

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОМ ССР  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

В. А. Десненко, Н. М. Недосека, В. И. Печерская,  
В. Я. Платков, Е. Л. Фертман

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
МАГНИТОМЯГКИХ СПЛАВОВ

Препринт 32-90

Харьков 1990

ДЕСНЕНКО Владимир Алексеевич  
НЕДОСЕКА Николай Михайлович  
ПЕЧЕРСКАЯ Валентина Ивановна  
ПЛАТКОВ Валерий Яковлевич  
ФЕРТМАН Елена Леонидовна

Ответственный за выпуск Васильченко Н. С.

---

Подписан к печати 21.11.90.

Физ. п. л. 3,6

Уч.-изд. л. 0,6.

Заказ 263.

Тираж 100 экз. Цена 5 к.

---

Ротапринт ФТИНТ АН УССР, Харьков - 164, просп. Ленина, 47

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
МАГНИТОМЯГКИХ СПЛАВОВ

Впервые исследованы магнитные свойства электротехнических магнитомягких сплавов различных классов в интервале температур 5–300 К. При снижении температуры магнитные характеристики в области полей технического намагничивания ухудшаются, а именно: увеличивается коэрцитивная сила, уменьшаются индукция и магнитная проницаемость; в области парапроцесса индукция увеличивается. Наибольшая чувствительность к температуре выявлена у пермаллоя 79НМ.

Препринт Физико-технического института низких температур АН УССР, Харьков, 1990, № 32

V.A.Desnenco, N.M.Nedoseka, V.I.Pecharskaya, V.Ya.Platkov, E.L.Fertman

LOW TEMPERATURE MAGNETIC PROPERTIES OF THE ELECTROTECHNICAL  
SOFT MAGNETIC ALLOYS

For the first time magnetic properties of the electro-technical soft magnetic alloys of different classes were studied in the temperature range 5 to 300 K. As temperature decreases the magnetic characteristics decrease in the range of technical magnetization fields namely: the coercive force increases, the induction and permeability decrease; the induction increases in the range of paraprocess. The permalloy 79NM was found to have the the greatest temperature sensitivity.

The preprint of the Institute for Low Temperature Physics & Engineering  
UkrSSR Academy of Sciences,  
Kharkov, 1990, N 32

Развитие криогенной энергетики и приборостроения требует разработки новых или использования уже известных магнитомягких материалов при низких температурах. Для выяснения возможности применения таких материалов в электротехнических устройствах, охлаждаемых до азотных и гелиевых температур, необходимы данные об их магнитных свойствах в этих условиях. Однако в настоящее время такие данные отсутствуют. В связи с этим целью настоящей работы явилось исследование в интервале температур 5-300 К важных параметров магнитомягких сплавов: индукции  $B$  в магнитных полях разной напряженности  $H$ , коэрцитивной силы  $H_c$ , начальной  $\mu$  и максимальной  $\mu_{max}$  магнитной проницаемости.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучены различные магнитомягкие материалы, охватывающие широкий диапазон значений магнитных характеристик  $[I]$ :

1) сплав 79НМ – пермаллой, характеризующийся наивысшей магнитной проницаемостью в малых полях;

2) сплав 49КФ – железо-кобальтовый сплав с высокой магнитной индукцией технического насыщения  $B_s$ ;

3) сплав I6X – высокохромистый сплав на основе железа с высокой коррозионной стойкостью;

4) сталь I0895 – нелегированная электротехническая сталь.

Два последних сплава обладают промежуточными по сравнению со сплавами 79НМ и 49КФ значениями  $B_s$  и  $H_c$ .

Образцы имели вид колец или пакета, набранного из нескольких колец, в зависимости от толщины листов проката. Внешний диаметр образцов составлял  $3 \cdot 10^{-2}$  м, внутренний –  $2 \cdot 10^{-2}$  м; толщина составляла  $8 \cdot 10^{-3}$  м для образцов сплавов 49КФ, I6X, I0895 и  $0,35 \cdot 10^{-3}$  м,

$0,5 \cdot 10^{-3}$  м для сплава 79НМ. Образцы прошли предварительную термообработку – высокотемпературный отжиг с замедленным охлаждением в соответствии с ГОСТ 3836-83 и ГОСТ 10160-75.

Статические магнитные характеристики сплавов определены в соответствии с ГОСТ 8.377-80 с использованием импульсно-индукционной методики, согласно которой магнитное поле изменяли скачкообразно по заданной программе, а приращения магнитного потока фиксировали микроверберметром Ф5050. Фиксированные значения температуры получали в криостате с помощью специального устройства. Его основой является измерительная ячейка для образца, состоящая из двух пустотелых свинчивающихся полуцилиндров, каждый из которых жестко соединен с соответствующим медным стержнем. На верхнем стержне – теплопроводе намотана нагревательная спираль, с помощью которой можно создавать тепловой поток к ячейке. Нижний стержень – хладопровод – свинчивается в медную герметически закрытую снизу трубу. Ее назначение – препятствовать попаданию криогенной жидкости к ячейке и поддерживать нижний конец хладопровода при постоянной температуре среды хладагента. Благодаря хладопроводу возникает стационарный отток тепла от измерительной ячейки. Изменяя мощность теплового потока пропусканием тока через нагревательную спираль от регулируемого источника тока, можно получать в ячейке любую фиксированную температуру в диапазоне 5-78 К, если устройство помещено в криостат с жидким гелием, и в диапазоне 78-300 К, если оно расположено в криостате с жидким азотом.

Погрешность поддержания температуры образца в описанном устройстве составляет  $\pm 1$  К. Регистрация температуры осуществлена угольным терморезистором ТВО.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали существенное влияние низких температур на магнитные свойства магнитомягких сплавов. В исследованных материалах по мере их охлаждения процесс намагничивания затрудняется в слабых полях и облегчается в области парапроцесса. Это находит отражение в изменении параметров  $B(H)$ ,  $H_C$ ,  $\mu$ ,  $\mu_{max}$  с температурой (рис. 1-3, табл. 1, 2). Наибольшая чувствительность указанных параметров к температуре установлена для сплава 79 НМ, кривые намагничивания которого при разных значениях  $T$  представлены на рис. 1.

В области слабых полей для сплава 79НМ, как и для других сплавов, снижение температуры приводит к более пологой кривой намагни-

чивания, т. е. к уменьшению магнитной проницаемости и магнитной индукции при фиксированном поле. При этом величина поля технического намагничивания для сплава 79НМ достигает 400 А/м, а для остальных сплавов - 500-300 А/м. Магнитная индукция в слабых полях при охлаждении снижается монотонно для всех исследованных сплавов (рис. 1, табл. I, 2). Максимальная величина уменьшения  $B$  в интервале 5-300 К колеблется от 16 % для стали 10895 при  $H=150$  А/м до 85 % для сплава 79НМ при  $H=3+4$  А/м.

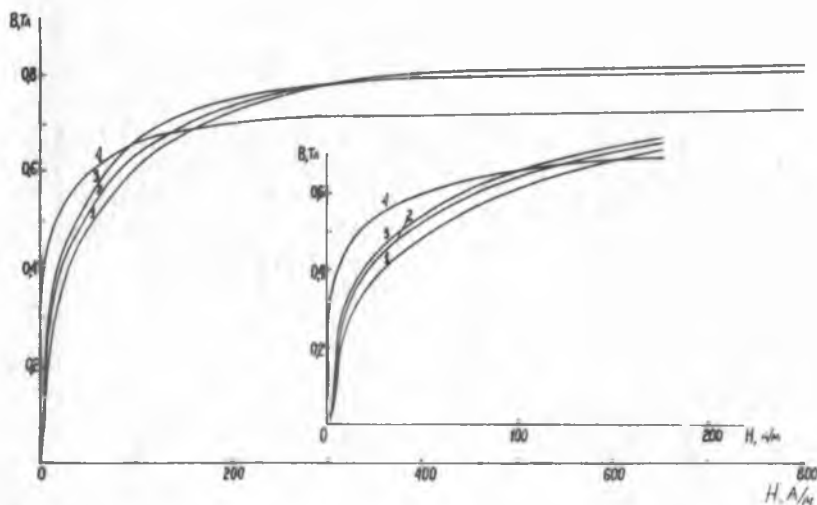


Рис. 1. Кривые намагничивания сплава 79НМ (толщина 0,5 мм):  
1 -  $T=5$  К; 2 - 80; 3 - 200; 4 - 300.

В области сильных полей с понижением температуры индукция всех сплавов увеличивается. Так, для сплавов 49КФ, 16Х и 10895 увеличение  $B$  линейно при охлаждении от 300 до 5 К и составляет 1,5-3 %. Температурный коэффициент индукции  $\frac{\Delta B}{B^* \Delta T}$ , где  $B^*$  - индукция насыщения при 300 К, равен  $-4,9 \cdot 10^{-5}$ ,  $-5,9 \cdot 10^{-5}$  и  $-1,05 \cdot 10^{-4}$   $K^{-1}$  для сплавов 49КФ, 16Х и 10895, соответственно. Увеличение  $B$  сплава 79НМ нелинейно в исследованном интервале температур и составляет  $\approx 12$  % (см. рис. 2 и табл. I).

Максимальная магнитная проницаемость снижается при охлаждении монотонно для всех сплавов. Уменьшение  $\mu_{max}$  при понижении температур от 300 до 5 К достигает  $\approx 85$  % для сплава 79НМ и 15-18 %

для остальных сплавов. при этом для сплава 79НМ наблюдается резкое снижение  $\mu_{max}$  на  $\approx 72-78\%$  в узком интервале  $T=273\pm 250$  К.

Начальная магнитная проницаемость сплава 79НМ изменяется аналогично  $\mu_{max}$ , а именно: понижается на 80-85% при охлаждении до 5 К; резкое ее уменьшение, составляющее 60-70% от  $\mu$  при 300 К, происходит в диапазоне  $T=273\pm 250$  К.

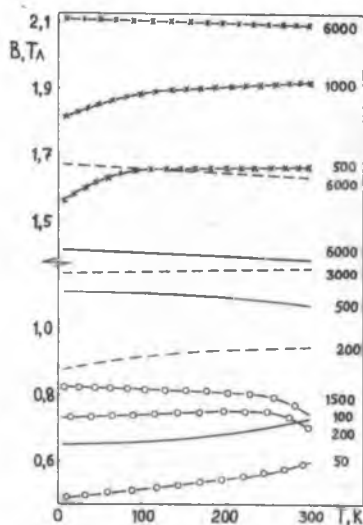


Рис. 2. Температурные зависимости индукции сплавов 79НМ (толщина 0,5 мм) (о-о-о), 49КФ (х-х-х), I6X (—), IOB95 (---) при  $T=5-300$  К в полях различной напряженности А/м, величина которых указана на рисунке.

Коэрцитивная сила  $H_C$  изученных сплавов с понижением температуры увеличивается, при этом ее относительное изменение в интервале  $T=300\pm 5$  К составляет 330-390% для сплава 79НМ и 6-30% для остальных сплавов (рис. 3). Характер изменений  $H_C$ : плавный для сплава I6X, прямолинейный для сплавов 49КФ и IOB95; плавный для сплава 79НМ с существенным изменением  $H_C$  при  $T=273\pm 250$  К.

В работе исследованы магнитные свойства сплава 79НМ разной толщины. Как видно из табл. I, с увеличением толщины кольца коэрцитивная сила уменьшается, а величины начальной и максимальной магнитной проницаемости возрастают.

Следует отметить, что при охлаждении сплавов происходит изменение формы петли гистерезиса и увеличение ее площади. Последнее указывает на возрастание потерь при перемагничивании с понижением температуры для магнитомягких материалов.

Полученные экспериментальные результаты находят объяснение в

Таблица I. Магнитные свойства сплава 79HM в области температур 300-5 К

Толщина листа, мм	Т, К	В, Тл				H <sub>c</sub> , А/м	μ, мГн/м	μ <sub>пол</sub> , мГн/м
		H, А/м						
		50	100	200	500			
0,35	300	0,55	0,62	0,68	0,72	0,72	38,0	130
	273	0,54	0,615	0,67	0,70	0,73	38,0	114
	250	0,48	0,59	0,68	0,76	0,78	11,4	36
	200	0,46	0,57	0,68	0,76	0,79	9,7	29
	80	0,44	0,55	0,67	0,775	0,80	6,5	26
0,50	5	0,42	0,53	0,65	0,775	0,81	5,7	20
	300	0,60	0,66	0,70	0,725	0,73	43,0	214
	273	0,625	0,675	0,72	0,74	0,745	38,0	206
	250	0,57	0,67	0,755	0,78	0,80	18,5	46
	200	0,55	0,66	0,755	0,80	0,81	17,0	40
80	5	0,52	0,635	0,735	0,805	0,815	11,0	34
	5	0,49	0,61	0,73	0,815	0,82	9,0	28



Таблица 2. Магнитные свойства сплавов 49Ж, 16А, Ю955 в области температур 30-1 К

Виды сплава	Т, К	H, Тл				H <sub>c</sub> , А/м	μ <sub>плот</sub> , мГд/м
		H, А/м					
		200	500	1000	3000		
49Ж	300	0,97	1,65	1,92	2,03	2,08	4,9
	200	0,96	1,66	1,90	2,03	2,11	4,8
	80	0,90	1,65	1,88	2,03	2,11	4,75
	40	0,70	1,61	1,84	2,03	2,11	4,4
	5	0,70	1,55	1,81	2,03	2,11	4,0
16А	300	0,95	1,08	1,16	1,29	1,385	4,3
	200	0,94	1,09	1,175	1,30	1,39	5,3
	80	0,93	1,11	1,185	1,31	1,405	55,5
Ю955	5	0,93	1,11	1,185	1,31	1,41	56,5
	300	0,94	1,36	1,48	1,57	1,62	103
	200	0,93	1,36	1,48	1,59	1,65	110
	80	0,91	1,355	1,48	1,59	1,65	117
	5	0,88	1,345	1,48	1,62	1,67	120

рамках классической теории ферромагнетизма [2]. Так, уменьшение магнитной проницаемости и индукции в слабых полях и увеличение коэрцитивной силы при понижении температуры связано с возрастающей ролью энергии магнитной анизотропии, затрудняющей процессы технического намагничивания. Увеличение индукции насыщения по мере охлаждения ферромагнетиков вызвано облегчением намагничивания в области парапроцесса из-за снижения термических флуктуаций.

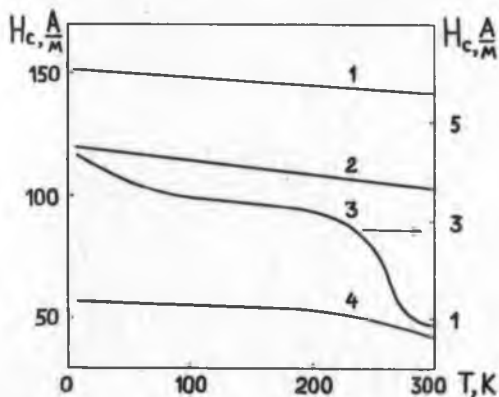


Рис. 3. Температурные зависимости коэрцитивной силы сплавов при  $T=5-300$  К: 1 - 49КФ; 2 - I0895; 3 - 79НМ (толщина 0,5 мм), 4 - I6X.

В заключение следует отметить, что в работе впервые получены магнитные характеристики электротехнических магнитомягких сплавов в интервале температур 5–300 К. Установлено увеличение магнитной индукции в области парапроцесса на 1,5–12 % для разных сплавов при снижении температуры от 300 до 5 К. В области полей технического намагничивания наблюдается ухудшение магнитных характеристик по мере понижения температуры для всех исследованных сплавов, а именно: увеличение коэрцитивной силы и уменьшение магнитной проницаемости. Изменение значений указанных характеристик достигает десятков процентов для сплавов 49КФ, I6X и I0895. Наибольшая чувствительность магнитных характеристик к температуре выявлена у пермаллоя 79НМ, для которого изменения  $\mu$ ,  $\mu_{max}$  и  $H_c$  составляют сотни процентов и наиболее выражены в узком диапазоне  $T=250 \pm 273$  К.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы в приборостроении и автоматике / Под ред. Ю. М. Пятина. - М.: Машиностроение, 1982. - 528 с.
2. Бозорт Р. Ферромагнетизм. - М.: Изд-во иностр. лит., 1956. - 784 с.