

Светлой памяти
МИШИНА Дмитрия Дмитриевича посвящая

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка новых материалов, необходимых для решения различных электротехнических задач, совершенствование уже известных материалов с целью получения более высоких эксплуатационных характеристик электротехнических изделий являются важнейшими направлениями, определяющими развитие электротехники и электротехнической промышленности.

Магнитные материалы широко применяются в различных классах электротехнических изделий. Электромеханические характеристики этих материалов в значительной мере определяют эксплуатационные качества изделий, их механическую и электрическую износостойкость, надежность, рабочую температуру и т. д.

Современные методы формирования элементов изделий из магнитных материалов включают методы порошковой металлургии, которые применяются в основном для получения элементов конструкционных деталей, несущих механические нагрузки. В связи с использованием этих методов для изготовления рабочих элементов электротехнических конструкций (сердечников, роторов, статоров, магнитопроводов, магнитных шунтов и т. п.) потребовалось проведение комплекса физических и технологических исследований по получению магнитных материалов с повышенными магнитными характеристиками.

В народном хозяйстве накопился большой резерв экономического и технического потенциала, так как энергетические и другие ресурсы все еще используются недостаточно эффективно. Электротехнические изделия часто проекти-

руются без расчета размеров магнитных систем, рациональное использование электрической энергии не предусматривается, при этом велики отходы электротехнической стали и непроизводительный расход обмоточной меди, магнитные характеристики реальных изделий не учитываются.

Созданию новых материалов, инновационных технологий получения магнитных материалов, разработке современных изделий и посвящена настоящая работа. Как показали проведенные исследования, снижение трудоемкости операций при изготовлении магнитных элементов, сокращение себестоимости изделий, экономия магнитных материалов, высвобождение прокатного, штамповочного, металлорежущего станочного оборудования, широко используемого в современной технологии производства элементов магнитных цепей, — все эти задачи имеют практические решения.

Изделия, изготовленные по новому методу порошковой металлургии, найдут широкое применение во многих отраслях промышленности. Особое значение в наших условиях имеет организация исследования технологий магнитных материалов, налаживание инновационных процессов разработки и производства новых конструкций изделий.

Актуальность работы обусловлена следующими проблемами:

- требуется создание новых магнитных материалов, которые будут лучше существующих по своим свойствам (коэрцитивной силе, максимальной магнитной проницаемости, удельным потерям);
- необходимо развивать теоретические положения взаимодействия доменных границ со структурными дефектами, влияющими на магнитные свойства;
- эмпирические данные по специфике создания магнитных материалов методом порошковой металлургии в настоящее время отсутствуют.

Предлагаемая читателю работа восполняет некоторые пробелы, имеющие место в данной отрасли науки и техники.

Ввиду качественной перестройки высшей школы и задач повышения квалификации выпускаемых университетами специалистов изучение физической теории необ-

ходимо сочетать с практическим освоением технологии производства магнитных материалов.

Особое внимание в книге уделено физической сущности явлений, имеющих место в электротехнических материалах при их взаимодействии с электромагнитным полем; магнитным параметрам, характеризующим свойства электротехнических материалов; закономерностям, определяющим зависимость магнитных параметров от взаимодействия дислокационной и доменной структур.

В электротехнической и авиационной промышленности, приборостроении, радиопромышленности и других машиностроительных отраслях магнитомягкие материалы нашли широкое применение. В последние два-три десятилетия появились новые прогрессивные технологии получения и обработки электротехнических материалов, что повлекло за собой новый качественный скачок в исследовании магнитных материалов и возможность на их основе разработать новые виды электротехнических изделий.

Автор выражает глубокую благодарность действительному члену Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова, доктору физико-математических наук, профессору кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов и автоматизированных комплексов Московского энергетического института (технического университета) Е. Ф. Кустову за помощь в процессе работы над книгой, критические замечания и рекомендации.

Несомненную пользу в работе над книгой оказали автору советы и замечания доктора технических наук, профессора Р. И. Малининой (кафедра физического материаловедения Московского института стали и сплавов).

Особенно признателен автор доктору технических наук, профессору Н. Г. Колбасникову (кафедра пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета) за научную и дружескую поддержку.

Все замечания по книге следует направлять по адресу: 192029, Санкт-Петербург, Общественный переулок, 5, ООО Издательство «Лань».

И. А. Тимофеев

1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАЗРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МАГНИТОПРОВОДОВ

1.1. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СПЛАВА КРЕМНИЯ С ЖЕЛЕЗОМ

Исследованию процессов изготовления деталей методом порошковой металлургии, являющимся одним из новых прогрессивных технологий, посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых и специалистов-практиков. Вопросы теории и технологии, связанные с формообразованием и спеканием порошковых и гранулированных материалов, рассматриваются в работах Г. И. Аксенова, А. Б. Альтмана, Р. А. Андриевского, В. А. Анциферова, М. Ю. Бальшина, С. В. Белова, Б. А. Борок, Г. А. Виноградова, П. А. Витязя, Я. Е. Гегузина, Ю. Г. Дорофеева, С. С. Ермакова, В. Н. Еременко, Г. М. Ждановича, В. А. Ивенсена, В. П. Каташинского, О. А. Катруса, С. С. Кипарисова, М. С. Ковальченко, А. Г. Косторнова, Г. С. Креймера, Ю. В. Левинского, Г. А. Либенсона, Е. Б. Ложечникова, Н. В. Манукяна, Г. А. Меерсона, Н. Н. Павлова, В. Е. Перельмана, Я. Б. Пинеса, И. Д. Радомысльского, В. С. Раковского, А. И. Рудского, О. В. Романа, Г. В. Самсонова, В. М. Сегала, В. В. Скорохода, А. В. Степаненко, И. М. Федорченко, И. Н. Францевича, Айзенкольба, Джеймса, Джонса, Кучинского, Ленеля, Ояне, Ристича, Хауснера и др.

В значительной мере теоретические положения физики и металловедения, электрических машин и аппаратов базируются на результатах работ современных отечественных и зарубежных ученых, в число которых вошли Г. Н. Алек-

сандров, П. А. Арсеньев, В. Г. Баженов, А. М. Балбашов, О. А. Банных, К. А. Боярчук, Г. А. Бугаев, Б. К. Буль, А. М. Глезер, Ю. Н. Драгошанский, Ю. В. Зайцев, Ю. М. Иньков, А. В. Иванов-Смоленский, Г. С. Кандаурова, Н. Г. Колбасников, И. П. Копылов, В. М. Кондратов, В. Д. Кочетков, В. А. Кузнецов, П. А. Курбатов, И. О. Леушин, А. С. Лилеев, М. А. Любчик, Л. А. Макриденко, Р. И. Малинина, В. М. Матюнин, Б. М. Могутнов, В. А. Нестерин, А. Г. Никитенко, Н. И. Носкова, Ю. А. Осипьян, А. Г. Пастушенков, И. И. Пеккер, Ю. К. Розанов, С. В. Серебрянников, Г. П. Станулевич, В. М. Строев, В. П. Чепарин, В. А. Жаринов, Е. Н. Шефтель, В. Н. Шоффа, Д. Браун, Р. С. Теббль, Т. Нозава, Т. Ямамото и др.

Труды этих ученых и специалистов в основном определили направление и характер теоретических и практических разработок, выполненных в настоящей книге.

Диаграмма состояния характеризует взаимодействие химических веществ в условиях равновесия, кристаллическую структуру веществ и природу химической связи. Известно, что магнитные свойства магнетиков в значительной степени определяются кристаллической структурой сплавов и соединений. Исследование диаграммы фазового равновесия проведено в ряде работ [52; 88; 94; 107]. Кривая температуры плавления железокремнистых сплавов при повышении содержания кремния (Si) сначала снижается, затем возрастает. Железокремнистые сплавы магнитны при содержании Si до 33% (см. рис. 1.1).

Сплавы, содержащие до 15% Si, представляют собой твердый раствор кремния в α -железе (Fe). При 25% (атомных) в сплаве происходит полное упорядочение с образованием сверхструктуры Fe_3Si . При температуре выше 1103 К появляются α^1 -, α^{11} - и η -фазы. Последняя тождественна соединению Fe_5Si_3 (23% Si) и стабильна только в интервале температур 1098...1303 К. Фазе α^{11} , как полагают, соответствует формула $\text{Fe}_{11}\text{Si}_5$.

Сплавы, содержащие 15...33% Si, имеют две точки Кюри: первую (363...393 К) и вторую (723...813 К). Нижняя точка Кюри приписывается сплавам с небольшим количеством η -фазы, присутствующей в неравновесном

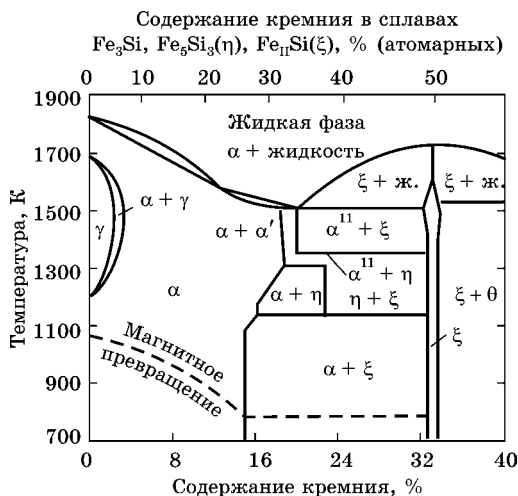


Рис. 1.1

Диаграмма фазового равновесия железокремнистых сплавов

состоянии. Фаза ϵ немагнитна. У чистых сплавов, содержащих более 2,5% Si, в области твердых растворов отсутствует γ -фаза. Однако присутствие нескольких сотых процента углерода может расширить $\alpha + \gamma$ -область и сдвинуть границу между $\alpha + \gamma$ - и α -областями к 5% Si. Поэтому в наиболее часто применяемых в промышленности сплавах, которые содержат до 5% Si, лишь незначительная часть кристаллитов превращается в γ -фазу при температурах выше 1073 К. По этой причине обычный отжиг проводится ниже данной температуры. При наличии 0,1% углерода граница $\alpha + \gamma$ -области распространяется до 7...8% Si.

1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛИТКОВОГО СПЛАВА КРЕМНИЯ С ЖЕЛЕЗОМ

Изучение железокремнистых сплавов, начатое Хадфилдом [226], выявило ряд их интересных свойств. В 1882 г. Хадфилд обратил внимание на твердость случайно полученного сплава, содержащего свыше 1,5% Si. Затем появились сообщения других авторов, в том числе Баррета, Гумлиха, Иенсена, о магнитных свойствах этих спла-

вов [204; 224; 227]. В дальнейшем свойства железокремнистых сплавов изучались многими исследователями на монокристаллических и поликристаллических образцах, полученных методом порошковой металлургии. В таблице 1.1 показаны значения магнитных характеристик, полученных на железокремнистом сплаве.

Результаты, полученные в лабораторных условиях, показывают, что кремнистое железо с содержанием 6,3... 6,5%

Таблица 1.1

**Магнитные свойства лабораторных образцов
железокремнистых сплавов**

Исследователь	Год	Si, %	Магнитная проницаемость μ , Гн/м	Потери при магнитной индукции $B = 1 \text{ Т}$, Вт/кг	Примечание
Баррет и др.	1902	2,9	45	26,9	—
Гумлих	1909	3,9	61	18,6	—
Иенсен	1915	3,4	630	7,2	—
Чиоффи	1932	4,0	160	12,7	Магнитная постоянная $\mu_0 = 40 \text{ Гн/м}$
Рудер	1934	4,2	—	10,5	Монокристалл
Госс	1934	3,0	180	9,8	$\mu = 80 \text{ Гн/м}$ при 5...1,6 Т
Иенсен	1936	3,0	830	8,6	
Вильямс	1937	3,8	14 000	17,4	Монокристалл
Вутби	1942	6,3	5000	6,75	Термомагнитная обработка
Гоертс	1951	6,5	38 000	11,80	Монокристалл
Для сравнения: электро-техническая сталь	1950	3,0	500	3,75	Текстурованная

Si является перспективным магнитомягким материалом с повышенной проницаемостью и малыми потерями на перемагничивание. Сплав железа с кремнием представляет собой твердый раствор замещения. Эффективный диаметр атомов кремния меньше диаметра атомов железа, поэтому постоянная решетки с увеличением содержания кремния уменьшается. При содержании 5% Si начинается упорядочение сплава. Полное упорядочение может быть достигнуто при содержании в железокремнистом сплаве 14,35% Si. Снижение плотности сплава (кг/м^3) в зависимости от содержания кремния можно вычислить по формуле Гумлиха [224]:

$$\gamma = (7,8740 - 0,0622p) \cdot 10^3, \quad (1.1)$$

где p — содержание кремния, % (по массе).

Легирование железа с кремнием приводит к увеличению удельного электрического сопротивления сплава. Зависимость удельного электрического сопротивления от процентного содержания кремния определяется следующим соотношением:

$$\rho = (0,10 + 0,12/7) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (1.2)$$

Отрицательное действие кремния на магнитные свойства сводится к снижению магнитной индукции насыщения. По данным Меськина [84], магнитная индукция насыщения снижается на 0,048 Т на каждый процент кремния:

$$B_{\text{max}} = (2,160 - 0,048p). \quad (1.3)$$

Такое изменение наблюдается при содержании кремния до 14%. При дальнейшем увеличении доли кремния индукция насыщения уменьшается, а при 33% ферромагнитные свойства сплава исчезают.

Температура Кюри, как и индукция насыщения, с увеличением доли кремния, по данным Фаллота [216], снижается. До содержания 6,5% кремния она снижается с 1053 до 983 К.

Карр [211] исследовал зависимость констант магнитоstriction λ_{100} , λ_{111} от содержания кремния (табл. 1.2).

Т а б л и ц а 1.2

**Зависимость констант магнитострикции
от содержания кремния**

Константа магнито- стрикции	Содержание кремния, % (по массе)						
	1,5	3,0	4,0	5,0	6,0	6,5	7,0
λ_{100}	$27 \cdot 10$	$26 \cdot 10$	$22 \cdot 10$	$17 \cdot 10$	$2 \cdot 10$	0	$-5 \cdot 10$
λ_{111}	$-7 \cdot 10$	$-5 \cdot 10$	$-2 \cdot 10$	0	$2 \cdot 10$	$3 \cdot 10$	$3,5 \cdot 1$

При тех же изменениях содержания кремния постоянная магнитной анизотропии K_n , по данным Тарасова [245], уменьшается почти линейно с $42,5 \cdot 10^3$ до $16 \cdot 10^3$ Дж/м³. Учитывая, что постоянная магнитной анизотропии неуклонно падает, а коэрцитивная сила связана определенным соотношением с постоянной анизотропии ($H_c \approx K_n$), можно объяснить наблюдаемое снижение коэрцитивной силы с увеличением доли кремния.

При содержании Si, равном 6,5%, имеет место наибольшее значение магнитной проницаемости, что обусловлено двумя причинами: близким к нулю значением магнитострикции и малым значением постоянной анизотропии.

1.3. СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ЖЕЛЕЗНОГО ПОРОШКА

Для магнитопроводов применение технологии порошковой металлургии обусловлено главным образом экономическими соображениями. Изготовление из порошков магнитопроводящих деталей, особенно сложной формы (полюсных наконечников, шунтов, экранов и т. п.), более рентабельно по сравнению с обычными способами производства (литьем, штампованием, резанием). Например, по данным, приведенным в работе [154], затраты на производство магнитопроводов штампованием обходятся в 2 и более раз дороже, чем на изготовление способом спекания (см. табл. 1.3).

Изделия из штампованного железного порошка (спеченного железа) имеют сравнительно малую максимальную магнитную проницаемость ($13,8 \dots 31$ Гн/м) и большую коэрцитивную силу ($126,4 \dots 244,9$ А/м) [7]. Кроме того, спеченное железо, изготовленное из разных исходных порошков, имеет большой разброс по магнитным свойствам (см. табл. 1.4).

Т а б л и ц а 1.3

**Сравнительные технико-экономические
показатели производства 1 т изделий
из железного порошка и электротехнической стали**

Показатель	Методы изготовления деталей	
	Механическая обработка	Порошковая металлургия
Удельные сопряженные капитальные вложения, тыс. руб.	3,1	2,0
Материалоемкость, т	2,3	1,05
Себестоимость, тыс. руб.	2,3	0,9
Коэффициент использования материала	0,3...0,5	0,95
Число переходов (технологических операций), шт.	30...40	4...6
Экономия литых металлов, т	—	1,5
Выработка на одного рабочего, т	2,5	5,0
Высвобождение рабочих, чел.	—	0,19
Высвобождение металлорежущих станков, шт.	—	0,08
Срок службы изделий, год	1,0	1,5...10
Экономическая эффективность, тыс. руб.	—	1,0...4,2

Т а б л и ц а 1.4

**Магнитные свойства материалов,
спеченных из разных исходных порошков***

Железный порошок	Плотность изделия, кг/м ³	Максимальная магнитная проницаемость μ_{max} , Гн/м	Напряженность H , А/м, при индукции $B = 1$ Тл	B , Тл, при $H = 3160$ А/м	Остаточная индукция B_r после намагничивания до 1 Тл	Коэрцитивная сила H_c после намагничивания до $B = 1$ Тл
Электролитический	6820	31	308,1	1,27	0,93	126,4
Обезуглероженная измельченная стальная дробь	6690	21,5	1106	1,1	0,9	158

Продолжение табл. 1.4

Железный порошок	Плотность изделия, кг/м ³	Максимальная магнитная проницаемость μ_{\max} , Гн/м	Напряженность H , А/м, при индукции $B = 1$ Тл	B , Тл, при $H = 3160$ А/м	Остаточная индукция B_r после намагничивания до 1 Тл	Коэрцитивная сила H_c после намагничивания до $B = 1$ Тл
Восстановленная в водороде измельченная окалина	6200	13,4	2370	1,03	0,85	244,9
Восстановленный в водороде оксид железа из скрапа	6010	13,8	3160	1	0,83	229,1
Малокремнистое железо (полюсное)	7850	60	158	1,56	0,9	59,25
Для сравнения Ст. 10	7850	13	395	1,62	0,65	158

Примечание. * Lenel, F. Metals Technology. — 1945. — 1 TP, 1788. — P. 13–19.

Таблица 1.5

Магнитные свойства образцов из спеченного железного порошка (после однократного прессования и спекания)*

Железный порошок	Магнитная постоянная μ_0 , Гн/м	μ_{\max} , Гн/м	B , Тл, при H , А/м					А/м	B_r , Тл	Плотность, кг/м ³
			7,9	79	790	7900	11 850			
Карбонильный*	20	240	0,0805	1,28	1,52	1,75	1,83	11,14	0,62	7895**
Электролитический**	4,5	154	0,01	1,23	1,54	1,77	1,84	23,7	0,9	7850

Примечания. * Содержание: 0,0026% С; 0,0028% O₂; остальное Fe.

** Содержание: 0,0051% С; 0,015% O₂; остальное Fe.

В той же работе показано, что значительно более высокие свойства удается получить при спекании магнитомягких материалов из особо чистых металлических порошков при высоких температурах и длительной выдержке (железного порошка с содержанием 99,96% Fe, никелевого — 99,92% Ni и т. п. при температуре спекания 1573 К с выдержкой до 24 ч) [7]. При этих условиях можно получить магнитные материалы с высокой плотностью и хорошими магнитными свойствами (см. табл. 1.5).

Для увеличения плотности магнитомягкого материала на основе железа была проведена работа по получению железного порошка с присадкой фосфора [199]. Легирование железа фосфором рассматривается обычно как средство интенсификации процесса спекания, позволяющее несколько снизить электрические потери и повысить электрическое сопротивление. Для этого использовался водный раствор диаммония фосфата $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, при разложении которого в процессе термической обработки порошка образуется фосфор. Образцы, изготовленные с содержанием фосфора 0,1...1,5% при давлении прессования 800 МПа и кратковременно спеченные при температуре 1423 К в водороде, уплотняются до 6950 кг/м³ (табл. 1.6).

Присадка фосфора к кремнистому железу с 4,5% Si увеличивает магнитную индукцию на 5...8% при снижении потерь на 8...10% [120; 154]. На магнитные свойства

Таблица 1.6

Свойства образцов, спеченных из железofосфорного материала

Содержание фосфора, %	μ_{max} , Гн/м	H_c , А/м	B , Т при $H = 10$ А/м	Плотность, кг/м ³
0,1	17	197,5	1,00	5500
0,2	18	197,5	1,00	6500
0,3	20	158,0	1,00	6600
0,4	22	142,2	1,00	6600
0,6	26	118,5	1,20	6800
0,8	33,5	118,5	1,35	6800
1,0	36	118,5	1,40	6900
1,5	16	173,8	1,05	6950

железофосфорных материалов влияет не только режим прессования и спекания, но и состав исходных порошков, состав защитной среды спекания и т. д. Свойства изделий, спеченных в водороде при температуре 1173 К за 2 ч и вторично при 1523 К в течение 4 ч, значительно выше, чем спеченных при температуре 1443 К за время 4 ч в конвертированном газе [178]. Следовательно, использование чистых порошков и сильных восстановительных сред позволяет повысить свойства железофосфорных сплавов.

1.4. СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАГНИТОМЯГКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВА КРЕМНИЯ С ЖЕЛЕЗОМ

Введение кремния повышает удельное электрическое сопротивление сталей и тем самым понижает вихревые токи пропорционально росту удельного электрического сопротивления. Применение магнитопроводов из спеченных цельнопрессованных материалов в устройствах переменного тока затруднено из-за больших удельных потерь в них по сравнению с пакетированными магнитопроводами из электротехнической стали, так как потери на вихревые токи растут пропорционально квадрату толщины листа. Попытки получить магнитопроводы из порошковых железокремнистых материалов с плоскими диэлектрическими прослойками пока не увенчались успехом [172].

Повышение доли кремния увеличивает хрупкость материала (листы с содержанием 2% Si допускают 10 перегибов на 180°, а материал с 4,5% Si разрушается уже после первого перегиба), поэтому сплавы с 6,3...6,5% Si не нашли широкого применения в технике. Ввиду малой технологичности листового кремнистого железа с практической точки зрения представляют интерес данные о свойствах спеченных магнитомягких материалов из кремнистого железа.

В таблице 1.7 указаны характеристики лабораторных образцов из спеченных магнитомягких материалов [138; 139; 140; 141; 199]. Для сравнения в таблице также приведены характеристики электротехнической кремнистой

Таблица 1.7

Свойства спеченных магнитомягких материалов

Материал	Магнитное поле	Магнитная индукция Тл, при напряженности, А/м						Удельные потери, Вт/кг	
		80	160	400	800	1200	1600	при $B = 0,5 \text{ Т,}$ $f = 50 \text{ Гц}$	при $B = 1 \text{ Т,}$ $f = 50 \text{ Гц}$
Fe=	=	0,2	0,71	1,16	1,32	1,38	1,43	—	—
Fe~	~	0,03	0,11	0,37	0,64	0,81	0,93	5	21
Fe + + 6,5% Si	=	0,42	0,83	1,05	1,16	1,18	1,21	—	—
Fe + + 6,5% Si	~	0,23	0,48	0,83	1,10	1,17	1,2	1,7	9,5
Fe + 6,5% Si + + 0,06% B	=	0,96	1,04	1,12	1,18	1,2	—	—	—
Fe + 6,5% Si + + 0,06% B	~	0,36	0,59	0,91	1,17	1,22	—	1,2	8,6
Fe + 6,5% Si + + 0,06% B	=	1	1,05	1,11	1,17	1,19	1,21	—	—
После ТМО Fe + 6,5% Si + + 0,06% B	=	0,38	0,59	0,89	1,15	1,18	1,19	1	9,5
	~								
После ТМО Fe + 6,5% Si (жидкофаз- ное спекание)	=	0,87	0,96	1,32	1,51	1,54	1,56	—	—
Fe + 6,5% Si	=	0,29	0,6	1,03	1,12	1,17	1,22	1,2	6,5
	~								
Э11	=	0,30	0,94	1,1	1,31	1,38	1,41	2,1	5,8
	~								
Э330	=	1,08	1,15	1,53	1,70	1,75	1,8	0,33	0,96
	~								

Примечание. = — постоянное магнитное поле; ~ — переменное магнитное поле (50 Гц).

стали по ГОСТ 21427.1-83. Видно, что свойства образцов из спеченных магнитомягких материалов по ряду параметров хуже, чем у образцов из электротехнической стали с 1...4% Si. Однако если характеристики электротех-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru