

материалов и технологий

Ю. СТАРОДУБЦЕВ

Магнитомягкие
материалы

Энциклопедический
словарь-справочник



ТЕХНОСФЕРА

УДК 537.6 + 537.8 + 621.314 + 621.318 + 621.30.1
ББК 22.334 + 31.235 + 31.261 + 31.264.5 + 32.843.5
С 77

С 77 Стародубцев Ю.Н.

Магнитомягкие материалы

Энциклопедический словарь-справочник

Москва: Техносфера, 2011. — 664 с., ISBN 978-5-94836-259-5

Словарь-справочник представляет собой сборник 1800 терминов и справочных данных по физике и технике разработки, производства и применения магнитомягких материалов. Подробные и доступно изложенные статьи по терминам и понятиям, расположенные в алфавитном порядке, относятся как к фундаментальным наукам (математика, физика, химия), так и к техническим дисциплинам (металлургия, металловедение, электротехника, силовая электроника). В ряде статей приведены справочные данные и сведения из истории появления термина со ссылкой на соответствующие работы. Завершают издание списки упомянутых в словаре предприятий и организаций, а также краткие биографии ученых и перечень их пионерских работ. Для удобства поиска имеется предметный указатель.

Энциклопедический словарь-справочник предназначен для научных работников, инженеров и студентов по специальностям «Физика металлов», «Физика магнитных явлений», «Металловедение и термическая обработка», «Электротехника», «Силовая электроника», «Радиотехника и связь».

УДК 537.6 + 537.8 + 621.314 + 621.318 + 621.30.1
ББК 22.334 + 31.235 + 31.261 + 31.264.5 + 32.843.5

© 2011, Ю.Н. Стародубцев

© 2011, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-259-5

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	6
Условные обозначения	12
А	15
Б	41
В	47
Г	70
Д	79
Ж	108
З	112
И	125
К	147
Л	184
М	191
Н	283
О	306
П	321
Р	373
С	391
Т	437
У	478
Ф	496
Х	515
Ц	518
Ч	519
Ш	520
Э	523
Я	561
Предприятия и организации	562
Краткие биографии	568
Пионерские работы	622
Предметный указатель	640

А

АБСОЛЮТНАЯ ВЕЛИЧИНА́ действительного числа a [лат. *absolutus*] — неотрицательное число, обозначаемое $|a|$. Если $a \geq 0$, то $|a| = a$, а если $a < 0$, то $|a| = -a$. А.в. (модуль) комплексного числа $z = x + jy$, где x и y — действительные числа, представляет число, равное $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Функцию А.в. впервые использовал Лейбниц под названием «модуль». Знак $|z|$ для обозначения абсолютного значения ввел Вейерштрасс (1841), а с 1856 г. он же стал использовать термин «А.в.».

АБСОЛЮТНАЯ МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ — физическая величина, связывающая векторы магнитной индукции $\mathbf{B}$ и напряженности магнитного поля $\mathbf{H}$. Магнитная индукция и напряженность магнитного поля связаны в системе СИ материальным уравнением $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$, где величина $\mu_a = \mu_0$ представляет А.м. Термин «А.м.» используется в системе СИ. Единица измерения А.м. — генри на метр (Гн/м).

АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУ́РА — температура T , отсчитываемая от абсолютно-го нуля по термодинамической температурной шкале (шкале Кельвина). Численное значение А.т. связано с температурой по шкале Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) соотношением $t = T - 273,15\text{K}$, причем $1\text{K} = 1^{\circ}\text{C}$. Понятие «А.т.» ввел У. Томсон (Кельвин). Единица измерения А.т. в системе СИ — кельвин (К).

АБСОЛЮТНЫЙ НУЛЬ температуры — начало отсчета температуры по термодинамической температурной шкале. А.н. расположен на $273,16^{\circ}\text{C}$ ниже температуры тройной точки воды, для которой принято значение $0,01^{\circ}\text{C}$. А.н. принципиально не достижим (третье начало термодинамики). Точные численные значения тройной точки воды и положение А.н. были зафиксированы в 1954 г.

АБСЦИ́ССА [лат. *abscissus* отрезанный, отделенный от *absindere* отсекать, отре-

зать] — одна из декартовых координат точки, обычно вдоль горизонтальной оси x . Термин берет свое начало в латинских переводах трудов древних авторов с греческого языка. В современном понимании его впервые использовал Лейбниц (1675).

АВТОТРАНСФОРМА́ТОР [гр. *autos* сам и *трансформатор*] — электрический трансформатор, у которого обмоткой низкого напряжения служит часть обмотки высокого напряжения, т. е. обмотки А. электрически связаны между собой. Вследствие этого мощность из первичной обмотки передается во вторичную обмотку посредством как магнитной, так и электрической связи. Снижение массы активных материалов в А. приводит к уменьшению электрических и магнитных потерь и, как следствие, к увеличению коэффициента полезного действия. Недостатком А. является повышенное требование к изоляции обмоток и большой ток короткого замыкания. А. применяется в пусковых устройствах мощных электродвигателей переменного тока для плавного регулирования напряжения при пользовании бытовыми приборами. Лабораторный регулируемый автотрансформатор (ЛАТР) в отличие от простого А. имеет подвижный токосъемный контакт к обмотке, что позволяет плавно изменять число витков вторичной обмотки, а следовательно, выходное напряжение. Первый А. создал У. Стэнли (1885).

АГРЕГА́ТНОЕ СОСТОЯ́НИЕ вещества [лат. *aggrego* присоединяю] — состояние одного и того же вещества в различных интервалах температуры и давления. Традиционно А.с. являются газообразное, жидкое и твердое состояние, переходы между которыми сопровождаются скачкообразным изменением свободной энергии, энтропии, плотности и других физических характеристик вещества. С увеличением температуры газа при постоянном давлении он переходит в состояние иони-

зированной плазмы, которое также считают А.с. Понятие «А.с.» не имеет точного определения, более точным является термин «термодинамическая фаза».

АДГЕЗИЯ [лат. adhaesio прилипание] — возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных (твердых или жидких) тел, приведенных в соприкосновение. А. является результатом межмолекулярного взаимодействия. Частный случай А. — когезия, которая является результатом взаимодействия одинаковых соприкасающихся тел. Предельный случай А. — хемосорбция, которая представляет химическое взаимодействие на поверхности с образованием слоя химического соединения. В процессе А. уменьшается свободная поверхностная энергия тела. А. измеряется работой отрыва на единицу площади контакта поверхностей. Для твердого тела и жидкости, находящихся в газовой среде, работа А. равна $A_a = \sigma_{тг} + \sigma_{жг} - \sigma_{гж}$ (уравнение Дюпре, 1869), где индексы обозначают соответствующие границы раздела твердой, жидкой и газообразной сред. Используя условие равновесия $\sigma_{тг} = \sigma_{гж} + \sigma_{жг} \cos \theta$, где θ — равновесный краевой угол, измеряемый внутри жидкости, работу А. можно представить в виде $A_a = \sigma_{жг}(1 + \cos \theta)$. При полном смачивании $\theta = 0$ работа А. равна работе когезии жидкости $A_a = 2\sigma_{жг}$.

Лит.: Адам Н.К. Физика и химия поверхности. — М.; Л.: ГТТЛ, 1947. — 552 с.

АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС, адиабатический процесс [гр. adiabatos непроходимый] — термодинамический процесс, в котором система не обменивается теплотой с окружающей средой ($dQ = 0$). Равновесный А.п. является изоэнтропным ($dS = 0$). Термин «А.п.» предложил Ранкин в 1859 г.

АККОМОДАЦИЯ [лат. accommodatio приспособление] — приспособление к чему-либо, приспособление к действию медленно нарастающего по силе раздражителя. Термин «А.» предложил Штрайнц (1880) для явления изменения механических свойств после циклических нагрузок.

АКСИАЛЬНЫЙ [лат. axis ось] — осевой.

АКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ двухполюсника [лат. activus] — среднее арифметическое значение мгновенной мощности за период

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \frac{UI}{T} \int_0^T [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] dt =$$

$$= UI \cos \varphi = r I^2 \text{ для синусоидального напряжения } u = U_m \sin(\omega t + \varphi) \text{ и тока } i = I_m \sin \omega t.$$

Следовательно, средняя мощность за период синусоидального тока характеризует необратимое преобразование электрической энергии в теплоту. При этом полная мощность синусоидального тока $S = UI = I^2 z = I^2 \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}$, где

Q — реактивная мощность, z — модуль комплексного сопротивления, r — активное сопротивление, x — реактивное сопротивление. Мгновенная А.м. двухполюсника является синусоидальной функцией времени $p_r = P(1 - \cos 2\omega t) = r I^2 (1 - \cos 2\omega t)$. Для несинусоидального периодического напряжения и тока среднее арифметическое мгновенной мощности равно сумме средних значений мгновенных мощностей отдельных гармоник

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k. \text{ Из закона сохранения}$$

энергии следует, что в электрической цепи сумма А.м. отдельных элементов цепи равна общей А.м. данной электрической цепи. Единица измерения А.м. в системе СИ — ватт (Вт).

АКТИВНАЯ ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ — безразмерная физическая величина, равная

$$\mu_2 = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \sin \delta \text{ и представляющая мнимую}$$

$$\text{часть комплексной магнитной проницаемости } \bar{\mu} = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \cos \delta - j \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \sin \delta =$$

$$= \mu_1 - j \mu_2. \text{ А.о. называют иногда вязкой или консумптивной, поскольку она связана с удельными магнитными потерями соотношением } P_a = \pi \mu_0 \mu_2 H_m^2 f.$$

АКТИВНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРОТИВЛЕНИЕ — скалярная величина R , равная отношению активной мощности P , поглощаемой участком пас-

сивной электрической цепи, к квадрату действующего значения электрического тока I , протекающего через этот участок $R = P/I^2$. А.э. совпадает с электрическим сопротивлением постоянному току, которое равно отношению постоянного напряжения U на участке пассивной электрической цепи к постоянному току I на этом участке $R = U/I$. Единица измерения А.э. в системе СИ — ом (Ом).

АКУСТИКА [гр. *akustikos* слуховой] — раздел физики, изучающий упругие волны в диапазоне частот до 10^{13} Гц: инфразвук ниже 16 Гц, звук от 16 Гц до 20 кГц, ультразвук выше 20 кГц и гиперзвук в интервале 10^9 — 10^{13} Гц. В узком смысле А. — учение о звуке.

АКУСТОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ОТ КРАЖ — система защиты товара, состоящая из антикражных ворот и магнитной бирки, которая наносится на товар. В двух стойках ворот установлены антенна, которая излучает переменное магнитное поле частотой 58 кГц, и приемник. Бирка представляет собой пластиковую коробочку высотой 1 мм, в которой находятся две магнитные полоски длиной 40 мм. Одна из полосок, свободно размещенная в коробочке, изготовлена из аморфного магнитомягкого материала с высокой магнитострикцией насыщения, а другая, закрепленная на дне коробочки, — из полутвердого магнитного материала. Бирка приобретает активированное состояние после намагничивания полутвердой полоски постоянным магнитным полем. В дальнейшем эта полоска является источником собственного постоянного подмагничивающего поля H , под действием которого магнитострикционная полоска намагничивается, приобретая модуль упругости, соответствующий резонансной частот 58 кГц. Резонансную частоту можно вычислить из формулы

$$f_r = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E_H}{\gamma}}, \text{ где } l \text{ — длина полоски, } \gamma \text{ —}$$

плотность материала, E_H — модуль упругости материала при напряженности магнитного поля H . Антенна излучает переменное магнитное поле короткими им-

пульсами. Активированная магнитострикционная полоска под действием переменного магнитного поля вибрирует с резонансной частотой. После прекращения действия импульса механические колебания, постепенно затухая, продолжаются еще некоторое время. Эти колебания вызывают изменение магнитной индукции в материале и электродвижущую силу в приемнике в промежутках между импульсами, способствуя определению активированного состояния бирки. Дезактивация бирки, производимая размагничиванием полутвердой магнитной полоски, вызывает рост модуля упругости и, следовательно, смещение резонансной частоты магнитострикционной полоски. Преимущество А.с. состоит в высокой вероятности обнаружения, возможности защиты фольгированных товаров, а недостатком является выпуклая бирка и относительно высокая стоимость системы.

Лит.: *Herzer G.* Der große Lauschangriff auf Ladendiebe// *Physikalische Blätter*, 2001, Bd.57, № 5, S. 43—48.

АКЦЕПТОР [лат. *acceptor* принимающий] — примесный атом, или какой-либо другой дефект кристаллической решетки полупроводника, захватывающий электрон и обуславливающий дырочную проводимость полупроводника.

АЛЛОТРОПИЯ [гр. *allos* другой, иной и *trpos* поворот, свойство] — существование одного и того же химического элемента в виде двух или нескольких простых веществ (аллотропических модификаций), различных по строению и свойствам, например, углерод существует в виде угля, графита и алмаза. А. вызывается либо образованием различных кристаллических форм, тогда А. является частным случаем полиморфизма, либо различным числом атомов химического элемента в молекуле простого вещества.

АЛПЕРМ [Alperm от англ. *aluminum* алюминий и *permeability* проницаемость] — название магнитомягкого сплава с высокой магнитной проницаемостью Fe-16Al. После закалки с 600°C А. имеет следующие магнитные свойства: $\mu_H = 3100$,

$\mu_{\max} = 55000$, $H_c = 3$ А/м. В промышленных масштабах сплав не выпускается. Сплав А. разработали Х. Масумото и Сайто (1942).

Лит.: Бозорт Р. Ферромагнетизм. — М.: ИИЛ, 1956. — 784 с.

АЛФЕНОЛ [Alfenol от лат. aluminum и ferrum и англ. сокращ. NOL (Naval Ordnance Laboratory)] — название магнитомягкого сплава с высокой магнитной проницаемостью Fe-16Al. В промышленных масштабах сплав не выпускается. Технологию производства А. разработал Нахман (1954).

Лит.: Хек К. Магнитные материалы и их техническое применение. — М.: Энергия, 1973. — 304 с. Nachman J.F., Buehler W.J. 16 percent aluminum-iron alloy cold rolled in the order-disorder temperature range.— J. Appl. Phys., 1954, v. 25, № 3, p. 307—313.

АЛФЕР [Alfer от лат. aluminium и ferrum] — название магнитоотрицательного высокопрочного коррозионно-стойкого сплава Fe-13Al. В промышленных масштабах сплав не выпускается. В период Второй мировой войны в Японии при отсутствии никеля А. использовали в качестве материала для изготовления магнитоотрицательных вибраторов. Сплав А. разработали и предложили название Хонда, Х. Масумото, Ширакава и Кобаяши (1949).

АЛЬСИФЕР, алсифер [лат. aluminum, silicium, ferrum] — магнитомягкий сплав Fe-9,6Si-5,4Al с высокой магнитной проницаемостью, обладающий высокой твердостью и сопротивлением к истиранию. За рубежом сплав известен под названием «сендаст». Для промышленности разработан сплав 10СЮ-ВИ, который изготавливается в виде литой полосы толщиной 8—15 мм. Сплав изготавливается также методами порошковой металлургии в виде прутка диаметром 15—80 мм или методом сверхбыстрой закалки расплава. Сплав Fe-9,6Si-5,4Al первыми разработали Х. Масумото и Т. Ямамото (1932). Название «А.» сначала предложили Меськин, Марголин, Шольц и Рабкин для прессованной массы из сплава Fe-9,6Si-5, 4Al (1941), а затем этот термин закрепился за самим сплавом.

Лит.: Займовский А.С., Чудновская Л.А. Магнитные материалы. — М.; Л.: ГЭИ, 1957. — 224 с.

АЛЬТЕРНАТОР [лат. alternus попеременный] — генератор переменного тока. В настоящее время термин «А.» используется только за рубежом.

АЛЬФА-ЖЕЛЕЗО [гр. alpha первая буква греческого алфавита] — состояние железа при температуре от абсолютного нуля до 769°C (точка Кюри) с объемно-центрированной кубической решеткой и ферромагнитными свойствами. В температурном интервале 769—917°C существует бета-железо с парамагнитными свойствами, которое также имеет объемно-центрированную кубическую решетку, но характеризуется другими параметрами. В температурном интервале 917—1394°C существует гамма-железо с гранецентрированной кубической решеткой. Выше 1394°C устойчивой фазой является дельта-железо с объемно-центрированной кубической решеткой.

АМОБИДС [Amobeads от англ. amorphous аморфный и bead бусина] — зарегистрированный товарный знак (США, 1987) корпорации «Тошиба» на элементы, подавляющие выбросы тока в электрической цепи. Под маркой «А.» выпускаются одновитковые насыщающиеся реакторы, изготовленные из аморфного сплава на основе кобальта с прямоугольной петлей магнитного гистерезиса, которые нанизываются на провод вблизи полупроводникового переключающего прибора (диода, транзистора, тиристора) для уменьшения выбросов тока в момент переключения.

АМОФИЗАТОР [гр. amorphous бесформенный] — металлоид, повышающий стеклообразующую способность металлических сплавов. В качестве А. в аморфных сплавах металл-металлоид главным образом применяют Si, В, С, Р. Наибольший практический интерес представляет пара кремний и бор, которая используется в большинстве современных промышленных аморфных металлических сплавах. Роль А. сводится в первую очередь к

снижению температуры плавления сплава, причем его содержание подбирают близким к эвтектическому составу. Некоторые легирующие элементы также повышают стеклообразующую способность аморфных сплавов, однако их не относят к группе А.

АМОРИФИКАЦИЯ — процесс перехода вещества из жидкого состояния в твердое состояние с формированием в твердом теле аморфной структуры.

АМОРФНАЯ СТРУКТУРА твердого тела — структура твердого тела, в которой имеется ближний атомный порядок, но отсутствует дальний атомный порядок, при этом расположение атомов в первых трех координационных сферах нельзя описать какой-либо кристаллографической системой. При описании А.с. исходят из модели случайной упаковки жестких сфер, которую первоначально предложил Бернал (1960) для однокомпонентной жидкости. Структура в этой модели определяется путем минимизации объема тела (максимальной плотности). При случайной упаковке жестких сфер возможно только пять типов координационных многогранников (канонические многогранники Бернала). Для описания А.с. двухкомпонентных систем используют стереохимический подход (Гаскелл, 1979), при котором координационные ячейки (нанокластеры) имеют симметрию, аналогичную кристаллической фазе этой же бинарной системы. Предполагается, что эти нанокластеры существовали уже в исходном расплаве и были унаследованы в процессе быстрого охлаждения.

АМОРФНОЕ СОСТОЯНИЕ — твердое некристаллическое состояние вещества, которое характеризуется изотропией свойств и плавлением в некотором температурном интервале, т. е. отсутствием точки плавления. При повышении температуры аморфное вещество размягчается и постепенно переходит в жидкое состояние. В А.с. отсутствует дальний порядок в расположении атомов, поэтому без внешних воздействий макроскопические свой-

ства тела являются изотропными. Однако ближний порядок в А.с. сохраняется. Ближний порядок характерен и для жидкостей, но в жидкости происходит постоянный интенсивный обмен местами между соседними частицами, затрудняющийся по мере увеличения вязкости. Поэтому твердое тело в А.с. принято рассматривать как переохлажденную жидкость с очень высоким коэффициентом вязкости. Все твердые тела в А.с. метастабильны, их устойчивым состоянием является жидкое. Твердое тело в А.с. имеет больший объем и энтропию по сравнению с кристаллическим состоянием. Экспериментально А.с. веществ устанавливают по отсутствию характерных для кристаллов дифракционных максимумов на рентгено-, нейтроно- и электрограммах. В А.с. находятся силикатные стекла, получаемые из переохлажденной жидкости, поэтому А.с. часто называют стеклообразным.

АМОРФНЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ — магнитомягкие материалы, которые имеют аморфную структуру хотя бы на одном из этапов их изготовления. Как правило, А.м. применяют после термической обработки, которая вызывает структурную релаксацию, частичную или полную кристаллизацию. Поскольку нанокристаллические магнитомягкие материалы чаще всего получают из аморфного прекурсора, то их также можно отнести к группе А.м. Одна из причин высоких магнитных свойств А.м. — отсутствие макроскопической кристаллографической анизотропии. Наиболее распространенные А.м. изготавливают на основе переходных металлов Fe, Co, Ni. Металлоиды, которые способствуют аморфизации металлических сплавов, выбирают из группы В, Si, C, P, Ge. В настоящее время предпочтение отдается паре бор и кремний, которая обеспечивает повышенную термическую стабильность сплава. Легирующие элементы Cr, Mo, Mn вводят с целью повышения магнитной индукции или снижения магнитных потерь, повышения температуры кристаллизации и жаростойкости сплава. Первый А.м. $\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$ получен Дувезом и Лином (1967). Симпсон

и Брамли (1971) первыми высказали предположение, что А.м. будут иметь низкую коэрцитивную силу, поскольку в них отсутствует кристаллографическая анизотропия. Люборский, Дж. Беккер и Маккари (1975) первыми продемонстрировали, что для получения низкой коэрцитивной силы необходимо проводить отжиг А.м., который обеспечивает снятие внутренних напряжений после сверхбыстрой закалки расплава. Первый А.м. предназначенный для промышленного производства $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$, выпущен под торговой маркой Метглас 2826 («Аллайд Кэмикэл», 1973).

АМОРФНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ, аморфные металлы — твердые некристаллические металлы и их сплавы. Отличительной чертой А.м. является отсутствие дальнего порядка, т. е. периодичности в расположении атомов: дифракционная картина содержит лишь серию широких максимумов в отличие от резких линий кристаллов. В отличие от металлических стекол А.м. можно получить не только из жидкой фазы, но и с помощью других методов, например, распылением. Бреннер, Кауч, Уильямс первыми зафиксировали металлический сплав в аморфном состоянии — электролитически осажденный Ni-P (1950). Клементс, Уилленс, Дувез (1960) получили первый А.м. из расплава Au-Si . Чен и Полк (1972) запатентовали первый А.м. с общей формулой $\text{M}_a\text{Y}_b\text{Z}_c$, имеющий по крайней мере 50 % аморфной фазы, где М — металл или комбинация металлов из группы Fe, Ni, Cr, Co, V; Y — металлоид

или комбинация металлоидов из группы P, C, B; Z — элемент или комбинация элементов из группы Al, Si, Sn, Sb, Ge, In, Be, при этом $a = 60-90$, $b = 10-30$, $c = 0,1-15$ ат%.

АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ — сплавы, находящиеся в аморфном (стеклообразном) состоянии. Особую группу А.с. составляют аморфные металлические сплавы, основным элементом которых является металл.

АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ АМАГ — аморфные сплавы, производимые НИИ материалов электронной техники (г. Калуга). В табл. А1 представлены типичные свойства А.с. после термической обработки кольцевых магнитопроводов в поперечном магнитном поле. Номинальная толщина ленты 18—25 мкм.

АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ АМЕТ — аморфные сплавы, производимые Ашинским металлургическим заводом (г. Аша). В табл. А2 представлены типичные свойства А.с. после термической обработки кольцевых магнитопроводов (В — без магнитного поля, П — в продольном магнитном поле, Т — в поперечном магнитном поле). Температура кристаллизации А.с. 520—540°C. Номинальная толщина ленты 25 мкм. А.с. 2НСР, 9КСР разработаны ЦНИИчермет в 1982 г., сплавы 82КЗХСР, 84КХСР, 86КГСР — в 1988 г. А.с. 30КСР и нанокристаллический сплав 5БДСР разработаны совместно сотрудниками ЦНИИчермет и Ашинского металлургического завода в 1986 и 1992 гг., соответственно.

Таблица А1. Типичные физические свойства аморфных сплавов амаг после термической обработки

Марка	B_s , Тл	H_c , А/м	μ_n 10 кГц	B_r/B_s	$P_{0,2/100}$, Вт/кг	$\lambda_s \cdot 10^{-6}$	T_C , °C	T_x , °C	Плотность, кг/м ³
170	0,55	0,16	100000	0,20	20—25	+0,1	200	530	7700
171	0,58	0,24	80000	0,15	20—25	-0,1	225	525	7700
172	0,60	0,24	70000	0,1	20—25	-0,1	235	520	7700
179	0,66	0,24	50000	0,05	20—30	+0,2	265	510	7700
180	0,68	0,24	35000	0,05	20—30	+0,1	275	505	7700
183	0,75	1,2	10000	0,05	30—40	+1	350	525	7700
186	0,90	2	2200	0,03	45—55	+0,05	430	470	7700
200*	1,2	1,2	>30000	0,1	30—40	+2	570	530	7300

* С нанокристаллической структурой.



Таблица А2. Типичные физические свойства аморфных сплавов амет после термической обработки

Марка сплава	Химический состав	Тип магнитопровода	B_s , Тл	H_c , А/м	μ_n 1 кГц	B_r/B_s	$P_{0,2/20}$, Вт/кг	$\lambda_s \cdot 10^{-6}$	T_C , °С
82К3ХСР	$Co_{67}Fe_3Cr_3Si_{15}B_{12}$	82В	0,42	0,2	150000	0,7	2	0	180
84КХСР	$Co_{68}Fe_4Cr_4Si_{13}B_{11}$	84ХВ 84ХП 84ХТ	0,58	0,7 0,8 0,5	50000 — 50000	0,7 >0,9 <0,1	2 3 1	0,1	250
86КГСР	$Co_{73,5}(Fe_{0,5}Mn_{0,5})_{6,5}Si_5B_{15}$	86Т	1,0	0,7	3000	0,02	2	0,05	560
30КСР	$Fe_{56}Co_{25}Si_5B_{14}$	30П 30Т	1,48	5 4	1200	0,9 0,1	20 6	30	450
2НСР	$Fe_{77}Ni_1Si_9B_{13}$	2П 2Т	1,5	5 4	—	0,88 0,1	24 6	25	420
9КСР	$Fe_{72}Co_8Si_5B_{15}$	9П 9Т	1,6	6 8	—	>0,9 <0,2	20 —	27	460
5БДСР*	Fe-Cu-Nb-Si-B	5В 5П 5Т	1,25	0,7 1,5 0,7	80000 — 50000	0,6 >0,9 <0,1	3 8 1,5	1	—

* С нанокристаллической структурой.

АМО́РФНЫЕ СПЛА́ВЫ ГАММАМЕ́Т — аморфные сплавы, производимые НПП «Гаммамет» (г. Екатеринбург). В табл. А3 представлены типичные свойства А.с. после термической обработки кольцевых магнитопроводов (А — в продольном магнитном поле, В — в поперечном магнитном поле). Температура кристаллизации А.с. 520—540°С, номинальная толщина ленты 25 мкм. А.с. запатентованы в России (1991 — 2000 гг.).

Лит.: Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. 384 с.

АМО́РФНЫЕ СПЛА́ВЫ ЖЕЛЁЗО-БОР-КРЕ́МНИЙ (УГЛЕРО́Д) — аморфные сплавы на основе железа, имеющие высокую магнитную индукцию насыщения и температуру кристаллизации. Бор и кремний (углерод) обеспечивают получение аморфной структуры в быстрозакаленной ленте. Увеличение содержания кремния

Таблица А3. Типичные физические свойства аморфных сплавов гаммамет после термической обработки

Тип магнитопровода	B_{800} , Тл	$\mu_{0,08}$	μ_{max}	$K_{п800}$ (* $K_{п10}$)	H_c , А/м	$P_{0,2/20}$, Вт/кг	$\lambda_s \cdot 10^{-6}$	T_C , °С	Плотность, кг/м ³
ГМ 501	0,43	150000	600000	0,6	0,15	3,6	<0,2	150	7700
ГМ 503А ГМ 503В	0,58	5000 40000	150000 50000	0,92* 0,03	0,2 0,25	8,5 2,6	<0,2	260	7700
ГМ 515А ГМ 515В	0,95	150 1500	250000 1550	0,9* <0,01	1,5	60 12	<0,2	500	7900
ГМ 440А ГМ 440В	1,5	1000 8000	200000 20000	0,9 0,06	4	30 8	25	420	7300

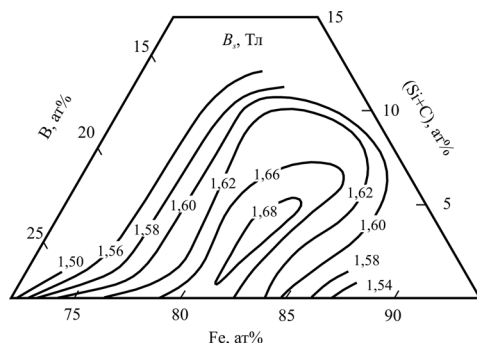


Рис. А1. Магнитная индукция насыщения B_s в аморфном сплаве Fe-B-(Si+C)

способствует росту температуры кристаллизации и снижению коэрцитивной силы. В А.с. можно получить максимальную магнитную индукцию насыщения B_s около 1,7 Тл (рис. А1). Тройные диаграммы А.с. практически одинаковы для сплавов Fe-B-Si и Fe-B-C. Первый тройной сплав Fe-B-Si разработали в компании «Дженерал Электрик» (Люборски и Уолтер, 1978). Именно эта система в дальнейшем использовалась для разработки А.с. на основе железа с небольшими изменениями химического состава. А.с. изготавливаются в виде аморфной ленты толщиной 15–30 мкм. Первый промышленно освоенный А.с. $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13,5}\text{Si}_{3,5}\text{C}_2$, выпускаемый под торговой маркой Метглас 2605SC, разработан в американской компании «Аллайд Кэмикэл» (Декристорф, Фрейлих, Натасингх, 1979).

Лит.: Luborsky F.E., Becker J., Walter J.L., Liebermann H. Formation and magnetic properties of Fe-B-Si amorphous alloys// IEEE Trans. Magn., 1979, v. 15, № 4, p. 1146–1149. Luborsky F.E., Walter J.L. Preparation and properties of Fe-B-Si-C amorphous alloys// IEEE Trans. Magn., 1980, v. 16, № 4, p. 572–574.

АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗО-НИКЕЛЬ-БОР-КРЕМНИЙ — аморфные сплавы на основе железа, в которых железо частично замещается никелем, что приводит к увеличению магнитной проницаемости, а также к снижению магнитных потерь и магнитострикции насыщения. После добавки никеля одновременно снижается магнитная индукция насыщения. А.с. занимают промежуточное поло-

жение между сплавами с высокой магнитной индукцией насыщения и сплавами с нулевой магнитострикцией, поэтому они не получили широкого практического применения. Известен сплав 10НСР, разработанный в СССР (Институт прецизионных сплавов ЦНИИчермет, 1984) для промышленного производства. Сплав 10НСР после термической обработки в поперечном магнитном поле имеет следующие типичные свойства: $\mu_n = 4000$, $K_p < 0,1$, $H_c = 8$ А/м, $B_{800} = 1,35$ Тл, $\lambda_s = 25 \cdot 10^{-6}$, $T_C = 420^\circ\text{C}$, $T_x = 520^\circ\text{C}$. Небольшие добавки никеля улучшают технологические свойства производимых в настоящее время сплавов 2НСР и ГМ 440.

Лит.: Соснин В.В., Зимичев А.М., Зусман А.И., Климова Ю.Ф. Продукция черной металлургии. Каталог. Аморфные магнитно-мягкие сплавы. — М.: ЦНИИчермет, 1987. — 39 с.

АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗО-ХРОМ-БОР-КРЕМНИЙ — жаростойкие аморфные сплавы на основе железа, в которых железо частично замещается хромом, что приводит к увеличению магнитной проницаемости, снижению коэрцитивной силы и магнитных потерь (рис. А2). Улучшение

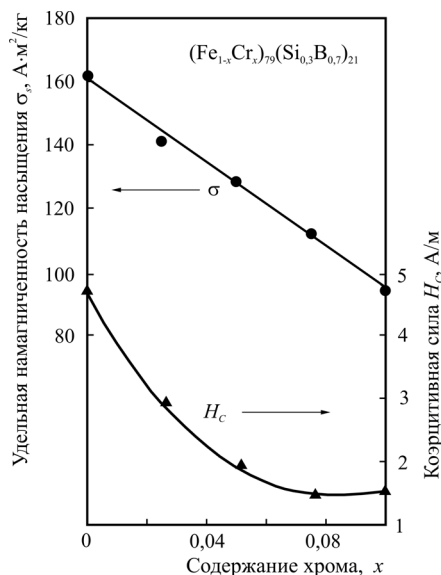


Рис. А2. Зависимости удельной намагниченности насыщения σ и коэрцитивной силы H_c от содержания хрома x в аморфном сплаве $(\text{Fe}_{1-x}\text{Cr}_x)_{79}(\text{Si}_{0,3}\text{B}_{0,7})_{21}$

магнитных свойств связывают с формированием на поверхности ленты оксидной пленки, препятствующей внутреннему окислению. Одновременно с увеличением хрома снижается магнитная индукция насыщения и температура Кюри. В промышленных масштабах производится сплав Метглас 2605S3A ($\text{Fe}_{77}\text{Cr}_3\text{B}_{15}\text{Si}_5$) с магнитной индукцией насыщения 1,41 Тл. Первый жаростойкий аморфный сплав на основе железа с добавками хрома разработали Ц. Масумото и Нака (1974).

Лит.: *Inomata K., Hasegawa M., Shimanuki S., Haga M.* Amorphous magnetic alloy// United States Patent 4385932. Приор. 4.06.1981. Оpubл. 31.05.1983.

АМО́РФНЫЕ СПЛА́ВЫ КО́БАЛЬТ-ЖЕЛЁЗО-БОР-КРЕ́МНИЙ — аморфные сплавы на основе кобальта, имеющие близкую к нулю магнитострикцию насыщения. Чтобы обеспечить нулевую магнитострикцию $\lambda_s = 0$ в сплаве $(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{100-y}(\text{Si}_{0,4}\text{B}_{0,6})_y$, необходимо при увеличении содержания металлоидов с 19 до 31 ат. % одновременно снижать содер-

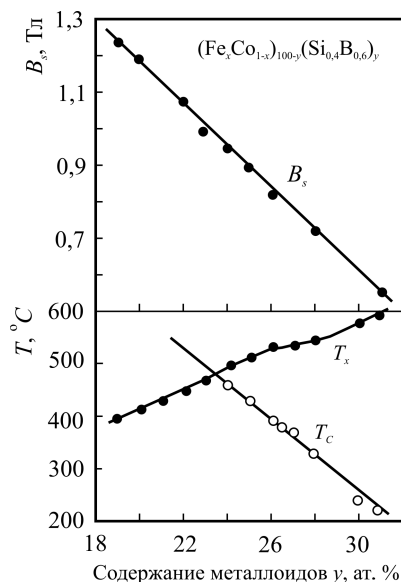


Рис. А3. Зависимости магнитной индукции насыщения B_s , точки Кюри T_C и температуры кристаллизации T_x от содержания металлоидов в аморфном сплаве $(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{100-y}(\text{Si}_{0,4}\text{B}_{0,6})_y$

жание железа с 7 до 5,5 ат. %. При увеличении содержания металлоидов также снижается магнитная индукция насыщения B_s , температура Кюри T_C и коэрцитивная сила, и наоборот возрастает температура кристаллизации T_x и магнитная проницаемость (рис. А3). Плотность А.с. определяется из соотношения $\gamma = 8870 - 40y$. Для получения наибольшей магнитной проницаемости предпочтительно, чтобы отношение кремния к сумме кремния и бора составляло 0,6. В настоящее время к промышленным А.с., как правило, добавляется небольшое количество легирующих элементов (Cr, Mo, Ni). А.с. изготавливают в виде аморфной ленты толщиной 15–30 мм. Первыми А.с. (Amomet $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$) разработали М. Кикучи, Фуджимори, Оби, Ц. Масумото (1975).

Лит.: *Kohmoto O., Ohya K., Yamaguchi N., Fujishima H., Ojima T.* Magnetic properties of zero magnetostrictive amorphous Fe-Co-Si-B alloys// J. Appl. Phys., 1979, v. 50, № 7, p. 5054–5056. *Makino A., Inoue A., Masumoto T.* Compositional effect on soft magnetic properties of Co-Fe-Si-B amorphous alloys with zero magnetostriction// Mater. Trans. JIM, 1990, v. 31, № 10, p. 884–890.

АМО́РФНЫЕ СПЛА́ВЫ КО́БАЛЬТ-ЖЕЛЁЗО-МА́РГАНЕЦ-БОР-КРЕ́МНИЙ — аморфные сплавы на основе кобальта, имеющие близкую к нулю магнитострикцию насыщения и высокую магнитную индукцию насыщения. Добавка марганца и железа приводит к росту магнитной индукции насыщения, что позволяет получить А.с. с нулевой магнитострикцией и магнитной индукцией насыщения B_s до 1,2 Тл (рис. А4). Увеличение содержания бора и кремния закономерно снижает температуру Кюри T_C и магнитную индукцию насыщения B_s , а также увеличивает температуру кристаллизации T_x так, что в ряде сплавов она выше T_C . В А.с. формируется значительная магнитная анизотропия, которая обеспечивает после термической обработки в поперечном магнитном поле высокую линейность кривой намагничивания (промышленные сплавы ГМ 515, 86КГСР Витровак 6150). А.с. изготавливают в виде аморфной лен-

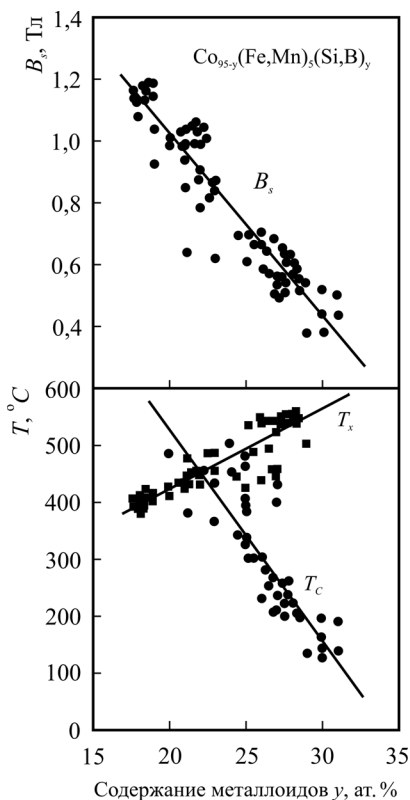


Рис. А4. Зависимости магнитной индукции насыщения B_s , точки Кюри T_C и температуры кристаллизации T_x от содержания металлоидов в аморфном сплаве $\text{Co}_{0.95-y}(\text{Fe,Mn})_y(\text{Si,B})_y$

ты толщиной 15–30 мм. Хилцингер (1979) и независимо Сено, Сакакима, Ямагучи и Хирота (1979) первыми разработали А.с. на основе кобальта с нулевой магнито-стрикцией.

Лит.: Hilzinger H.R., Kunz W. Magnetic properties of amorphous alloys with low magnetostriction// J. Magn. Magn. Mater., 1980, v. 15 — 18, p. 1357–1358. Herzer G. Amorphous and nanocrystalline soft magnets// Magnetic hysteresis in novel materials. Proc. NATO. Ser. E: Applied Sciences, V. 338. Edited by G.C. Hadjipanayis. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers, 1997, p. 711–730.

АМО́РФНЫЕ СПЛА́ВЫ КО́БАЛЬТ-ЖЕЛЕ́ЗО-ХРОМ(МОЛИБДЭ́Н)-БОР-КРЕ́МНИЙ — аморфные сплавы на основе кобальта, имеющие близкую к нулю магнито-стрикцию, которые отличаются высокой жаростойкостью и коррозионной

стойкостью за счет образования на поверхности оксидной пленки. Это позволяет получать высокие магнитные свойства после термической обработки на воздухе. Однако с повышением содержания хрома (молибдена) снижается магнитная индукция насыщения B_s и температура Кюри T_C (рис. А5). Добавки хрома и молибдена оказывают примерно одинаковое влияние на магнитные свойства А.с. В промышленных масштабах изготавливают сплавы, имеющие высокую начальную магнитную проницаемость (ГМ 501, 82К3ХСР), или высокую прямоугольность (линейность) петли магнитного гистерезиса (ГМ 503, 84КХСР, Витровак 6025). А.с. изготавливают в виде аморфной ленты толщиной 15–30 мм.

Лит.: Ganesan K., Narayanasamy A., Ramasamy S. Thermomagnetic studies of $(\text{Co}_{0.93}\text{Fe}_{0.07})_{75-x}\text{Cr}_x\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ metglas// J. Mater. Sci.: Mater. Electron., 1990, v. 1, № 3, p. 159–164. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. — 384 с.

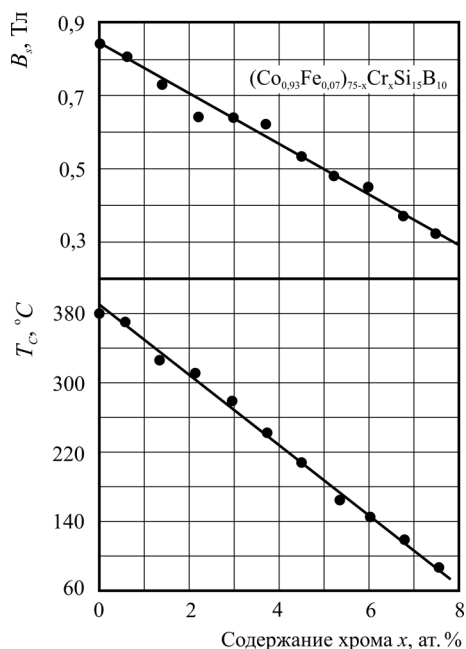


Рис. А5. Зависимости магнитной индукции насыщения B_s , и точки Кюри T_C от содержания хрома в аморфном сплаве $(\text{Co}_{0.93}\text{Fe}_{0.07})_{75-x}\text{Cr}_x\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$

АМО́РФНЫЕ СПЛА́ВЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЁЗА — аморфные сплавы, имеющие высокую магнитную индукцию насыщения 1,4–1,7 Тл и магнитострикцию насыщения $(20\text{--}30) \cdot 10^{-6}$, которые изготавливаются в виде аморфной ленты толщиной 15–30 мм. Эти магнитные характеристики А.с. взаимосвязаны, поскольку магнитострикция насыщения пропорциональна квадрату намагниченности насыщения. При выборе аморфизаторов учитывают их влияние на магнитную индукцию насыщения B_s и температуру Кюри T_C (рис. А6). Легирующие элементы (Cr, Ni, Mo) улучшают технологичность изготовления ленты, жаростойкость или другие магнитные и физические свойства сплава. В промышленных масштабах изготавливаются сплавы Fe-Si-B(C), которые могут содержать различные легирующие элементы: хром (Метглас 2605S3A), никель (2НСР, ГМ 440). Оптимальная частотная область применения сплавов до 20 кГц.

Лит.: Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. — М.: Металлургия, 1987. — 328 с.

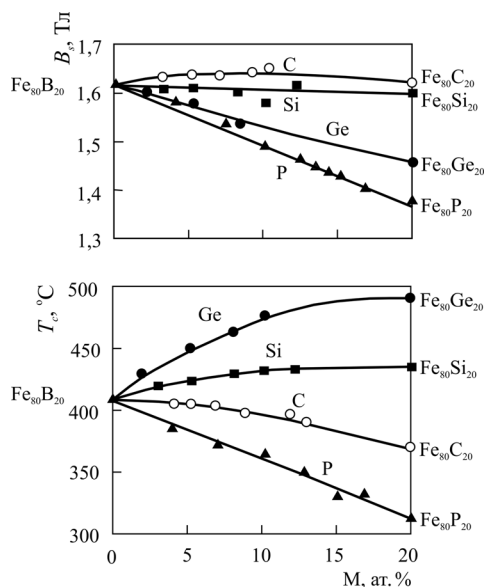


Рис. А6. Зависимости магнитной индукции насыщения B_s и точки Кюри T_C от содержания металлоидов в аморфных сплавах на основе железа

АМО́РФНЫЕ СПЛА́ВЫ НА ОСНОВЕ КО́БАЛЬТА — аморфные сплавы, имеющие близкую к нулю магнитострикцию насыщения, которые изготавливают в виде аморфной ленты толщиной 15–30 мм. Для достижения нулевой магнитострикции в сплав добавляют небольшое количество железа или марганца (рис. А7). Выбор легирующих элементов (Cr, Mo, Ni) зависит от требований к основным отличительным свойствам сплава: магнитная индукция насыщения B_s (рис. А8) и магнитная проницаемость. В современных А.с.

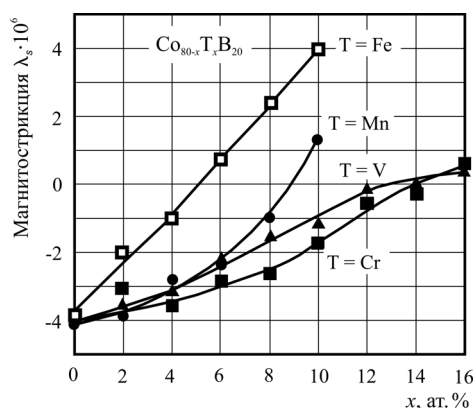


Рис. А7. Зависимости магнитострикции насыщения λ_s от содержания легирующих элементов $T = \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr}, \text{V}$ в аморфном сплаве на основе кобальта $\text{Co}_{80-x}\text{T}_x\text{B}_{20}$

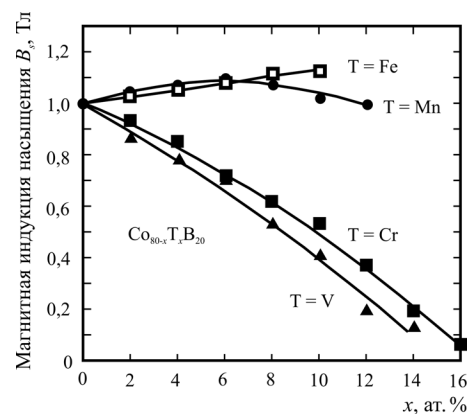


Рис. А8. Зависимости магнитной индукции насыщения B_s от содержания легирующих элементов $T = \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr}, \text{V}$ в аморфном сплаве на основе кобальта $\text{Co}_{80-x}\text{T}_x\text{B}_{20}$

в качестве аморфизаторов используют бор и кремний. В промышленных масштабах изготавливают сплавы, из которых получают магнитопроводы с высокой начальной магнитной проницаемостью (ГМ 501 и 82КЗХСР), с прямоугольной петлей магнитного гистерезиса (ГМ 503А, Метглас 2714А, Витровак 6025), с линейной петлей магнитного гистерезиса (ГМ 503В) или с очень высокой линейностью петли магнитного гистерезиса (ГМ 515В, Витровак 6150). Частотная область применения А.с. достигает десятки мегагерц, поэтому сплавы могут иметь относительно низкую магнитную индукцию насыщения. С увеличением температуры Кюри T_C А.с. имеют более высокую магнитную индукцию насыщения и более низкую магнитную проницаемость (рис. А9). Такая взаимосвязь магнитных характеристик обусловлена существованием спонтанной намагниченности в ферромагнетиках, следствием которой является закон Блоха

$$M_s = M_{s0} \left[1 - \alpha \left(\frac{T}{T_C} \right)^{\frac{3}{2}} \right], \text{ т. е. намагниченность насыщения } M_s \text{ растет с увеличением температуры Кюри } T_C. \text{ С другой стороны, константа одноосной магнитной анизотропии пропорциональна третьей степени намагниченности насыщения } K_u \sim M_s^3, \text{ а магнитная восприимчивость вращения равна } \chi_{\text{вр}} = \frac{\mu_0 M_s^2}{K_u} \text{ и поэтому она обратно пропорциональна } M_s. \text{ Таким образом, в материале с высокой намагниченностью насыщения следует ожидать более низкую магнитную проницаемость.}$$

Лит.: Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. — М.: Металлургия, 1987. — 328 с. O'Handley R.C., Sullivan M.O. Magnetostriction of $\text{Co}_{80-x}\text{TxB}_{20}$ ($T = \text{Fe, Mn, Cr or V}$) glasses//J. Appl. Phys., 1981, v. 52, № 3, p. 1841—1843.

АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ — аморфные сплавы на основе железа, кобальта и никеля, среди которых можно выделить следующие группы: сплавы на основе железа с высокой магнитной индукцией и магнитострикцией насыщения, сплавы на основе кобальта с близкой к нулю магнитострикцией насыщения и высокой магнитной проницаемостью, сплавы на основе никеля с высокой магнитной проницаемостью и низкой температурой Кюри. Сплавы на основе никеля изготавливались на начальном этапе разработки А.с., однако в последнее время они почти не применяются в качестве магнитомягких материалов. На рис. А10 представле-

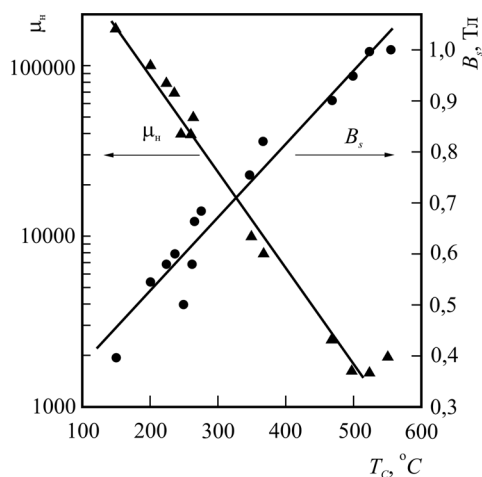


Рис. А9. Зависимости магнитной индукции насыщения B_s и начальной относительной магнитной проницаемости μ_n от температуры Кюри T_C в аморфных сплавах на основе кобальта

на рис. А10 представлено магнитное поле насыщения B_s в аморфном сплаве $(\text{Fe,Ni,Co})_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$ в зависимости от состава. Третье направление — это содержание никеля Ni . Показаны линии постоянной температуры Кюри $T_C = 20^\circ\text{C}$ и постоянной магнитной индукции насыщения $B_s = 0$. В нижней части графика показаны значения λ_s (1,5, 1,4, 1,2, 1,0, 0,8, 0,6, 0,4, 0,2) для различных составов.

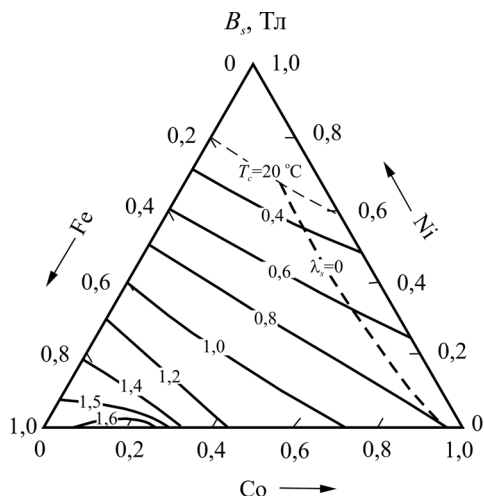


Рис. А10. Магнитная индукция насыщения B_s в аморфном сплаве $(\text{Fe,Ni,Co})_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$

на тройная диаграмма аморфного сплава $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$ для магнитной индукции насыщения B_s , а штриховой линией отмечены составы, соответствующие нулевой магнитострикции насыщения λ_s . Линия нулевой магнитострикции практически не изменяется при использовании других металлоидов.

Лит.: Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. — М.: Металлургия, 1987. — 328 с.

АМО́РФНЫЕ ФЕРРОМАГНЕ́ТИКИ — ферромагнетики с аморфной (некристаллической) структурой, атомная структура которых имеет позиционный (структурный) и химический (композиционный) беспорядок. Иногда под термином «А.ф.» понимают ферромагнетики и ферримагнетики с аморфной структурой. Для них также используют термин «аморфные магнетики». Губанов (1960) впервые теоретически обосновал возможность существования А.ф. Зонная электронная структура кристаллического твердого тела не претерпевает кардинальных изменений при переходе в жидкое состояние. Поэтому при таком переходе должен сохраняться ферромагнетизм, определяемый ближним порядком. Флуктуации ближайшего окружения приводят к неоднородному характеру возникновения магнетизма в аморфных сплавах. Это обуславливает заметное различие магнитных свойств А.ф. и соответствующих кристаллических соединений. Первые А.ф. в виде термически напыленных пленок железа получили Григсон, Дав, Стилзуэлл (1964). Сохранение ферромагнетизма в аморфном состоянии впервые доказали Мадер, Новик (1965) для напыленных в вакууме пленок Co-Au . Цуй, Дувез (1966) изготовили первый А.ф. из расплава $\text{Pd}_{80}\text{Si}_{20}$, в котором палладий был частично заменен железом.

Лит.: Хандрих К., Кобе С. Аморфные ферро- и ферримагнетики. — М.: Мир, 1982. — 296 с.

АМО́РФНЫЙ [гр. *amorphous* бесформенный] — отличный от кристаллического. Синонимами понятия «А.» являются «некристаллический», «стеклообразный», «подобный жидкости».

АМО́РФНЫЙ МАГНИ́ТНЫЙ МИКРОПРОВО́Д — магнитный микропровод с аморфной структурой, полученный закалкой из расплава. В результате закалки в проводе возникают внутренние остаточные напряжения, которые наряду со знаком константы магнитострикции материала определяют направления осей легкого намагничивания и магнитную доменную структуру А.м. В центральной части стрежня доминируют осевые растягивающие напряжения, в поверхностных слоях — осевые и окружные сжимающие напряжения, а в радиальном направлении — небольшие растягивающие напряжения. Поэтому в сплавах на основе железа с большой положительной константой магнитострикции можно выделить три области: однородно намагниченная центральная часть с одноосной магнитной анизотропией, поверхностный слой с доменной структурой напряжений и переходная область между ними. В сплавах на основе кобальта с отрицательной константой магнитострикции в приповерхностном слое формируется спиральная (бамбуковая) доменная структура с намагниченностью в доменах направленной вдоль окружности. Внутренние напряжения в микропроводе со стеклянной изоляцией регулируются толщиной поверхностного стеклянного слоя.

А.м. на основе железа обладает магнитной бистабильностью, т. е. он имеет два устойчивых состояния вдоль оси микропровода и способен перемагничиваться одним большим скачком Баркгаузена. В микропроводе скорость перемагничивания значительно выше, ввиду слабо выраженного скин-эффекта, чем в других материалах, поэтому меньше ширина индуцируемых импульсов и больше их амплитуда. Благодаря этому, в частности, магнитная проницаемость А.м. практически не зависит от частоты вплоть до 5 МГц. Небольшой диаметр А.м. в стеклянной изоляции около 10 мкм позволяет заметно снизить критическую длину провода до 2 мм, при которой магнитные свойства не зависят от его длины, а это является основанием для значительного

Таблица А4. Типичные физические свойства аморфного магнитного микропровода, выпускаемого предприятием «Микрон» (Молдова)

Сплав	Марка	Диаметр жилы, мкм	Общий диаметр, мкм	H_c , А/м	B_r/B_s
CoNiFeBSi	MW SM 8-b1	8	12	10	0,2
	MW SM 12-b1	12	16	15	0,3
	MW SM 16-b1	16	21	15	0,8
	MW SM 22-b1	22	24	10	0,2
FeBSi	MW BS-c1	8	12	260–320	0,9
	MW BS-c2	14	16	70–140	0,9
	MW BS-c3	18	21	200–260	0,94
	MW BS-c4	24	24	140–200	0,92
	MW BS-c5	30	30	100–140	0,9

уменьшения размеров магнитных элементов, используемых в датчиках. Спиральная (бамбуковая) доменная структура обеспечивает гигантский магниторезистивный эффект в А.м. на основе кобальта. В табл. А4 приведены некоторые характеристики А.м. в стеклянной изоляции, выпускаемые предприятием «Микрон» (Молдова).

Лит.: Zhukova V., Ipatov M., Zhukov A. Thin magnetically soft wires for magnetic microsensors// Sensors, 2009, v. 9, p. 9216–9240.

АМО́РФНЫЙ ПРЕКУ́РСОР [англ. precursor предшественник, исходное вещество] — заготовка с аморфной структурой, используемая для производства аморфных и нанокристаллических магнитопроводов.

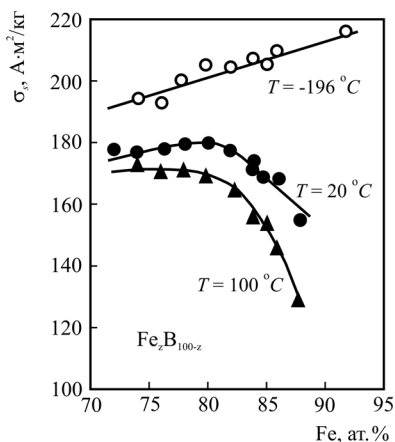


Рис. А11. Зависимости удельной намагниченности насыщения σ_s от содержания железа в аморфном сплаве $\text{Fe}_z\text{B}_{100-z}$ при разной температуре

АМО́РФНЫЙ СПЛАВ ЖЕЛÉЗО-БОР — аморфный сплав, который широко используется для научных исследований, однако в промышленных масштабах не производится. Удельная намагниченность насыщения σ_s достигает максимального значения в сплаве $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ (рис. А11). При нормальной температуре в сплавах с повышенным содержанием железа намагниченность σ_s снижается, что можно связать с соответствующим понижением точки Кюри T_C (рис. А12). При содержании железа менее 83 ат. % наблюдается один пик кристаллизации T_x , связанный с кристаллизацией из аморфного состояния. Появление второго пика при большем содер-

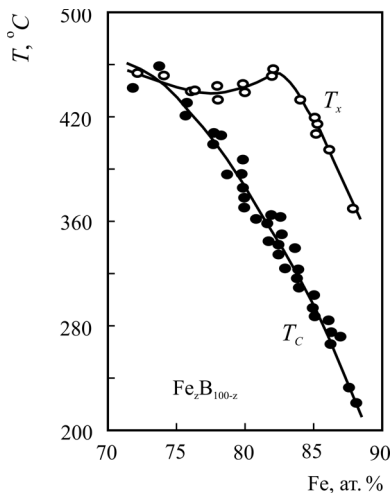


Рис. А12. Зависимости точки Кюри T_C и температуры кристаллизации T_x от содержания железа в аморфном сплаве $\text{Fe}_z\text{B}_{100-z}$

жании железа (не показано) вызвано превращениями в кристаллическом состоянии. При оптимальном химическом составе в А.с. после термической обработки можно получить коэрцитивную силу до 2 А/м.

Лит.: Люборский Ф.Е., Либман Х.Х., Беккер Дж.Дж., Уолтер Дж.Л. Магнитные свойства аморфных сплавов Fe-B// Быстрозакаленные металлы/Под ред. Б. Кантора. — М.: Металлургия, 1983, с. 332—337.

АМО́РФНЫЙ СПЛАВ ЖЕЛЕ́ЗО-КОБАЛТЫ́-БОР-КРЕ́МНИЙ — аморфный сплав $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{18}\text{B}_{14}\text{Si}_1$ с наибольшей магнитной индукцией насыщения $B_s = 1,8$ Тл. А.с. наиболее эффективно использовать при высокой магнитной индукции до 1,6 Тл и частоте до 10 кГц. Высокая прямоугольность петли магнитного гистерезиса после отжига в продольном магнитном поле позволяет использовать А.с. в импульсных силовых устройствах. А.с. разработан в компании «Аллайд Кэмикэл» (Датта, Декристофаро, 1980) и производится под торговой маркой Метглас 2605CO.

Лит.: Datta A., Smith C.H. Fe-Co-B-Si amorphous alloy with maximum saturation induction// Rapidly quenched metals. Ed. by S. Steeb, H. Warlimont. Amsterdam: Elsevier Science, 1985, p. 1315—1318.

АМПЕ́Р [Аmpère имя французского физика] — единица силы электрического тока, магнитного потенциала и магнитодвижущей силы в системе СИ. А. относится к основным единицам системы СИ, а его размерность обозначается символом *I*. Определение единицы силы тока основано на законе Ампера: А. равен силе не изменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н. Такое определение А. принято в 1946 г. Для термина «А.» принято наименование «ампер» и обозначение «А». Впервые единица под названием «А.» введена в 1881 г.

АМПЕ́Р-ВИТО́К, ампер-виток — единица магнитодвижущей силы и разности магнитных потенциалов (Ав), которая официально не узаконена и в настоящее время считается устаревшей.

АМПЕ́РОВСКАЯ МАГНИТОСТА́ТИКА — магнитостатика, в основу которой положена гипотеза Ампера о молекулярных токах в качестве источников магнитного поля. В А.м. используют следующие определения и соотношения: плотность молекулярных токов $\mathbf{J}_m = \text{rot} \mathbf{M}$; намагниченность, равная отношению магнитного момента элементарных токов $\mathbf{p}_m = i\mathbf{S}$ в физически бесконечно малом объеме тела

к этому объему $\mathbf{M} = \frac{\sum \mathbf{p}_m}{\Delta V}$; магнитный

векторный потенциал молекулярных токов $\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'} \frac{\text{rot} \mathbf{M}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV'$; магнитная

индукция $\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A}$, из которого следует $\text{div} \mathbf{B} = 0$, т. е. векторное поле магнитной индукции не имеет источников и стоков; из условия калибровки $\text{div} \mathbf{A} = 0$ следует $\text{rot} \mathbf{B} = -\Delta \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{J}_m = \mu_0 \text{rot} \mathbf{M}$ или $\text{rot} \mathbf{H} = 0$ после введения напряженности магнитного поля $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{M} = \mathbf{B}/\mu_0$.

АМПЛИТУ́ДА [лат. amplitudo величина] — наибольшее отклонение периодически изменяющейся физической величины от нулевого значения.

АНАЛИТИ́ЧЕСКИЙ [гр. analytikos] — относящийся к анализу, основанный на применении анализа, служащий для анализа. Функция задана аналитически, если величины связаны между собой уравнениями.

АНАЛИТИ́ЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕ́НИЕ, формула — выражение, определяющее совокупность действий, которые необходимо проделать в определенном порядке над значением аргумента и константами, чтобы получить значение функции.

АНА́ЛОГОВЫЙ СИГНА́Л [гр. analogos соответственный, соразмерный] — сигнал данных, у которого каждый из параметров описывается функцией времени и не-

прерывным множеством возможных значений. А.с. — непрерывный, неделимый на отдельные части.

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛА — преобразование сигнала данных, при котором для заданного шага дискретизации функция непрерывного множества возможных значений сигнала заменяется функцией конечного множества соответствующих значений этого сигнала.

АНГСТРЕМ [Ångström фамилия шведского физика] — внесистемная единица длины, $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$, предложенная Ангстремом (1868).

АНИЗОТРОПИЯ [гр. anisos неравный и tropos свойство] — неодинаковость физических свойств тела вдоль различных направлений внутри этого тела. Понятие А. противоположно понятию изотропия.

АНИЗОТРОПИЯ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ — зависимость магнитных потерь от направления перемагничивания. А.м. сильно проявляется в анизотропных магнитных материалах. На рис. А13 показана зависимость нормализованных удельных магнитных потерь P/B_m в анизотроп-

ной электротехнической стали на частоте 50 Гц от максимальной магнитной индукции B_m , полученная на эшштейновских образцах размером $280 \times 30 \times 0,3 \text{ мм}$, вырезанных под разными углом α_p к направлению прокатки. Отношение магнитных потерь, измеренных под углами 90 и 0°, равно или больше четырех. На характер А.м. сильное влияние оказывает ширина полос, на которых проводят магнитные измерения. В узких полосах уже при небольших углах α_p в процессе перемагничивания вблизи боковых граней формируется замыкающая доменная структура с намагниченностью вдоль поперечных осей [100] и [010]. Ее формирование минимизирует магнитостатическую энергию тела, однако при этом растут магнитные потери на гистерезис. В широких образцах краевое влияние на процесс перемагничивания заметно ослабляется, а в предельном случае вообще отсутствует. Это подтверждает рис. А14, на котором представлена анизотропия относительных магнитных потерь P_α/P_0 (P_α — магнитные потери под углом α_p к оси [001], P_0 — магнитные потери вдоль оси [001]) в монокристаллах. Величина β — угол между осью легчайшего намагничивания

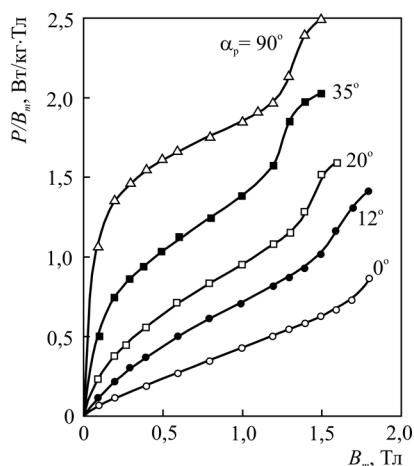


Рис. А13. Зависимости нормализованных удельных магнитных потерь P/B_m в полосках анизотропной электротехнической стали, вырезанных под углом α_p к направлению прокатки, от максимальной магнитной индукции B_m

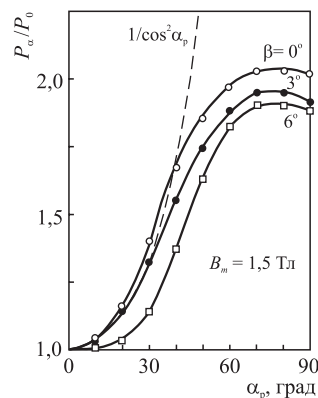


Рис. А14. Зависимости относительных магнитных потерь P_α/P_0 от угла α_p в монокристаллах Fe-3Si: P_α — удельные магнитные потери под углом α_p к оси [001], P_0 — удельные магнитные потери вдоль оси [001], β — угол между осью легчайшего намагничивания [001] и поверхностью пластины. Штриховой линией показана зависимость $1/\cos^2 \alpha_p$

ния [001] и поверхностью пластины. Измерения проводили с помощью устройства, размеры которого заметно меньше самого монокристалла. Видно, что магнитные потери пропорциональны величине $1/\cos^2 \alpha_p$ для углов менее 40° . Это подтверждает, что здесь в процессе перемагничивания участвуют только 180° доменные границы основной доменной структуры.

АНИЗОТРОПИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ электротехнической стали — магнитные свойства анизотропной электротехнической стали вдоль различных направлений относительно направления прокатки. На рис. А15 представлены основные кривые намагничивания, полученные на эшштейновских образцах размером $280 \times 30 \times 0,30$ мм, вырезанных из высокопроницаемой анизотропной электротехнической стали ($B_{800} = 1,85$ Тл) под разными углами к направлению прокатки α . Электротехническая сталь обладает достаточно высокой константой кристаллографической магнитной анизотропии, поэтому в указанной области напряженности магнитного поля намагниченность во всех доменах не отклоняется от осей легкого намагничивания. Это ось [001], ориентиро-

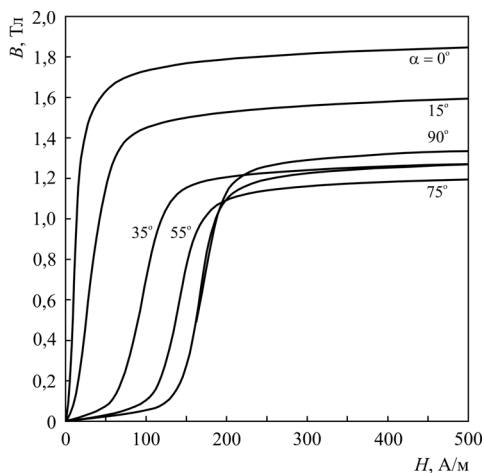


Рис. А15. Основные кривые намагничивания высокопроницаемой анизотропной электротехнической стали ($B_{800} = 1,85$ Тл) под разными углами к направлению прокатки α

ванная приблизительно в направлении прокатки, и две поперечные оси [100] и [010], ориентированные приблизительно под углом 45° к поверхности. Процесс намагничивания осуществляется за счет смещения доменных границ или перераспределения магнитных фаз вдоль трех осей легкого намагничивания. В образце, вырезанном вдоль направление прокатки, преобладает смещение 180° доменных границ. Снижение кривых намагничивания в образцах, вырезанных под углом, связано с процессом формирования замыкающих доменов, имеющих намагниченность вдоль [100] и [010]. С увеличением угла α петля магнитного гистерезиса приобретает перетянутый вид (рис. А16). Появление перетяжки связано с задержкой смещения 180° доменных границ и формированием в этом интервале полей фронта замыкающих доменов. При измерении А.м. в пакете полос необходимо учитывать способ укладки. Данные, приведенные на графиках, соответствуют согласованной укладке, при которой направления прокатки отдельных полос параллельны между собой. При несогласованной укладке направления прокатки отдельных полос пересекаются, если угол α не равен 0 или 90° .

Лит.: Жаков С.В., Филиппов Б.Н., Драгошанский Ю.Н. Доменная структура и процессы на-

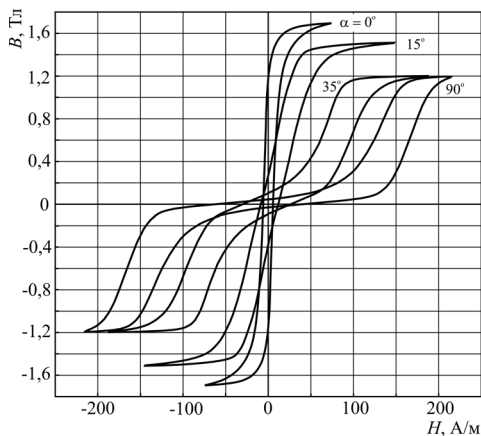


Рис. А16. Статические петли магнитного гистерезиса высокопроницаемой анизотропной электротехнической стали ($B_{800} = 1,85$ Тл) под разными углами к направлению прокатки α