивлением, сохраняющие высокую магнитную проницаемость в широком частотном диапазоне.

Этим требованиям отвечают *ферриты* (не путать с ферритом в сплавах железа!), представляющие собой магнитную керамику, полученную спеканием и состоящую из Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и оксидов таких металлов, как Mn, Mg, Zn, Li (MnO, MgO, ZnO, Li<sub>2</sub>O).

Фактически ферриты являются полупроводниками, их электросопротивление на 6—12 порядков превышает электросопротивление железа.

Благодаря этому, даже при самых высоких частотах они имеют

незначительные потери от вихревых токов.

## Ферриты

Ферриты получают спеканием порошков, состоящих из  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и окислов двухвалентных металлов ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{MnO}$  и др.).

Специфическими свойствами ферритов по сравнению с обычными ферромагнетиками являются высокое электрическое сопротивление  $10^3 — 10^7$  Ом-см (что приводит к малым потерям при высоких частотах) и относительно невысокая намагниченность насыщения  $\sim 100 — 20\,000$  Гс.

Чаще применяют магнитомягкие ферриты  $\text{NiO} — \text{ZnO} — \text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{MnO} — \text{ZnO} — \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Ферриты применяют для работы при высоких и сверхвысоких частотах, где использование металлических ферромагнетиков невозможно из-за больших потерь электромагнитной энергии.

Их используют в радиоэлектронике и радиотехнике для магнитных стержневых антен, сердечников магнитных усилителей, в импульсных трансформаторах и т. д.

Ферриты обеспечивают миниатюризацию важных узлов современных приборов.

В запоминающих устройствах ЭВМ применяют ферриты  $\text{MgO} — \text{MnO} — \text{Fe}_2\text{O}_3$  с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) —  $0,12\text{ВТ}$  (коэрцитивная сила  $H_c = 0,12$  Э, ВТ — вычислительная техника),  $0,9\text{ВТ}$ ,  $1,3\text{ВТ}$  и др.

Важной характеристикой ферритов ППГ является время перемагничивания, необходимое для изменения магнитного состояния сердечника от  $+B$ , до  $-B$ .

Быстродействие растет с уменьшением коэрцитивной силы.

В сверхвысокочастотной технике (СВЧ) используют не только обычные ферриты, но и ферриты  $\text{MgO} — \text{MnO} — \text{Fe}_2\text{O}_3$ , обладающие очень высоким электросопротивлением:  $10^8 — 10^9$  Ом-см.

Недостатки ферритов по сравнению с металлическими ферромагнетиками:

- низкая температурная стабильность (точка Кюри ниже  $200^\circ\text{C}$ );
- низкая индукция насыщения ( $\sim 4000$  Гс), затрудняющая использование их для мощных низкочастотных трансформаторов;
- высокие твердость и хрупкость (возможно только шлифование).

В ряде случаев для электромашиностроения необходимы немагнитные материалы.

В качестве заменителей бронзы, латуни и других сплавов цветных металлов применяют немагнитные стали и чугуны, имеющие аустенитную структуру.

Такая структура обеспечивается высоким содержанием марганца и никеля, расширяющих  $\gamma$ -область структурной диаграммы.

Парамагнитными свойствами обладают стали марок  $12\text{X}18\text{H}10\text{T}$ ,  $10\text{X}14\text{Г}14\text{H}4\text{T}$ ,  $40\text{Г}14\text{H}9\text{Ф}2$ ,  $40\text{X}14\text{H}9\text{X}3\text{ЮФ}2$  и др.

## Электротехнические сплавы

Стали и сплавы этого типа используют:

- либо для преобразования электрической энергии в тепловую, т.е. с высоким электросопротивлением;
- либо, наоборот, в качестве материалов, имеющих минимальное электросопротивление.

Первая группа электротехнических сплавов имеет высокое электросопротивление и используется для изготовления электронагревательных элементов и реостатов.

Вторая группа электротехнических сплавов, имеющих низкое электросопротивление, используется для изготовления проводниковых элементов, проводов и др.

Сплавы высокого электросопротивления представляют собой твердые растворы высокой концентрации, у которых электросопротивление меняется по криволинейному закону.

Электросопротивление сплавов на основе твердого раствора намного выше электросопротивления чистых компонентов (рис.2).

Значения этой характеристики не должны существенно меняться при изменении температуры.

В качестве реостатных сплавов применяют сплавы на основе меди с добавками Ni, Mn и Zn.

Медноникелевые сплавы с 40-50 % Ni (константан МНМц40-1,5, копель МНМц45-0,5) имеют максимальное электросопротивление, которое почти не меняется с температурой.

Их максимальная рабочая температура во избежание окалинообразования не должна быть выше 500 °С.

Окалиностойкость определяет срок службы нагревательных элементов печей и приборов, имеющих значительно более высокую температуру.

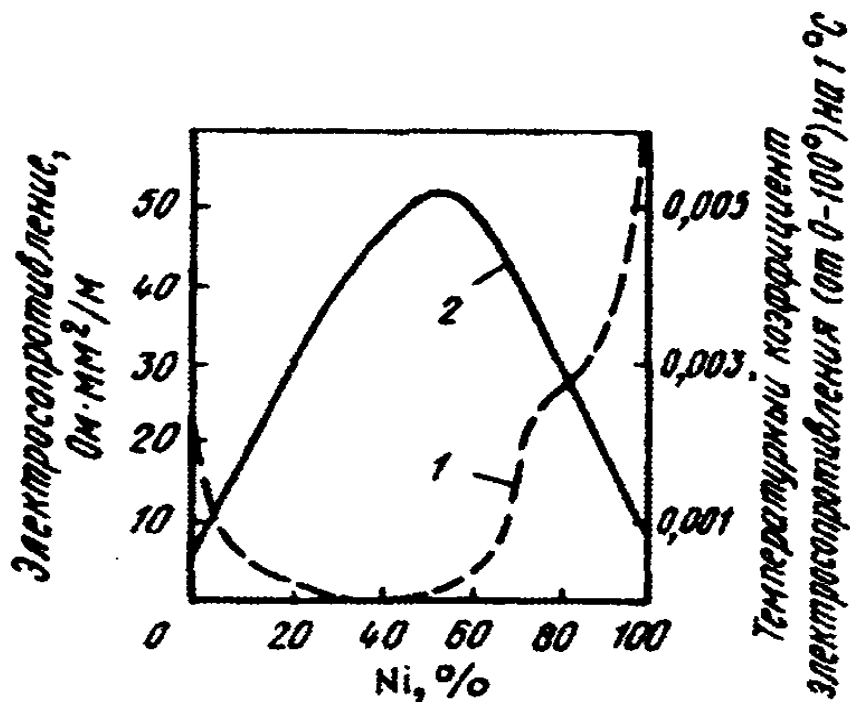


Рис. 2. Электрические свойства сплавов Cu—Ni:  
 1) температурный коэффициент электросопротивления;  
 2) электросопротивление

### Применение электротехнических сплавов

Для нагревателей применяют ферритные стали, легированные Cr и Al (хромали), а также сплавы на основе хрома и никеля, например нихром Х20Н80, содержащий около 20 % Cr и 80 % Ni.

Его допустимая рабочая температура составляет не менее 1150 °С.

Молибденовые нагреватели, хотя и имеют более высокую температуру эксплуатации (до 1500 °С), но из-за низкой жаростойкости могут работать только в вакууме и в среде инертных газов.

Для изготовления термопар необходима проволока не только с высокой жаростойкостью, но и прямолинейной зависимостью электродвижущей силы от температуры.

В качестве материала для электродов термопар применяют проволоку из платины (один электрод) и сплава платины с 10 % Rh (рутений).

Такие термопары можно использовать для измерения высоких температур вплоть до температуры жидкой стали.

Для измерения более низких температур (до 1000°С) применяют сплавы Ni с 2% Al (алюмель) и Ni с 10% Cr (хромель).

В качестве проводниковых материалов применяют не сплавы, а чистые металлы, такие как медь, алюминий, реже — серебро.

Проводниковые металлы должны содержать минимальное количество

примесей, так как легирование повышает электросопротивление.

Особую группу проводниковых материалов составляют сверхпроводники.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Классификация материалов с особыми свойствами по применению.
2. Свойства проводниковых материалов.
3. Физическая природа электропроводности металлов.
4. Зависимость удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры.
5. Влияние примесей и дефектов структуры на удельное сопротивление металлов.
6. Электросопротивление тонких металлических плёнок.
7. Материалы высокой проводимости.
8. Проводниковая медь и её сплавы.
9. Проводниковый алюминий.
10. Благородные металлы.
11. Тугоплавкие металлы.
12. Неметаллические проводники.
13. Материалы на основе графита.
14. Контактные материалы.
15. Материалы для неподвижных электрических контактов.
16. Материалы для разрывных электрических контактов.
17. Материалы для скользящих электрических контактов.
18. Материалы высокого удельного сопротивления.
19. Сплавы для резисторов и технических сопротивлений.
20. Материалы для нагревательных элементов.
21. Сплавы для термопар.
22. Сверхпроводящие материалы.
23. Основные свойства диэлектриков.
24. Газообразные диэлектрики.
25. Жидкие диэлектрики.
26. Неорганические твёрдые диэлектрики.



## Практическая работа №4

# СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

### Общие сведения

## СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

С понижением температуры наблюдается монотонное падение электросопротивления. Вблизи абсолютного нуля у многих металлов и сплавов происходит резкое падение электросопротивления и они становятся сверхпроводниками (рис.1).

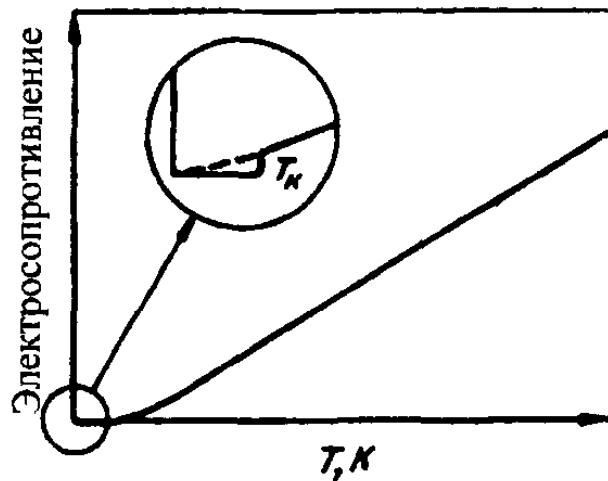


Рис.1. Влияние температуры на электросопротивление сверхпроводящих материалов

**Сверхпроводимость** — способность материалов не оказывать сопротивление электрическому току при температурах ниже характерной для них критической температуры  $T_K$ .

Впервые сверхпроводимость обнаружил в 1911г. голландский ученый Гейке Камерлинг-Оннес, который наблюдал скачкообразное исчезновение сопротивления ртути до неизмеримо малой величины при температуре 4,2 К (рис. 2).

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.

Магнитное поле в объеме сверхпроводников при температурах ниже критической равно 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  $10^{-8}$  мм. Это явление называется эффектом Мейснера.

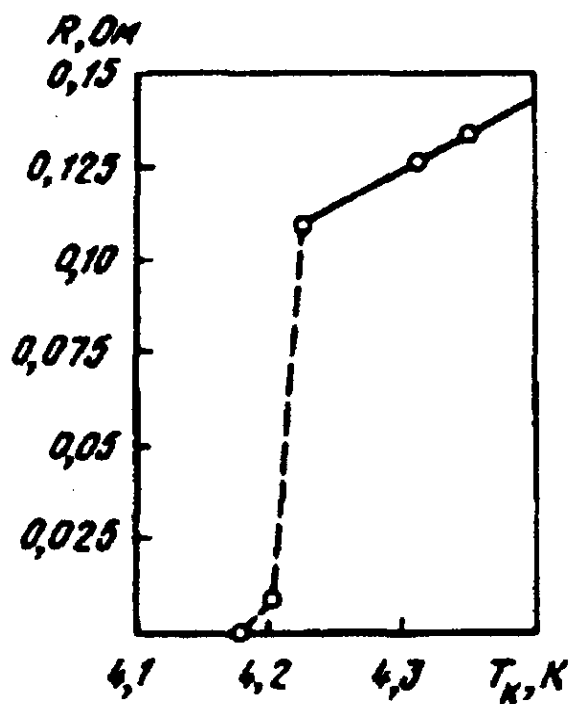


Рис.2. Эффект сверхпроводимости ртути в эксперименте Камерлинг-Онесса (1911 г.)

Подтверждением того, что сверхпроводник становится диамагнетиком, является известный эффектный опыт свободного парения постоянного магнита над сверхпроводящей свинцовой пластиной. По преданию гроб с телом пророка Магомета висел в пространстве без всякой поддержки, поэтому этот опыт называют экспериментом с «магометовым гробом».

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, имеющих 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  $H_k$  более определенного критического значения. Критическое магнитное поле, подобно критической температуре, является основной характеристикой сверхпроводящего материала. При превышении  $T_k$  или  $H_k$  происходит скачкообразное восстановление электросопротивления и магнитное поле проникает в металл.

Одним из главных преимуществ сверхпроводников является возможность достижения высоких плотностей тока. Чем выше плотность тока, тем компактнее приборы, меньший 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 ( $T_{кр} = 9,2 K$ ). Однако для ниобия характерны низкие значения критического магнитного поля (около  $0,24 Tл$ ), что недостаточно для его широкого применения. Хорошим сочетанием критических параметров  $T_k$  и  $B_k$  отличаются сплавы и интерметаллические соединения ниобия с цирконием, титаном, оловом и германием. В табл.1 приведены критические параметры сверхпроводников, представляющих практический интерес.

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  $2,5 Tл$  критическая плотность тока составляет: для Nb—Zr —  $1 kA/mm^2$ ; Nb—Ti —  $2,5 kA/mm^2$ ; Nb<sub>3</sub>Sn —  $17 kA/mm^2$ ; V<sub>3</sub>Ga —  $5 kA/mm^2$ .

К наиболее распространенным сверхпроводящим материалам относится сплав Nb—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.

Таблица 1. Критические параметры сверхпроводящих материалов

Сверхпроводящий материал	Критический параметр	
	$T_c, K$	$B_c, Tл.$ при $T_c = 4,2 K$
Nb—Zr	9-11	7-9
Nb—Ni	8-10	9-13
Nb <sub>3</sub> Sn	18,0	22-25
Nb <sub>3</sub> Al <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub>	20,3-20,5	40
Nb <sub>3</sub> Ga	20,2	34
Nb <sub>3</sub> Ge	23,2	37
V <sub>3</sub> Ga	14,5-15,0	21
V <sub>3</sub> Si	17,0	23

При изготовлении сверхпроводящего кабеля в бруске меди просверливают множество отверстий и в них вводят тонкие стержни Nb—Ti. Брусочек 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 (рис. 3).

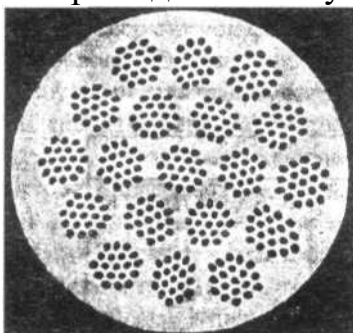


Рис. 3. Поперечное сечение многожильного сверхпроводящего композита с 361 ниобий-титановой жилой в медной матрице

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 Nb<sub>3</sub>Sn 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 обработкой происходит диффузия олова в ниобий, и на его поверхности образуется тонкая пленка Nb<sub>3</sub>Sn. Из-за ничтожной растворимости медь в ниобий практически не диффундирует. Схема бронзовой

технологии представлена на рис.4. Полученные провода достаточно пластичны, легко гнутся и укладываются плетением в кабель, сохраняя целыми пленки  $Nb_3Sn$ .

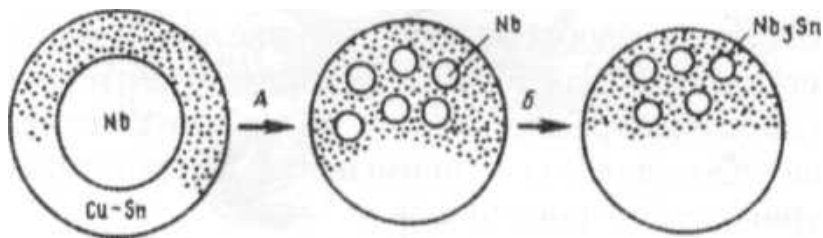


Рис. 4. Схема бронзовой технологии изготовления многожильных проводов на основе  $Nb_3Sn$ :

*A* — сборка, волочение и отжиг; *B* — термообработка.

Для получения сверхпроводящих лент из соединений интерметаллидов кроме того применяют метод химического осаждения из газовой фазы. Его использование позволяет синтезировать соединение  $Nb_3Ge$ , имеющее наиболее высокую критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние.

Простота изготовления, благоприятное сочетание электрических и

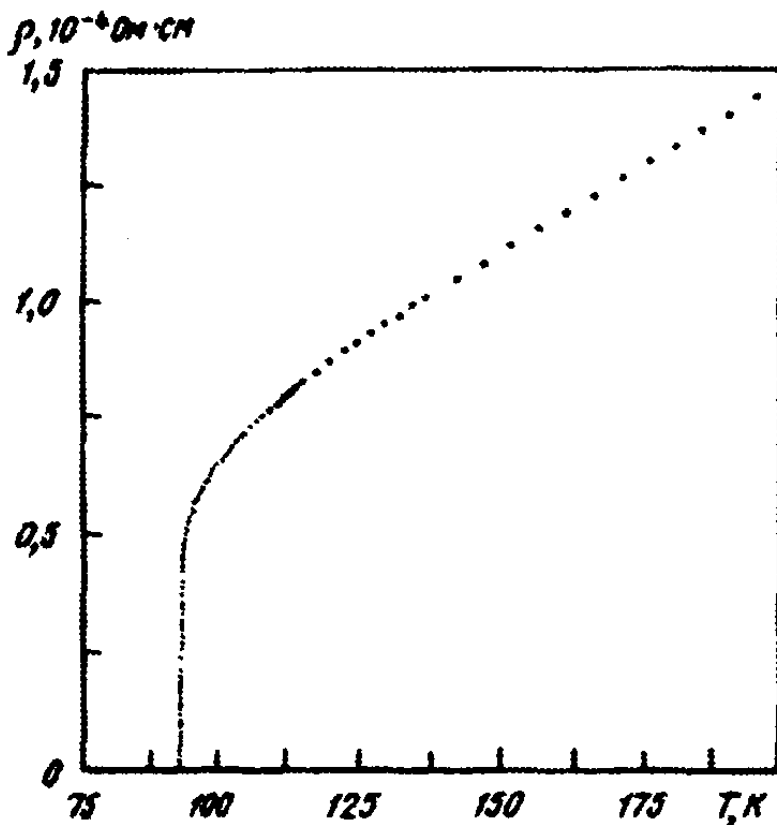


Рис.5. Сверхпроводящий переход электрического сопротивления монокристалла  $YBi_2Cu_3O_{7-x}$ , где  $0 < x < 0,5$

механических свойств и сравнительно низкая стоимость позволяет рекомендовать сверхпроводники на основе твердого раствора Nb—Ti в качестве основных

материалов до  $B_k = 8$  Тл при  $T_k = 4,2$  К. В более сильных полях, когда плотность тока существенно падает, целесообразно использовать интерметаллические соединения типа  $Nb_3Sn$ .

В конце 1980-х годов была открыта высокотемпературная сверхпроводимость в керамических материалах.

В 1986 году швейцарские физики Дж. Беднорц и К. Мюллер впервые получили сверхпроводящие керамические оксидные образцы системы La—Ba—Si—O с температурой перехода в сверхпроводящее состояние  $T_k = 35$  К. За это открытие, положившее начало исследованию высокотемпературной сверхпроводимости, в 1987 г. они были удостоены

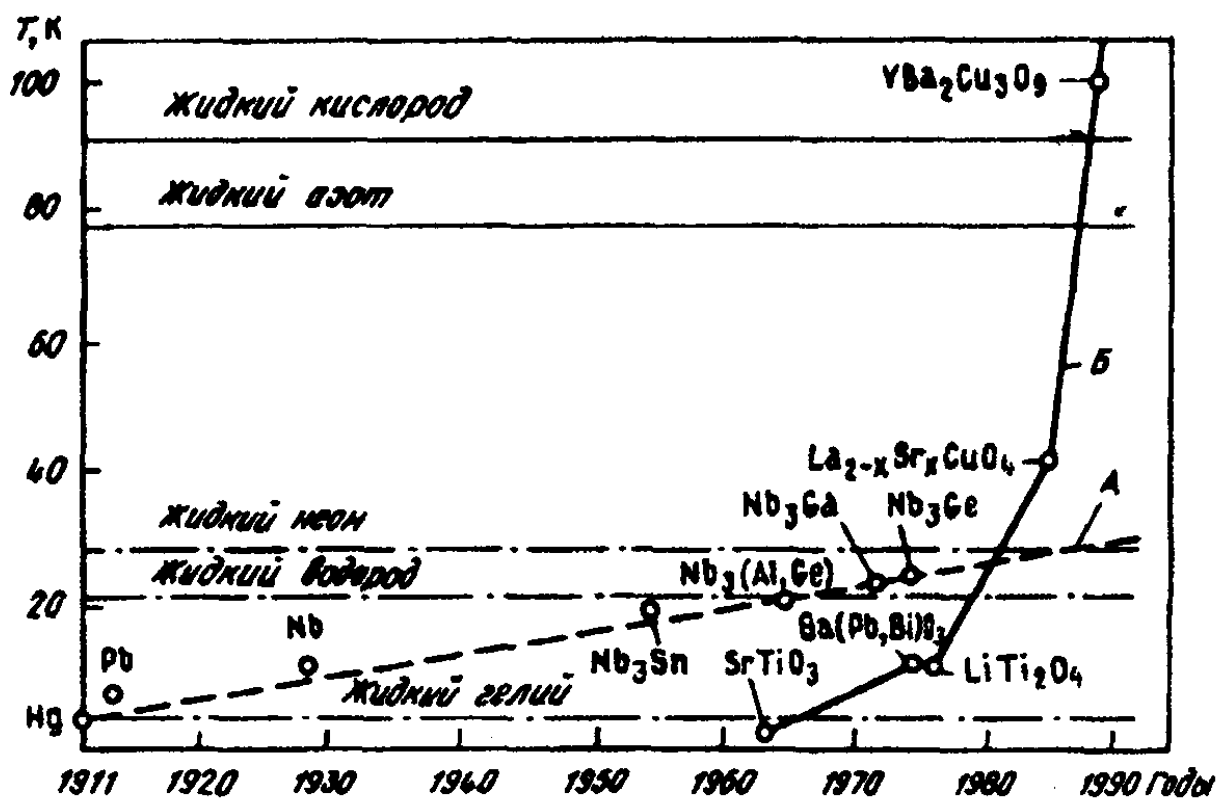


Рис.6. Динамика разработок сверхпроводников:  
 А — металлические материалы; Б — керамика

Нобелевской премии по физике. Позднее на иттриевых керамиках системы Y—Ba—Si—O в Китае, США, Японии и России была достигнута температура сверхпроводящего перехода  $T_k$  около 90 К, дающая возможность использовать дешевый и доступный жидкий азот в качестве хладагента (рис. 5). Керамика на основе соединений оксида меди с оксидом стронция, висмута и щелочноземельных элементов, например, состава  $2Sr \cdot CaO \cdot Bi_2O_3 \cdot 2CuO$ , имеет еще более высокую  $T_k$  (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. Динамика разработок сверхпроводящих

материалов представлена на рис. 6.

Поиск новых сверхпроводников продолжается, хотя пока проблема остается чисто научной. В перспективе, для того чтобы придать ей технический характер, необходимо разработать технологию производства и применения высокотемпературных сверхпроводников.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Электротехнические сплавы.
2. Явление сверхпроводимости.
3. Сверхпроводящие материалы.
4. Технология производства сверхпроводящих материалов.
5. Собственная проводимость полупроводников.
6. Примесная проводимость полупроводников.
7. Удельная проводимость проводников.
8. Фотопроводимость полупроводников.
9. Люминесценция
10. Элементарные полупроводники: германий, кремний.
11. Применение полупроводников германия и кремния.
12. Полупроводниковые химические соединения.

## Практическая работа №5

### СПЛАВЫ С ОСОБЫМИ ТЕПЛОВЫМИ И УПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ

#### Общие сведения

Для ряда отраслей машиностроения и приборостроения необходимо применение материалов со строго регламентированными значениями в определенных температурных интервалах эксплуатации таких физических свойств, как *температурные коэффициенты линейного расширения  $\alpha$*  (ТКЛР) и *модуля нормальной упругости  $\beta$*  (ТКМУ).

Эти коэффициенты определяют характер изменения размеров детали и модуля упругости сплава при нагреве.

ТКЛР сплава определяют с помощью дилатометра по относительному удлинению образца в заданном температурном диапазоне.

Согласно правилу Курнакова, в том случае, если компоненты образуют твердый раствор, то ТКЛР сплава изменяется по криволинейной зависимости внутри пределов, ограниченных значениями ТКЛР этих чистых компонентов.

Коэффициент линейного расширения  $\alpha$  возрастает с повышением температуры (рис.1).

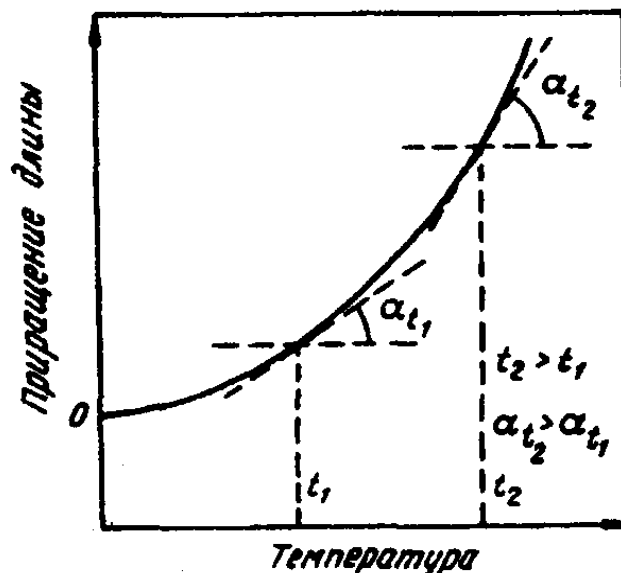


Рис.1. Кривая расширения сплавов при повышении температуры

Однако сплавы Fe—Ni не подчиняются общим закономерностям.

В области концентраций от 30 до 45 % для них характерны аномалии, связанные с инварным эффектом (рис.2).



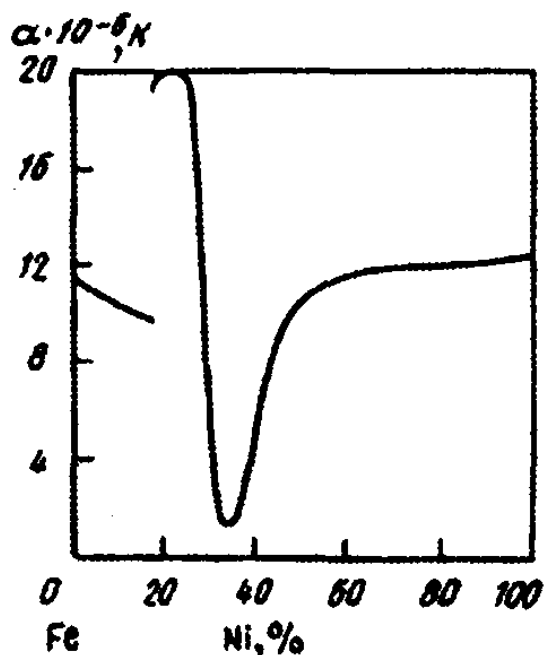


Рис.2. Температурный коэффициент линейного расширения сплавов Fe—Ni

Самое низкое значение ТКЛР в диапазоне температур от -100 до 100 °С имеет сплав, содержащий 36% Ni.

Этот сплав был открыт Гийомом в 1897 году и назван *инваром* (лат. неизменный) из-за минимальных значений теплового расширения.

Для металлов с кубической кристаллической решеткой ТКЛР изотропен.

Значения его свойств не зависят от направлений кристаллической решетки и преимущественной ориентации текстуры.

Термический коэффициент объемного расширения втрое превышает ТКЛР.

Для сплавов Fe—Ni инварного состава помимо низких значений ТКЛР характерна еще одна аномалия — аномалия термического коэффициента модуля упругости ТКМУ.

В любых твердых телах, в том числе металлах, при нагреве наблюдается уменьшение модуля упругости, являющегося мерой сил межатомных связей.

В сплавах с инварным эффектом модуль упругости растет или остается постоянным с повышением температуры.

Характерно, что максимальной величиной ТКМУ обладает тот же сплав Fe—Ni с самым низким значением ТКЛР, содержащий 36 % Ni (рис.3).

Подбор определенного химического состава позволяет разработать сплавы, модуль упругости которых практически не зависит от температуры.

Сплавы, сохраняющие постоянство модуля упругости в широком температурном диапазоне, называют *элинварами*.

Природа аномального изменения ТКЛР инварных сплавов, так же как и модуля нормальной упругости, имеет ферромагнитное происхождение.

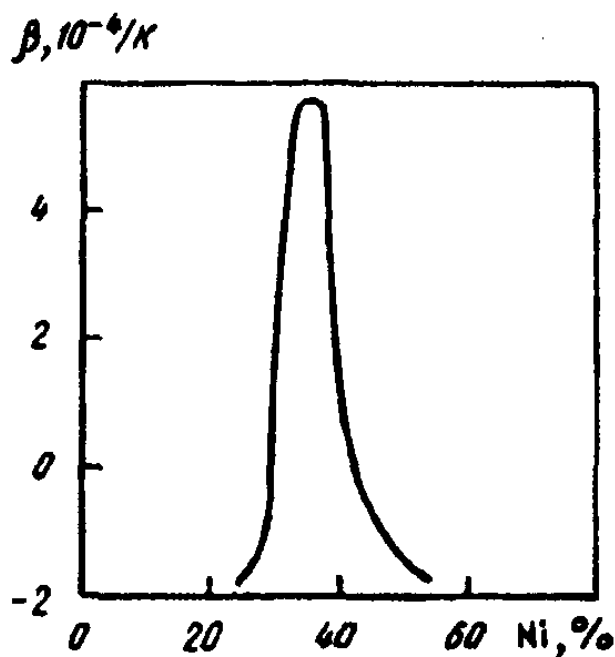


Рис. 3. Температурный коэффициент модуля упругости сплавов Fe—Ni

В ферромагнитных сплавах Fe—Ni инварного типа велик уровень объемной магнитострикции — изменения объема за счет внутреннего магнитного поля.

При нагреве происходит уменьшение магнитострикционной составляющей объема.

Выше температуры точки Кюри магнитострикционные деформации полностью исчезают в связи с переходом металла в парамагнитное состояние.

ТКЛР ферромагнетиков определяется формулой:

$$\alpha = \alpha_0 - \Delta,$$

где  $\alpha_0$  — нормальный коэффициент линейного расширения, определяемый энергией связи атомов;  $\Delta$  — составляющая ТКЛР, обусловленная магнитострикцией парапроцесса.

Нормальная составляющая ТКЛР при нагреве растет вследствие уменьшения энергии связи атомов.

Этот рост компенсируется уменьшением магнитострикции в результате снижения намагниченности, как следствие усиления тепловых колебаний атомов.

В итоге при нагреве до температуры точки Кюри объем инварных сплавов мало меняется.

ТКЛР для некоторых сплавов может даже приобретать отрицательные значения, и их объем даже уменьшается.

Внешние растягивающие напряжения действуют на Fe—Ni-ферромагнетики инварного состава подобно магнитному полю и также способствуют проявлению объемной магнитострикции, обычно называемую в этом случае механострикцией.

Высокий уровень механострикции в элинварных сплавах способствует аномальному изменению модуля упругости при нагреве.

Влияние нагрева на модуль упругости элинварных сплавов может быть описано формулой

$$E_t = E_0 (1 + \beta t),$$

где  $E_0$  — модуль упругости обычных сплавов,  $\beta$  — температурный коэффициент модуля нормальной упругости.

В элинварных сплавах этот коэффициент всегда имеет положительное значение.

Снижение модуля упругости при нагреве обычных сплавов компенсируется составляющей за счет механострикции, что в итоге способствует стабилизации модуля упругости в широком температурном диапазоне.

Для обеспечения стабильности температурного коэффициента линейного расширения и модуля упругости для каждого конкретного случая необходимо применение сплавов строго определенного химического состава.

Такие сплавы обычно называют **прецизионными** сплавами (от фр. precision), т. е. отличающимися высокой точностью химического состава.

### **Сплавы с регламентируемым температурным коэффициентом линейного расширения**

Основным представителем сплавов с минимальным ТКЛР является сплав 36Н.

Инвар имеет самые низкие значения  $\alpha$  в интервале температур от -100 до 100 °С.

Благодаря высокому уровню механических свойств и технологичности, инвар используется в качестве конструкционного материала для деталей, от которых требуется постоянство размеров при меняющихся температурных условиях эксплуатации.

Из инвара изготавливают жесткозакрепленные трубопроводы сложной пространственной формы, перекачивающие сжиженные газы в криогенных установках.

Малая величина ТКЛОР (температурного коэффициента линейного объёмного расширения) позволяет уменьшить напряжения в трубопроводах и предотвратить возможность их разрушения.

Отпадает необходимость установки **сильфонных узлов** для компенсации деформации, что упрощает конструкцию и делает ее более надежной.

**Сильфон** (от англ. фирменного названия *Sylphon*) — упругая однослойная или многослойная гофрированная оболочка из металлических, неметаллических и композиционных материалов, сохраняющая прочность и герметичность при многоцикловых деформациях сжатия, растяжения, изгиба и их комбинаций под воздействием внутреннего или внешнего давления, температуры и механических нагрузений.

В табл.1 приведены механические свойства инваров в соответствии с ГОСТ 10994-74.

Для обеспечения минимально возможного ТКЛР и наибольшей

стабильности размеров содержание углерода в сплавах инварного состава должно быть не более 0,05 %.

Более высокое содержание углерода приводит к изменению параметров кристаллической решетки и магнитоскрикции парапроцесса.

Для спаев со стеклом повышенное содержание углерода приводит к выделению  $\text{CO}_2$  в процессе впаивания и образованию газовых пузырей в стекле.

Таблица 1

**Механические свойства инваров 36Н и 36НХ после закалки**

Марка инвара	Т, °С	$\sigma$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\Psi$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
		МПа		%		
36Н	-196	870	600	-	-	170
36Н	-253	1000	730	51	54	150
36НХ	20	430	260	5	83	280
36НХ	-196	850	570	43	72	260
36НХ	-253	970	690	50	68	230

Инвары характеризуются высокой пластичностью, их можно подвергать обработке давлением, резке, сварке, пайке.

Значения  $\alpha$  и стабильность его во времени для инваров в значительной степени зависят от термической обработки.

В зависимости от требований, предъявляемых к готовому изделию, термическая обработка может быть следующей:

- для получения минимального  $\alpha$  — закалка, начиная с  $850 \pm 20$  °С (выдержка 30 мин) в воде;

- для получения стабильного во времени  $\alpha$  — после закалки - отпуск при 315 °С в течение 1 ч.

При этом несколько повышается ТКЛР и частично уменьшаются закалочные напряжения.

Во многих областях техники необходимы сплавы, имеющие такой же или несколько больший ТКЛР, чем у инваров, но со строго регламентированными значениями в определенном температурном диапазоне.

В табл. 2 приведены составы и свойства сплавов с регламентированными значениями ТКЛР, получившие наибольшее распространение.

Значения ТКЛР приведены в состоянии после отжига при температуре ~900°С с последующим медленным охлаждением.

## Состав и свойства Fe—Ni сплавов с регламентированным ТКЛР

Названия сплавов	Марка сплава	Массовая доля элементов, %			Тепловые свойства	
		Ni	Co	Cu	Интервал температур, °C	$A \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>
Инвар	36Н	35-37	-	-	20-80	1,5
Суперинвар	32НКД	31,5-33	3,3—4,2	0,6-0,8	20-100	1,0
Ковар	29НК	28,5-29,5	17-18	-	20-400	4,5-5,2
Платинит	47 НД	46-48	-	4,5-5,5	20-400	9,2-10,0

ТКЛР сплавов зависит от предварительной обработки.

Минимальное значение коэффициента  $\alpha$  инвара достигается после закалки от 830 °C (в результате которой примеси переходят в твердый раствор) и отпуска при 315 °C.

Холодная деформация также способствует снижению ТКЛР.

В результате комбинации обеих обработок он становится почти равным нулю.

Замена части никеля равным количеством кобальта и легирование малыми добавками меди позволяет дополнительно снизить ТКЛР инвара.

Такой сплав называют *суперинваром*.

В электровакуумных газоразрядных и полупроводниковых приборах широко используют спаи металлов с такими диэлектриками, как стекло и керамика.

Для обеспечения герметичности и вакуумной плотности спаев необходимо соответствие ТКЛР материалов соединяемой пары в эксплуатационном интервале температур.

Во избежание напряжений и трещин значение ТКЛР сплава должно быть максимально приближено к ТКЛР диэлектрика и строго регламентировано.

Для определения пригодности спаев металлов со стеклом используют чувствительный метод — измерение в поляризованном свете упругих напряжений, имеющих в спае.

Состав сплавов для пайки и сварки со стеклом подбирают таким образом, чтобы ТКЛР стекла и металла были близки во всем интервале температур вплоть до размягчения стекла.

*Ковар* применяют для соединения с термостойкими стеклами, а *платинит* — с обычными легкоплавкими стеклами, применяемыми в электровакуумной промышленности.

На рис.4 приведен характер линейного расширения двух разных сортов стекла и соответствующих им сплавов.

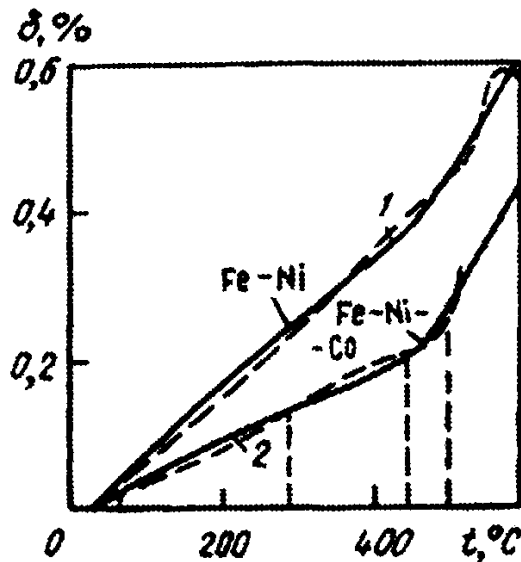


Рис.4. Температурные зависимости относительного изменения длины легко- (1) и тугоплавкого (2) стекла и соответствующих сплавов Fe—Ni и Fe—Ni—Co

Стали с определенным тепловым расширением служат также для изготовления термобиметаллов, когда слой с низким тепловым расширением («пассивный слой») путем прокатки надежно соединяют с другим слоем, обладающим более высоким тепловым расширением («активный слой»).

Биметаллические пластины используют в качестве терморегулятора в приборостроении.

Нагрев такой пластинки приводит к ее искривлению, позволяющему замкнуть электрическую цепь.

Основным свойством термобиметаллов является термочувствительность, т. е. способность изгибаться при изменении температуры.

В качестве пассивной составляющей применяют инвар 36Н с ТКЛР =  $1,5 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ , а в качестве активной — Fe—Ni-сплавы с ТКЛР около  $20 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ , содержащие 8-27 % Ni, дополнительно легированные Cr, Mn, Mo.

### Сплавы с постоянным модулем упругости

Сплавы с заданными свойствами упругости помимо низких значений ТКМУ должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям и релаксационной стойкостью в условиях статического и циклического нагружения.

ТКМУ чистого железоникелевого сплава может иметь значения близкие к нулю, но даже при небольших колебаниях концентрации никеля, неизбежных в сталеплавильном производстве становится нестабильным и претерпевает значительные изменения.

Легирование хромом повышает стабильность сплава.

*Элинвар*, содержащий 36 % Ni и 12% Cr, так же, как чистый сплав Fe—Ni, характеризуется близкими к нулю значениями ТКМУ, но менее зависящими от возможных отклонений в концентрации никеля.

Однако он имеет более низкие механические свойства, которые нельзя улучшить термической обработкой из-за стабильности аустенитной структуры.

Кроме того, температура точки Кюри этого сплава составляет около 100 °С, что ограничивает температурный интервал его применения.

Для повышения температуры точки Кюри в элинварах увеличивают концентрацию никеля, а для улучшения механических свойств их дополнительно легируют титаном, алюминием или бериллием и подвергают двойной закалке при 900-950 °С в воде и старению при 600-700 °С в течение 4 ч.

После первой закалки элинварные сплавы высокопластичны. Относительное удлинение сплава 42НХТЮ составляет не менее 30 %, сплава 44НХТЮ — не менее 20 %.

В этом состоянии они могут подвергаться штамповке и механической обработке.

При повторной закалке избыточные фазы растворяются в аустените, а при старении из твердого раствора происходит выделение упрочняющих дисперсных фаз  $(FeNi)_3(TiAl)$ ,  $Ni_3Ti$ .

К наибольшему упрочнению приводит сочетание низкотемпературной термомеханической обработки с последующим старением.

Элинварные дисперсионно-твердеющие сплавы типа 42НХТЮ, 44НХТЮ применяют для изготовления упругих чувствительных элементов прецизионных приборов: расходомеров, регуляторов скорости и датчиков линейных ускорений, динамометров, электронных весов, волосковых спиралей часовых механизмов.

Сплав 30Н25КТЮ относится к элинварам с наиболее высокой точкой Кюри (470 °С).

Благодаря этому, он сохраняет температурную стабильность упругих свойств и релаксационной стойкости вплоть до 400 °С.

Сплав рекомендуется применять после низкотемпературной термомеханической обработки с последующей закалкой и старением.

Учитывая большое влияние предшествующей обработки на свойства стали, конкретный режим деформации и термической обработки подбирается для каждой партии сплава в зависимости от заданных механических свойств.

Высокий запас пластичности в горячем и холодном состоянии позволяет изготавливать изделия сложной формы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Прецизионные сплавы с особыми свойствами теплового расширения.
2. Сплавы с особыми упругими свойствами.
3. Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами.
4. Понятия: температурный коэффициент линейного расширения, инвар, элинвар, магнитострикция, механострикция прецизионные сплавы.
5. Сплавы с регламентируемым температурным коэффициентом линейного расширения.
6. Сплавы с постоянным модулем упругости.
7. Понятия: упругая и неупругая пластическая деформация, термоупругие мартенситные превращения (ТУМП).



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гюнтер Готтштайн Физико-химические основы материаловедения [Электронный ресурс]/ Гюнтер Готтштайн— Электрон. текстовые данные. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014.— 401 с.
2. Адаскин А.М. Материаловедение и технология металлических, неметаллических и композиционных материалов: учебник / А.М. Адаскин, А.Н. Красновский.—М.:ФОРУМ: ИНФРА-М, 2018 – 400 с.
3. Тарасенко Л. В. Материаловедение [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов / Л. В. Тарасенко [и др.] ; под ред. Л.В. Тарасенко. - Москва: ИНФРА-М, 2012. - 475 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-16-004868-0.
4. Турилина В. Ю. Материаловедение. Механические свойства металлов. Термическая обработка металлов. Специальные стали и сплавы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. Ю. Турилина. - Москва: МИСИС, 2013. - ISBN 978-5-87623-680-7.
5. Материаловедение и технология материалов [Электронный ресурс] : Учебное пособие /. - Москва: Издательский Дом 'ИНФРА-М', 2011. - 288 с. - ISBN 978-5-16-004821-5.
6. Токмин А. М. Выбор материалов и технологий в машиностроении [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. М. Токмин [и др.]. - Москва: НИЦ ИНФРА-М; Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013. - 235 с. - (Высшее образование: Бакалавриат). - ISBN 978-5-16-006377-

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие организационные вопросы.....	4
<b>Практическакая работа №1.</b>	
Магнитные сплавы.....	5
Контрольные вопросы.....	17
<b>Практическакая работа №2</b>	
Магнитные стали и сплавы.....	18
Контрольные вопросы.....	25
<b>Практическакая работа №3</b>	
Электротехнические стали и сплавы.....	26
Контрольные вопросы.....	43
<b>Практическакая работа №4</b>	
Сверхпроводимость и сверхпроводящие материалы.....	33
Контрольные вопросы.....	39
<b>Практическакая работа №5</b>	
Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами.....	40
Контрольные вопросы.....	48
Список рекомендованной литературы.....	49

ПЕРЕРАБОТАННЫЕ И ДОПОЛНЕННЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
"МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ"

Составитель  
ШАРШИН Владимир Николаевич

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании кафедры ТФиКМ  
(протокол № 1 от 31.08.2022 г.)

Методические указания рекомендованы УМК по направлению 22.03.01 для использования  
в учебном процессе (протокол № 1 от 31.08.2022 г.)