

Владимирский государственный университет

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
"ПЕРСПЕКТИВНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ В
МАШИНОСТРОЕНИИ"**

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
"ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В
МАШИНОСТРОЕНИИ"**

Составитель
В.Н.Шаршин

Владимир 2022

УДК 621.74.002.3:669.018.28

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Владимирского
государственного университета

A.B. Жданов

Переработанные и дополненные Методические указания к практическим работам по дисциплине "Перспективные материалы в машиностроении" /Владим. гос. ун-т; Сост. В.Н.Шаршин. Владимир, 2022. 37 с.

Изложено содержание практических работ по перспективным материалам в машиностроении: приведено краткое содержание основ курса, а также контрольные вопросы для самостоятельной проверки полученных знаний.

Составлены в соответствии с учебными планами подготовки магистров по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Табл.4. Ил.11. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.74.002.3:669.018.28

ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Практические работы по дисциплине "Перспективные материалы в машиностроении" проводятся для студентов направления 22.04.01.

Указания включают 4 практических работы.

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.

Основное содержание курса разделено на четыре практических работы, посвящённых какому-либо виду перспективных материалов, проблеме или кругу проблем по одному из направлений развития науки и технологии.

Каждая практическая работа служит основой для самостоятельного выполнения задания по указанию преподавателя.

В процессе выполнения практических работ по дисциплине «Перспективные материалы в машиностроении» студенты знакомятся с основными направлениями развития науки в области новых перспективных материалов, применяемых в машиностроении. Самостоятельно расширяют и укрепляют полученные знания с помощью открытых информационных источников, готовят и докладывают презентации по одному из изученных видов материалов или технологий его получения в соответствии с указаниями преподавателя.

В результате освоения данной дисциплины у студентов формируются основные профессиональные компетенции, отвечающие требованиям ФГОС ВО, к результатам освоения ОПОП ВО по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»: ПК-1.

Практическая работа №1

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ 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**.

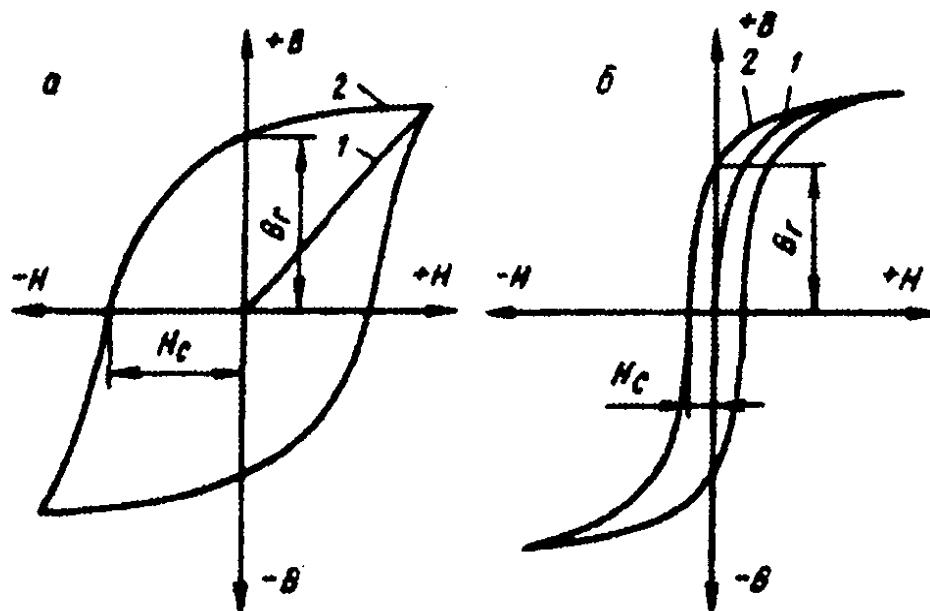


Рис.1. Зависимость магнитной индукции B от напряжённости магнитного поля H : а) магнитотвёрдые материалы; б) магнитомягкие материалы;
1 — первичная кривая намагничивания;
2 — гистерезисная кривая намагничивания.

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

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 $B_r \times H_c$ (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 размагничающее поле, в котором находится магнитотвердый материал.

Для полной характеристики магнитотвердого материала необходимо знать остаточную индукцию B_r 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 размагничающего поля и внешних размагничающих 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%) — EX3, а также одновременно хромом и кобальтом — EX5K5, EX9K15M2.

Например, сталь EX6K6 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 % Cu.**

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 литьих 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 °C, выдержки при этой температуре для получения однофазного состояния, быстрого охлаждения до 900 °C с последующим медленным охлаждением в магнитном поле с $H_c = 160-280$ кА/м.

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

В процессе охлаждения при 900-650 °C 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 литьим, 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 Сr.

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 °C, холодной прокатке и старению при 600 °C.

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

Высокая коэрцитивная сила в **сплавах системы Fe—V—Co («викаллой»)** 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 Си—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 **Nd₂Fe₁₄B** (**неодим — железо - бор**), полученные методом порошковой металлургии с последующим прессованием и спеканием в атмосфере аргона при 1370 °C.

Необходимость расширения области применения магнитотвердых материалов позволила разработать принципиально новые материалы: **магнитопласти** и **магнитоэласти**.

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

Вместо феррита применяют порошки «альнико», соединений РЗМ, например Nd₂Fe₁₄B (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 Fe_3C), 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 наклела и получения крупного зерна листовой металла 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 лучшею 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, диссоцииированном аммиаке или в ваккууме 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 рулона, 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 α и γ -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.

2. 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.

Магнитно-мягкие 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 μ . Пермаллои 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 пермаллои:

1) низконикелевые: 50Н, 65НП, 50НХС (40 — 65% Ni), у которых начальная проницаемость $\rho_0 < 4000 \text{ Гс/Э}$ и намагниченность насыщения $\sim 15000 \text{ Гс}$;

2) высоконикелевые 79НМА (78 — 80% Ni) $\rho_0 < 35000 \text{ Гс/Э}$, но меньшей намагниченностью насыщения — 7500 Гс.

Пермаллои нередко легируют молибденом и хромом, которые уменьшают чувствительность к механической деформации и повышают удельное электросопротивление и магнитную проницаемость. Медь повышает электросопротивление и стабилизирует свойства. Пермаллои изготавливают 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 пермаллои с наиболее высоким содержанием никеля — 72-83 %.

Железокобальтовые сплавы характеризует большая магнитострикция, низкое ρ (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 магнитной проницаемости 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 сталью 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 сплавов.
2. Перспективные магнитомягкие материалы. Основные характеристики.
3. Низкочастотные магнитомягкие материалы.
4. Высокочастотные магнитомягкие материалы.
5. Перспективные магнитные материалы специального назначения.
6. Перспективные магнитотвёрдые материалы.
7. Понятия: намагниченность насыщения, остаточная намагниченность магнитно-мягкие, магнитно-жёсткие 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 №2

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ 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 α -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 °C.

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

Кристаллы α -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 α -Fe таким направлением является ребро куба (100), вдоль диагонали (111) намагничивание происходит最难 and最难 — 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 °C 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.

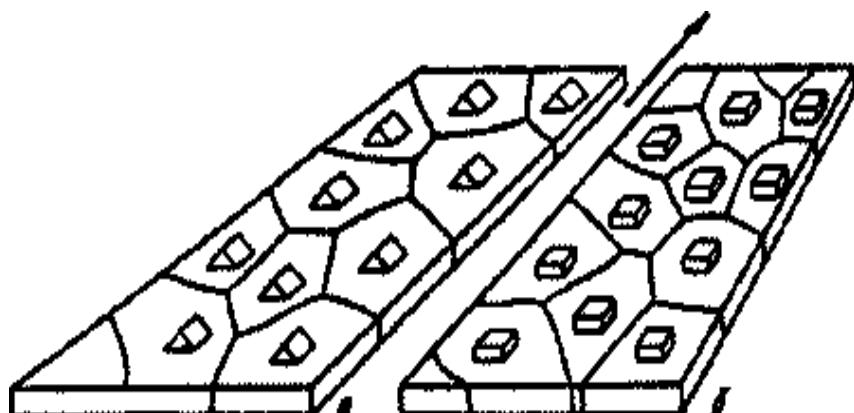


Рис. 1. Положение элементарных ячеек кристаллической решетки в листе с ребровой текстурой (текстурой Госса) (а) и кубической текстурой (б) (стрелкой показано направление прокатки)

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 наклена и для укрупнения зерна проводят отжиг при 1100-1200 °C 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 изготавляемых 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 нелегированных — 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 Сг, 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_2O_3 и оксидов таких металлов, как Mn, Mg, Zn, Li (MnO ,

MgO , ZnO , LiO_2).

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 получаются спеканием порошков, состоящих из Fe_2O_3 и окислов двухвалентных металлов (ZnO , NiO , 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 ~ 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 антенных, 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 (ГПГ) — 0,12ВТ (коэрцитивная сила $H_c = 0,12$ Э, ВТ — вычислительная техника), 0,9ВТ, 1,3ВТ 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°C);
- низкая индукция насыщения (~ 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

структурой.

Такая структура обеспечивается высоким содержанием марганца и никеля, расширяющих γ -область структурной диаграммы.

Парамагнитными свойствами обладают стали марок 12Х18Н10Т, 10Х14Г14Н4Т, 40Г14Н9Ф2, 40Х14Н9ХЗЮФ2 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.

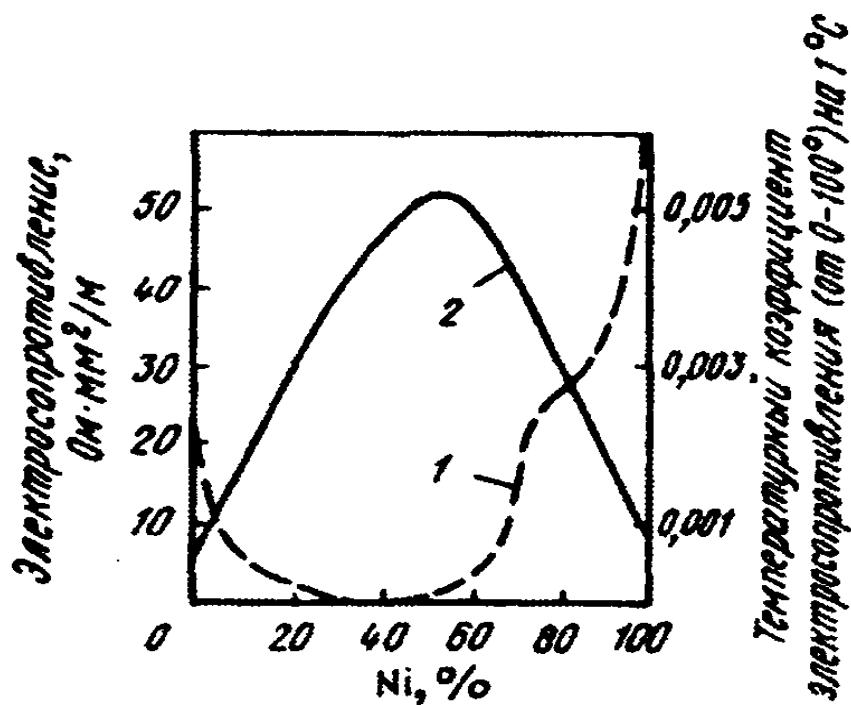


Рис. 2. Электрические свойства сплавов Cu—Ni:
 1) температурный коэффициент электросопротивления;
 2) электросопротивление

Применение электротехнических сплавов

Для нагревателей применяют ферритные стали, легированные Сг и А1 (хромали), а также сплавы на основе хрома и никеля, например нихром X20H80, содержащий около 20 % Сг 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°C) применяют сплавы Ni с 2% Al (алюмелль) и Ni с 10% Сг (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. Свойства перспективных проводниковых материалов.
2. Физическая природа электропроводности металлов.
3. Зависимость удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры.
4. Влияние примесей и дефектов структуры на удельное сопротивление металлов.
5. Электросопротивление тонких металлических плёнок.
6. Материалы высокой проводимости.
7. Проводниковая медь и её сплавы.
8. Проводниковый алюминий.
9. Благородные металлы.
10. Тугоплавкие металлы.
11. Неметаллические проводники.
12. Материалы на основе графита.
13. Контактолы.
14. Материалы для неподвижных электрических контактов.
15. Материалы для разрывных электрических контактов.
16. Материалы для скользящих электрических контактов.
17. Материалы высокого удельного сопротивления.
18. Сплавы для резисторов и технических сопротивлений.
19. Материалы для нагревательных элементов.
20. Сплавы для термопар.
21. Сверхпроводящие материалы.
22. Основные свойства диэлектриков.
23. Газообразные диэлектрики.
24. Жидкие диэлектрики.
25. Неорганические твёрдые диэлектрики.

Практическая работа №3

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ 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).

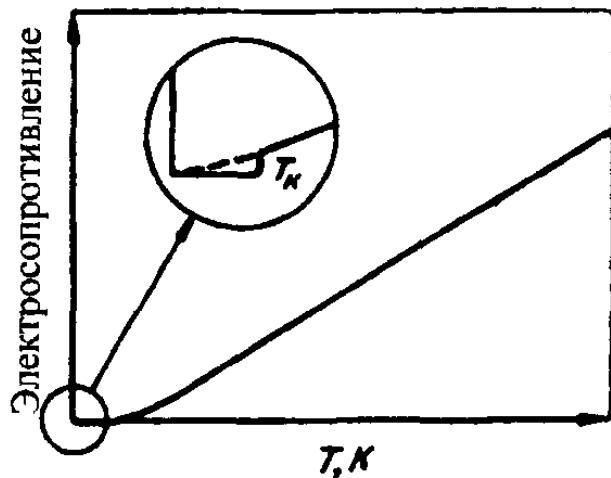


Рис.1. Влияние температуры на электросопротивление сверхпроводящих материалов

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

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.

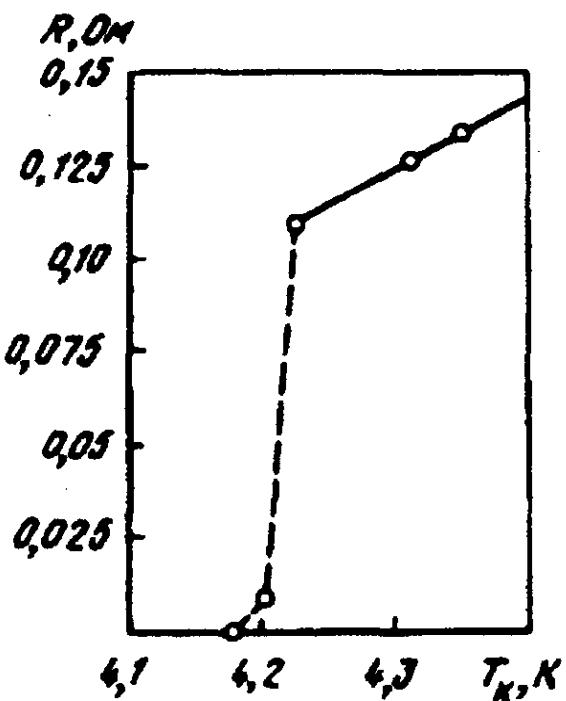


Рис.2. Эффект сверхпроводимости ртути в эксперименте Камерлинг-Онесса (1911 г.)

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, 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 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 ($T_{kp} = 9,2 K$). Однако для ниobia характерны низкие значения критического магнитного поля (около 0,24 Тл), что недостаточно для его широкого применения. Хорошим сочетанием критических параметров T_k и B_k отличаются сплавы и интерметаллические соединения ниobia с цирконием, титаном, оловом и германием. В табл.1 приведены критические параметры сверхпроводников, представляющих практический интерес.

Сплавы и соединения ниobia переходят в сверхпроводящее состояние при достаточно высоких температурах. Они могут выдерживать довольно сильные магнитные поля и характеризуются высокой плотностью тока. В жидким гелием при внешнем поле с индукцией 2,5 Тл критическая плотность тока составляет: для Nb—Zr — 1 кА/мм²; Nb—Ti — 2,5 кА/мм²; Nb₃Sn — 17 кА/мм²; V₃Ga — 5 кА/мм².

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. Интсреметаллиды, 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	$B_c, T_{\text{л}}, \text{при } T_c = 4,2 K$
Nb—Zr	9-11	7-9
Nb—Ni	8-10	9-13
Nb ₃ Sn	18,0	22-25
Nb ₃ Al _{1-x} Ge _x	20,3-20,5	40
Nb ₃ Ga	20,2	34
Nb ₃ Ge	23,2	37
V ₃ Ga	14,5-15,0	21
V ₃ Si	17,0	23

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

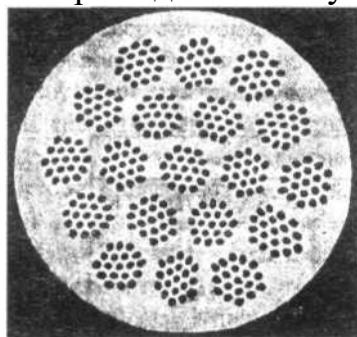


Рис. 3. Поперечное сечение многожильного сверхпроводящего композита с 361 ниобий-титановой жилой в медной матрице

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 Nb₃Sn применяют так называемую «бронзовую технологию», основанную на селективной твердофазной диффузии. Тонкие нити пластичного ниobia 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 Nb₃Sn. 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 Nb₃Sn.

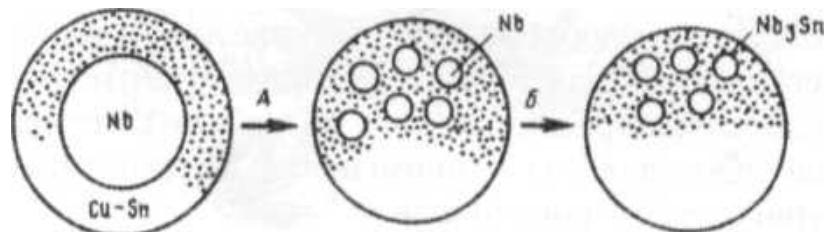


Рис. 4. Схема бронзовой технологии изготовления многожильных проводов на основе Nb₃Sn:
A — сборка, волочение и отжиг; Б термообработка.

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

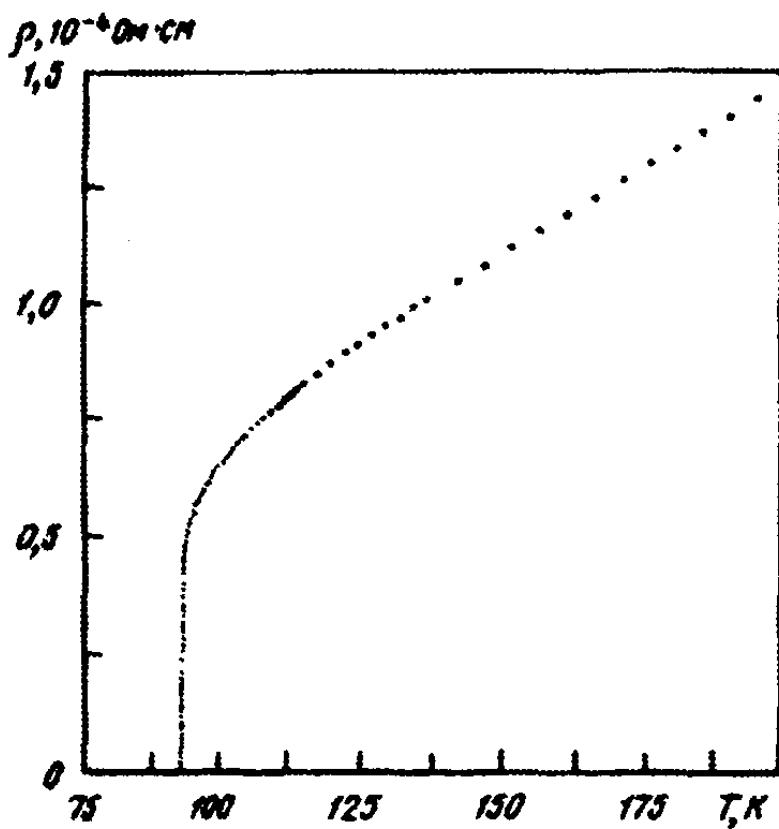


Рис.5. Сверхпроводящий переход электрического сопротивления монокристалла YBi₂Cu₃O_{7-x}, где $0 < x < 0,5$

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 Nb₃Sn.

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—Си—О с температурой перехода в сверхпроводящее состояние $T_c = 35$ К. За это открытие, положившее начало исследованию высокотемпературной сверхпроводимости, в 1987 г. они были удостоены

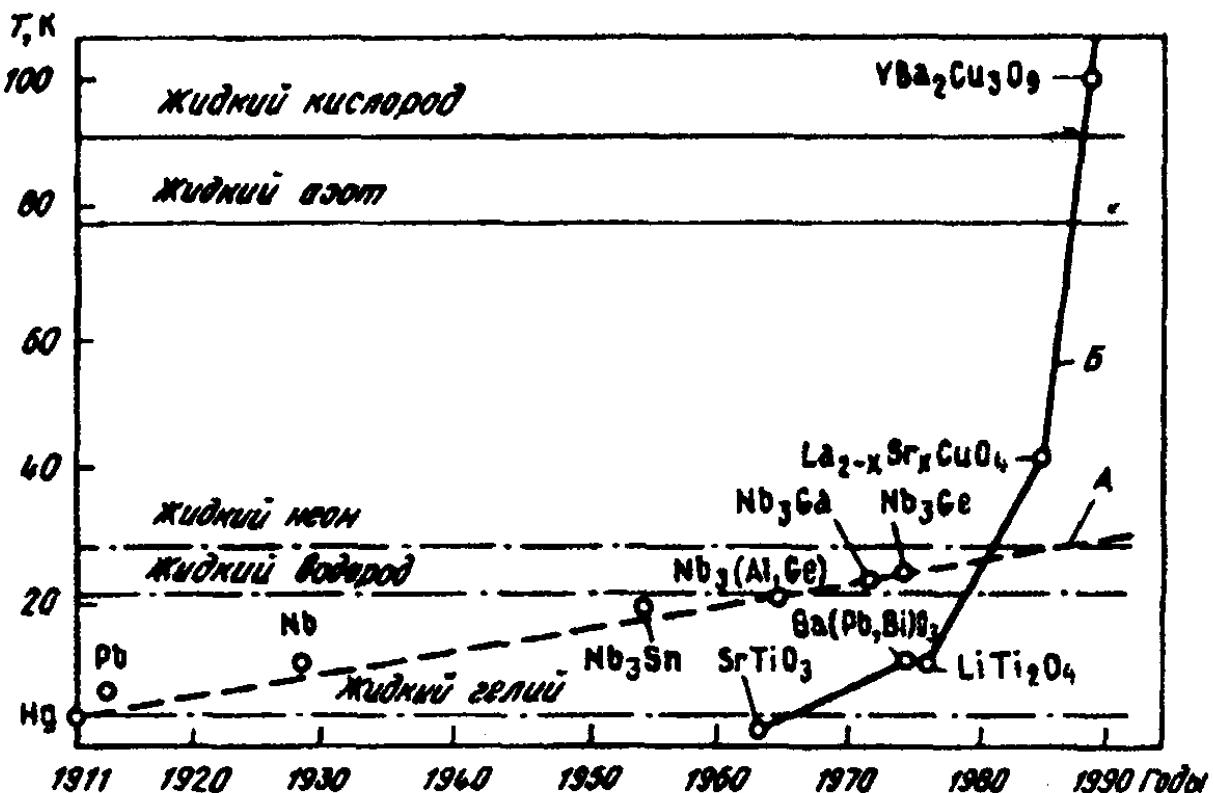


Рис.6.Динамика разработок сверхпроводников:
А — металлические материалы; Б — керамика

Нобелевской премии по физике. Позднее на иттриевых керамиках системы Y—Ba—Си—О в Китае, США, Японии и России была достигнута температура сверхпроводящего перехода T_c около 90 К, дающая возможность использовать дешевый и доступный жидкий азот в качестве хладогента (рис. 5). Керамика на основе соединений оксида меди с оксидом стронция, висмута и щелочноземельных элементов, например, состава $2\text{Sr}\cdot\text{CaO}\cdot\text{Bi}_2\text{O}_3\cdot2\text{CuO}$, имеет еще более высокую T_c (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 №4

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПЛАВЫ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ 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 α* (ТКЛР) и *модуля нормальной упругости β* (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 α возрастает с повышением температуры (рис.1).

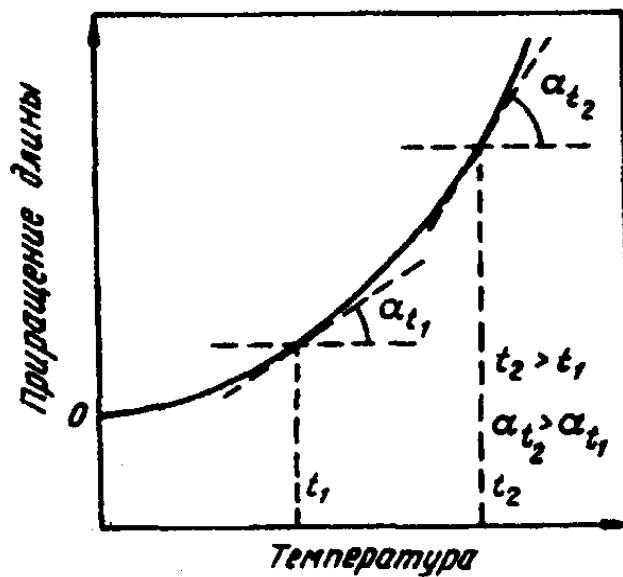


Рис.1. Кривая расширения сплавов при повышении температуры

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).

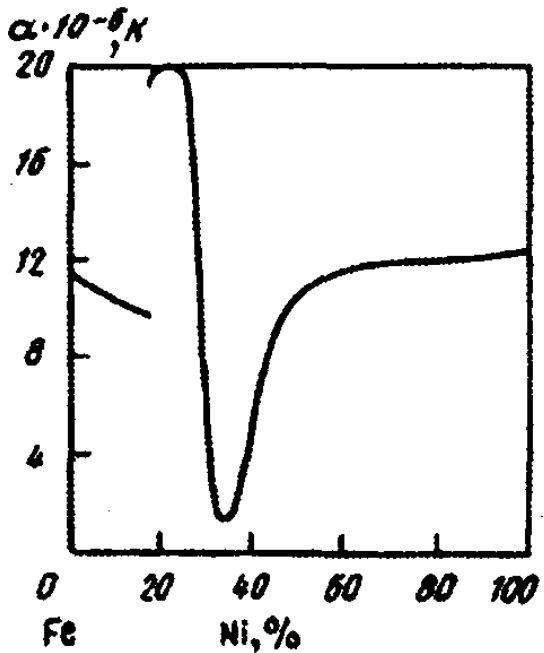


Рис.2. Температурный коэффициент линейного расширения сплавов Fe—Ni

Самое низкое значение ТКЛР в диапазоне температур от -100 до 100 °C 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.

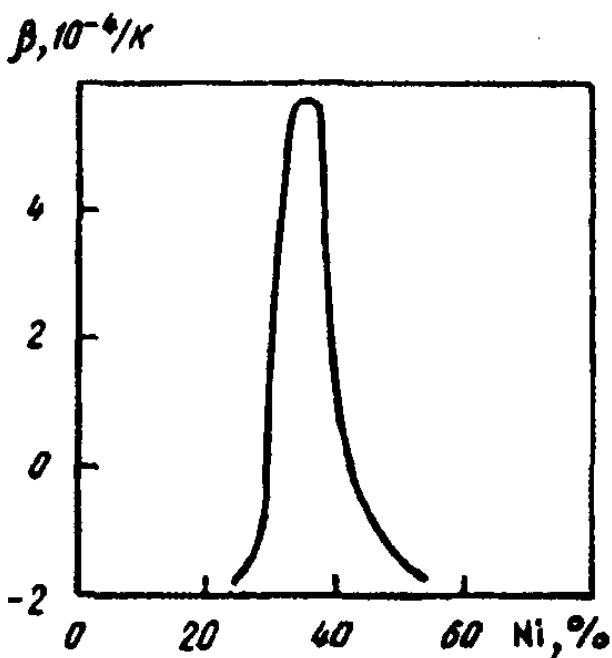


Рис. 3. Температурный коэффициент модуля упругости сплавов Fe—Ni

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 α_0 — нормальный коэффициент линейного расширения, определяемый энергией связи атомов; Δ — 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

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

где E_0 — модуль упругости обычных сплавов, β — 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 **прецзионными** 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 α в интервале температур от -100 до 100 °C.

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 (температура 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 CO₂ в процессе впаивания и образованию газовых пузырей в стекле.

Таблица 1
Механические свойства инваров 36Н и 36НХ после закалки

Марка инвара	T, °C	σ	σ _{0,2}	δ	Ψ	KСU, Дж/см ²
		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 α 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 α — закалка, начиная с 850 ± 20 °C (выдержка 30 мин) в воде;

- для получения стабильного во времени α — после закалки - отпуск при 315 °C 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°C с последующим медленным охлаждением.

Таблица 2

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 · 10 ⁻⁶ , град ⁻¹
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 а 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, имеющихся 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.

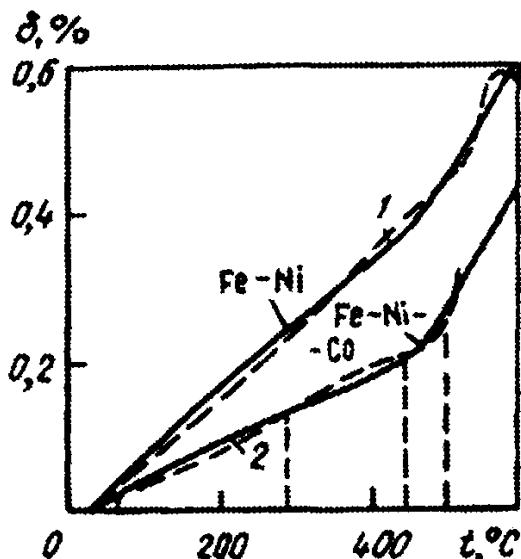


Рис.4. Температурные зависимости относительного изменения длины легко- (1) и тугоплавкого (2) стекла и соответствующих сплавов Fe—Ni и Fe—Ni—Co

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 Сг, Мп, Мо.

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 °C, 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 °C в воде и старению при 600-700 °C 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 $(\text{FeNi})_3(\text{TiAl})$, 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 прецезионных 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 °C).

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

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 положения.....	4
Практическая работа №1	
Перспективные магнитные материалы.....	5
Контрольные вопросы.....	12
Практическая работа №2	
Перспективные электротехнические стали и сплавы.....	13
Контрольные вопросы.....	19
Практическая работа №3	
Перспективные сверхпроводящие материалы.....	20
Контрольные вопросы.....	26
Практическая работа №4	
Перспективные сплавы со специальными тепловыми и упругими свойствами....	27
Контрольные вопросы.....	35
Список рекомендованной литературы.....	35

**ПЕРЕРАБОТАННЫЕ И ДОПОЛНЕННЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
"ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ"**

Составитель

ШАРШИН Владимир Николаевич

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании кафедры ТФиКМ
(протокол № 1 от 30.08.2022 г.)

Методические указания рекомендованы УМК по направлению 22.04.01 для использования
в учебном процессе (протокол № 1 от 30.08.2022 г.)