АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XII 1966 Вып. 3

УДК 534.232:669.715

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ДЛЯ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

О. Н. Альтгаузен, Л. С. Безуглая, З. Н. Булычева, О. В. Любецкая

Описываются магнитные, магнитострикционные, электрические и механические свойства железо-алюминиевых сплавов — текстурованных 8Ю, 10Ю и нетекстурованного 14Ю (альфера), рекомендованных для изготовления магнитострикционных преобразователей. Показано, что магнитострикция железо-алюминиевых сплавов близка к магнитострикции никеля и пермендюра при меньшей коэрцитивной силе и суммарных потерях.

Для изготовления магнитострикционных преобразователей в настоящее время используют главным образом никель и сплав 50КФ (пермендюр). Однако для этих целей очень перспективны сплавы железо-алюминий. Наибольшую магнитострикцию в этой системе имеет сплав с 14% Al (альфер), который широко используется в Японии в качестве магнитострикционного материала взамен никеля [1]. Сведения о динамических магнитострикционных свойствах сплавов железо-алюминий опубликованы в ряде работ [2—5].

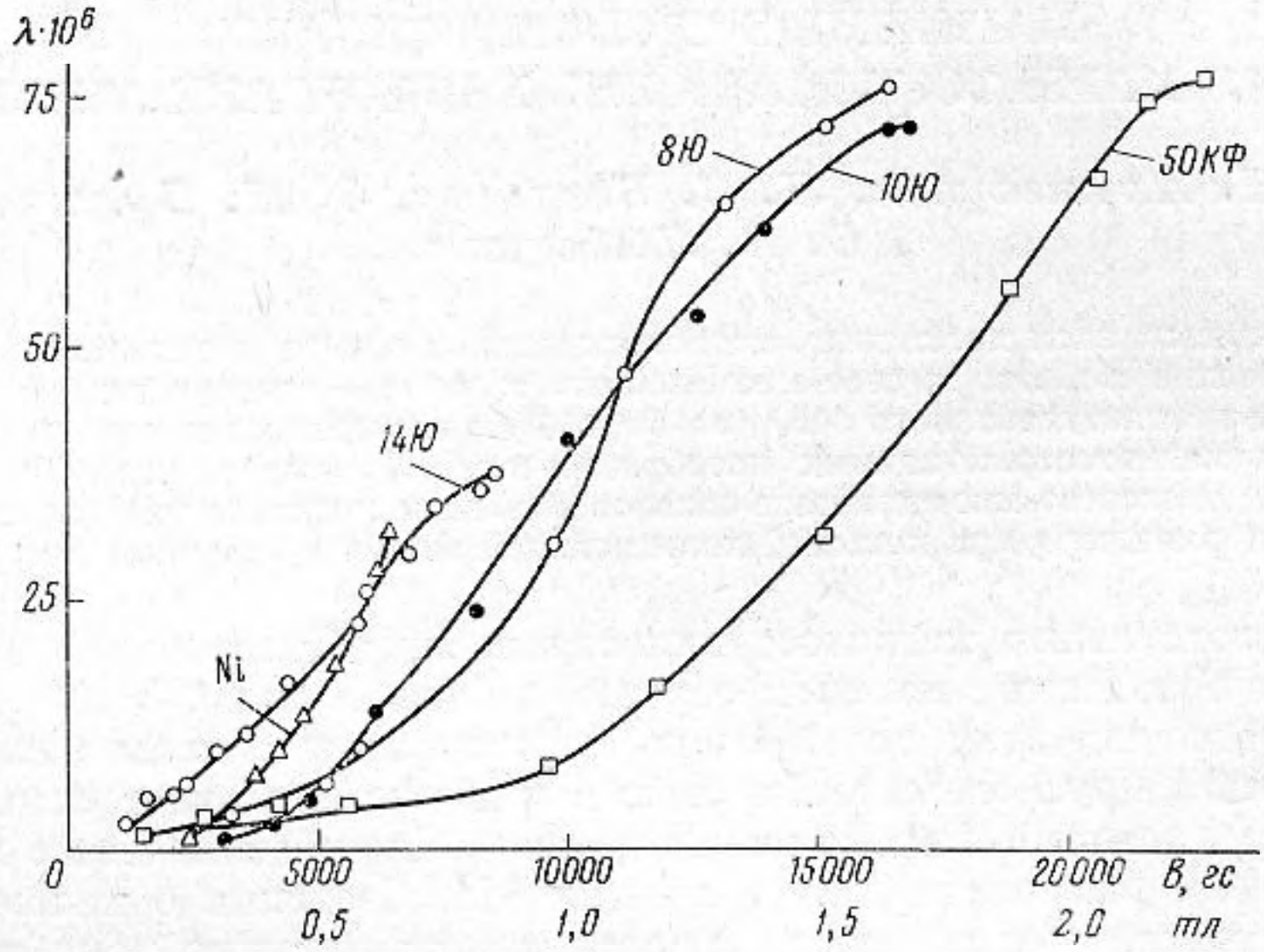
В работах [6—8] было показано, что путем текстурования можно значительно повысить магнитострикцию насыщения λ_s холоднокатаных листов некоторых сплавов Fe — Al. Так, в текстурованных сплавах с 8% и 10% Al величина λ_s составляет $70 \div 90 \cdot 10^{-6}$, т. е. достигает значений λ_s для сплавов Fe — Co и в два раза превосходит λ_s для никеля. Сплавы железо-алюминий отличаются от никеля и пермендюра бо́льшей прочностью и высоким удельным электрическим сопротивлением. Они не содержат таких дефицитных материалов, как никель и кобальт, и являются поэтому более дешевыми. В настоящей работе исследованы статические и динамические магнитные свойства текстурованных сплавов 8Ю, 10Ю, альфера (14Ю) в сравнении с никелем (Н-1, ГОСТ 849-56) и пермендюром (50КФ, ЧМТУ 4319-53). Конечно, приводимые ниже характеристики магнитострикционных материалов не являются решающими для оценки возможности применения их в преобразователях какого-либо конкретного типа. Они могут служить лишь для оценки свойств самого металла и определяются его химическим составом, структурой и технологией изготовления.

Сплавы были приготовлены на Экспериментальном заводе Центрального н.-и. института черной металлургии им. И. П. Бардина в виде листов. Толщина листов для всех сплавов Fe — Al составляла 0,2 *мм*, для 50КФ и никеля — 0,1 *мм*.

Зависимость магнитострикции от индукции определялась на пластинах $0{,}1 \div 0{,}2 \times 10 \times 100$ *мм* путем одновременного измерения магнитострикции и индукции в заданном поле на тензометрической и баллистической установках соответственно. Все другие магнитные параметры определялись на тороидальных образцах, набранных из штампованных колец с внутренним диаметром 40, наружным — 50 *мм*. Изолированные про-

кладками из папиросной бумаги кольца помещались в каркас, на который наматывались измерительная и намагничивающая обмотки.

Статические магнитные свойства (μ_a, μ_{max}, H_c, B_m, B_r) определялись баллистическим методом. Для определения магнитных свойств при температуре —60° образец помещался в ампулу из молибденового стекла, погруженную в сосуд Дьюара с охлаждающей смесью из спирта и жидкого азота. Для определения магнитных свойств при +60° образец помещался в термостат, причем температура определялась термометром, установленным у поверхности образца. Измерения проводились по температурному циклу: 20, —60, 20, 60, 20°.



Фиг. 1

При комнатной температуре определены также статические петли гистерезиса, по которым вычислены потери на гистерезис. Динамические магнитные характеристики (динамическая проницаемость μ, удельная мощность потерь P) определялись методами амперметра — вольтметра и ваттметровым. Кроме магнитных свойств, определялся модуль упругости методом продольных колебаний на образцах диаметром 6 *мм* и длиной 150 *м*, а также плотность — методом гидростатического взвешивания на образцах диаметром 6 *мм* и длиной 15 *мм*.

На фиг. 1 представлена зависимость магнитострикции λ от индукции B для всех изученных сплавов. Магнитострикция всех сплавов медленно увеличивается в области малых индукций, затем резко возрастает. Крутизна кривых для всех сплавов примерно одинакова, но резкий рост

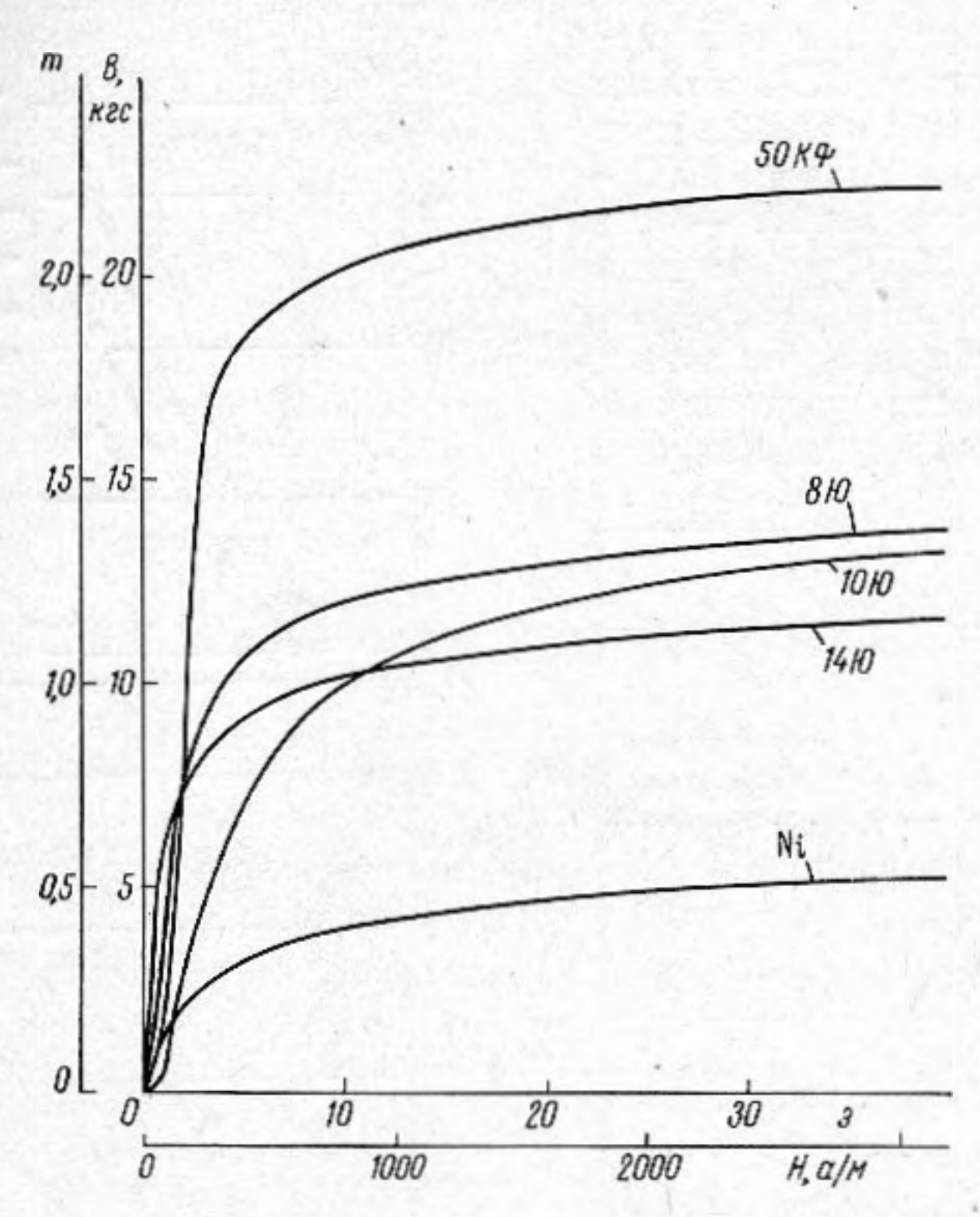
Таблица 1

Обозначение сплава	Магнитострикция насыщения, $\lambda_s \cdot 10^6$	Удельное электросопротивление, $\rho \cdot 10^{-6}$, *ом · м*	Удельный вес, $\gamma \cdot 10^{-4}$, *н/м³*	Модуль упругости, $E \cdot 10^{-6}$ *н/м²*	Начальная проницаемость, μ_0	Максимальная проницаемость, μ_{max}	Коэрцитивная сила, H_c, *а/м*	Индукция насыщения, B_m, *тл*	Остаточная индукция, B_r, *тл*
50КФ	70	0,26	7,9	180	850	5700	150	2,2	1,62
Ni	35	0,07	8,7	195	170	1100	105	0,55	0,28
8Ю	70	0,89	7,5	205	500	4800	36	1,38	0,45
10Ю	70	0,91	6,8	195	220	1500	74	1,27	0,2
14Ю	40	1,03	6,5	175	1000	8700	23	1,18	0,54

Примечание. μ_0, μ_{max} даны в относительных единицах; B_m, H_c и B_r получены в поле $H = 3200$ *а/м*.

магнитострикции наблюдается для каждого сплава при определенной индукции. Так, для никеля и 14Ю он соответствует индукциям 0,3—0,6 *тл*, для текстурованных сплавов 8Ю, 10Ю — 0,5—1,5 *тл*, для сплава 50КФ — 1,0—2,2 *тл*.

В табл. 1 приведены некоторые свойства изученных сплавов при комнатной температуре. На фиг. 2 приведены кривые намагничивания (зависимость индукции B от магнитного поля). Изменение магнитных свойств в интервале температур $-60° \div 60°$ приведено в табл. 2.



Фиг. 2

Как видно из таблиц и фиг. 1—2, магнитная проницаемость уменьшается при понижении температуры и увеличивается при повышении ее, за исключением начальной проницаемости сплавов 8Ю и 10Ю, которая при температуре —60° увеличивается. Коэрцитивная сила у всех сплавов увеличивается при температуре —60° и уменьшается при +60°. Величина магнитной индукции уменьшается при понижении температуры и увеличивается при повышении ее. Из исследованных сплавов наибольшее изме-

Таблица 2

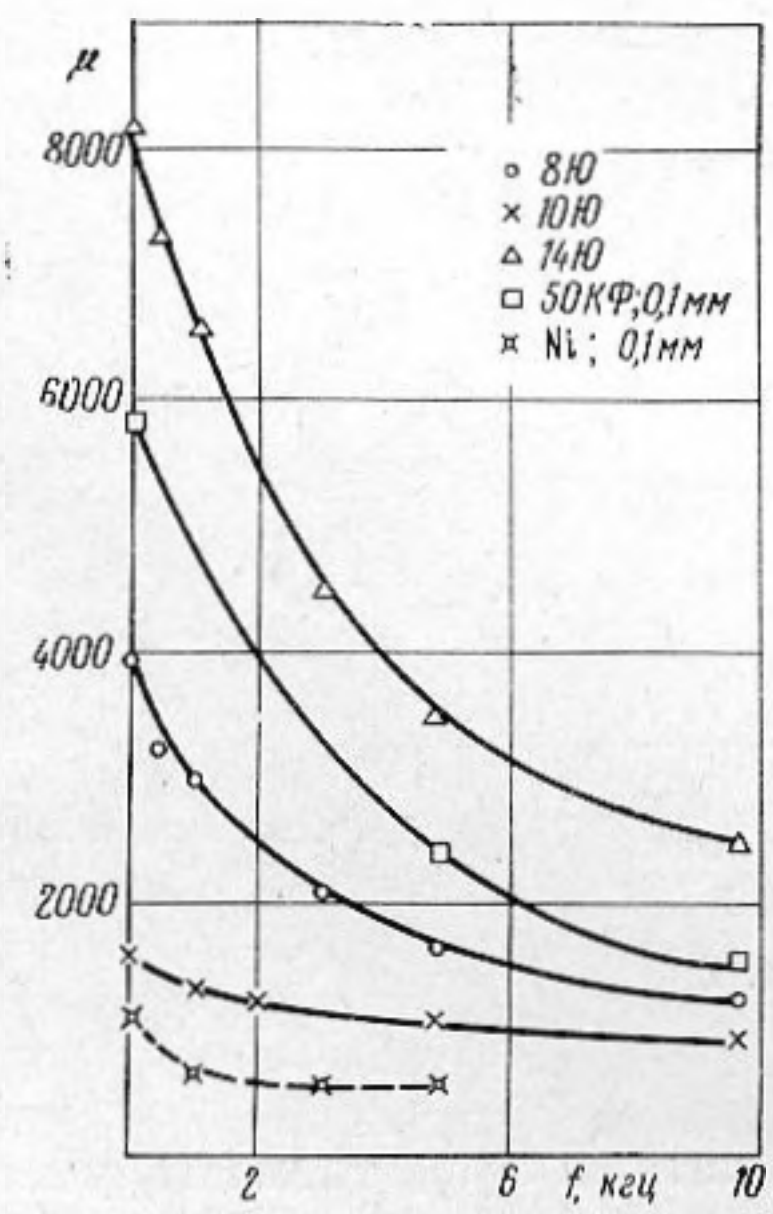
Обозначение сплава	$\frac{\mu_{a_t} - \mu_{a_{20}}}{\mu_{a_{20}}}$, %	$\frac{\mu_{max_t} - \mu_{max_{20}}}{\mu_{max_{20}}}$, %		$\frac{H_{c_t} - H_{c_{20}}}{H_{c_{20}}}$, %		$\frac{B_{m_t} - B_{m_{20}}}{B_{m_{20}}}$, %	
	$t = -60°$	$-60°$	$60°$	$-60°$	$60°$	$-60°$	$60°$
50КФ	—9	7	3	3	— 4	—1	1
Ni	—29	—32	32	52	—27	—4	1
8Ю	27	—8	6	18	—10	—1	1
10Ю	7	—9	3	18	— 3	—1	1
14Ю	—50	—20	17	29	—14	—2	1

нение магнитных свойств в интервале $-60° \div 60°$ обнаруживает никель, наименьшее — 50КФ.

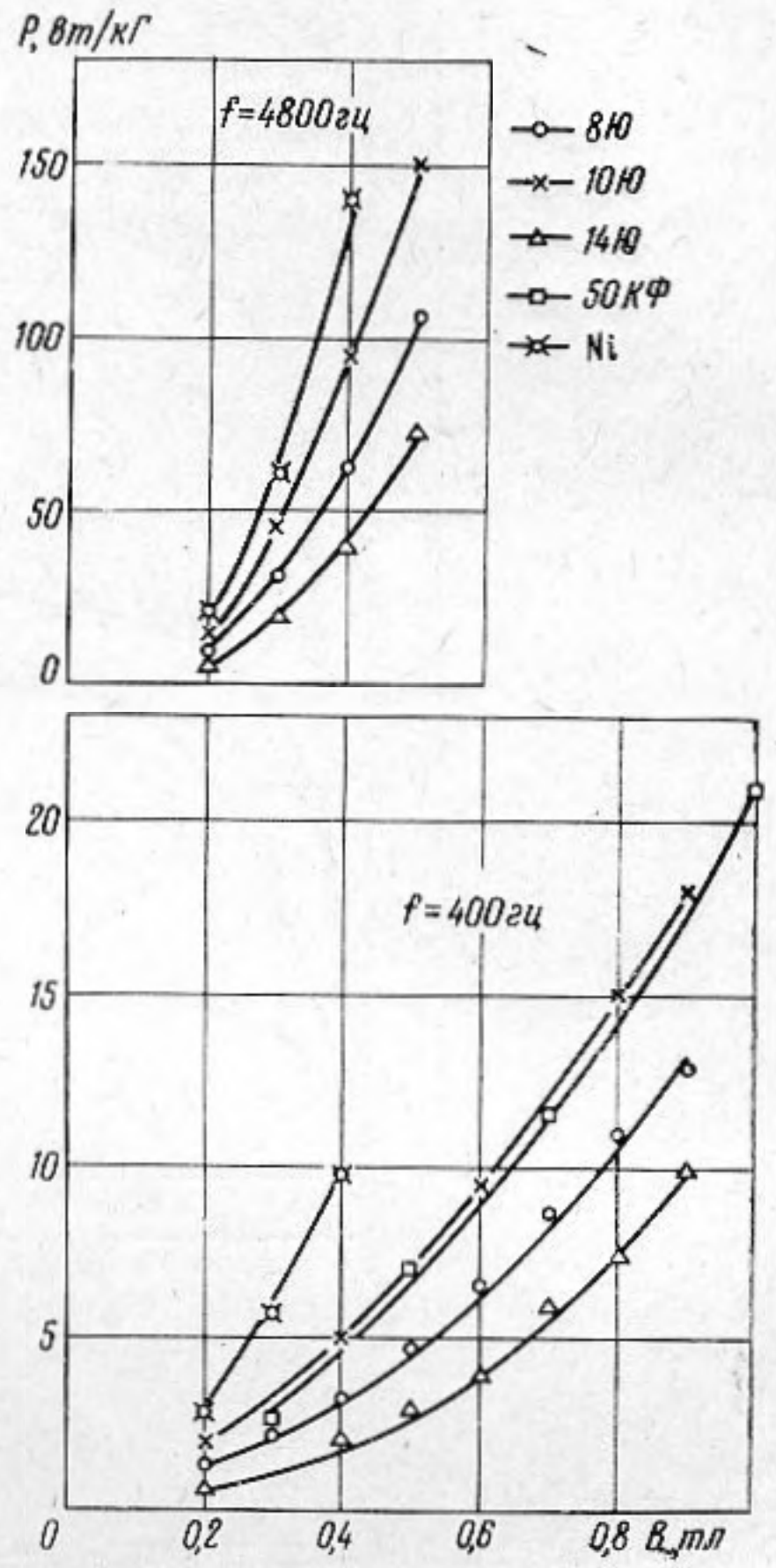
Амплитудная магнитная проницаемость $\mu_\sim$ исследованных сплавов в зависимости от частоты f приведена на фиг. 3. Амплитуда индукции при измерениях составляла 0,3 *тл*. Как видно на фигуре, проницаемость сплавов с ростом частоты уменьшается.

Для сплава 8Ю в толщине 0,2 *мм* амплитудная проницаемость при увеличении частоты до 1000 *гц* и индукции 0,3 *тл* уменьшается на 25%, для сплава 10Ю и 14Ю — на 20% по сравнению со статической. При частоте 9600 *гц* амплитудная проницаемость для сплава 8Ю составляет 30% от статической проницаемости, для сплава 10Ю — 60%, для сплава 14Ю — 30%, для сплава 50КФ в толщине 0,1 *мм* — 25%.

На фиг. 4 приведена зависимость мощности удельных потерь P от амплитуды индукции



Фиг. 3



Фиг. 4

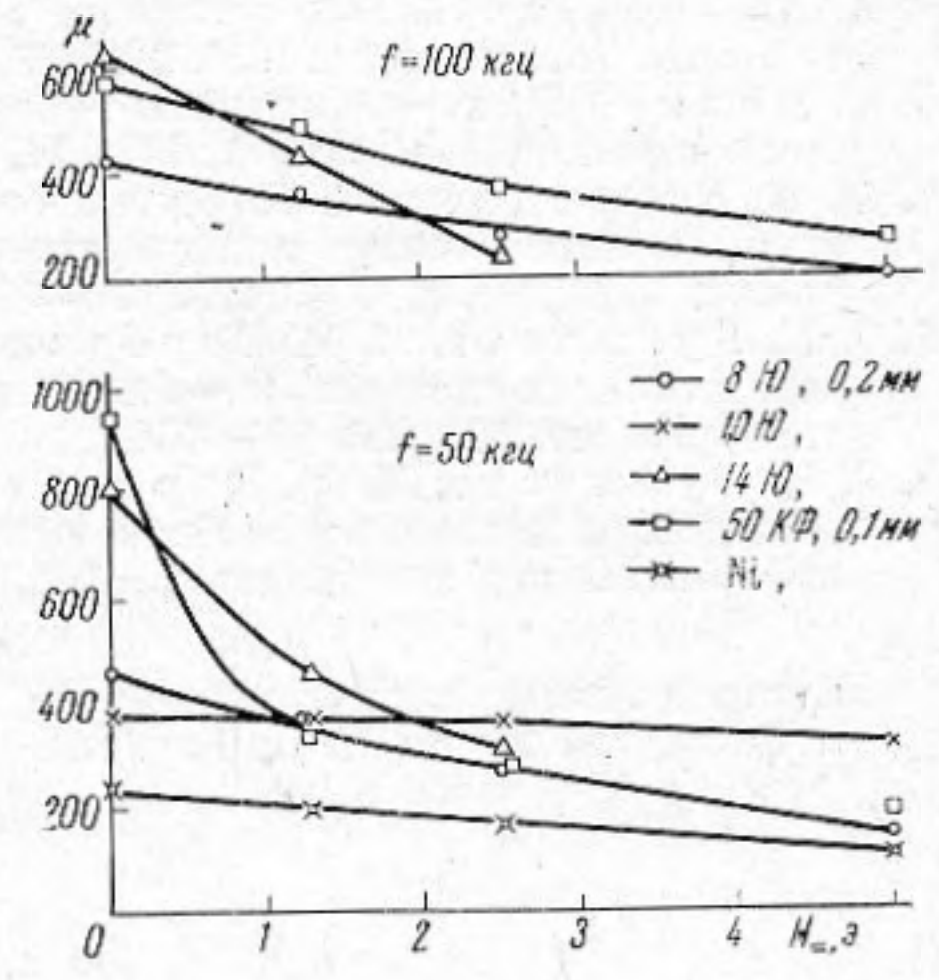
$B_\sim$ для исследованных сплавов. Из фигуры видно, что наименьшими потерями обладает сплав 14Ю, наибольшими — сплав 10Ю. Для сплава 50КФ в толщине 0,2 *мм* удельные потери превосходят по своей величине потери железо-алюминиевых сплавов. В связи с тем, что рекомендуемой толщиной для изделий из никеля является 0,1 *мм*, на фиг. 4 приводятся результаты измерений удельных потерь, полученные на образцах никеля толщиной 0,1 *мм*. При равных индукциях удельные потери никеля больше потерь в железо-алюминиевых сплавах.

В табл. 3 сопоставлены потери на гистерезис, полученные при намагничивании в статическом режиме, суммарные потери в динамическом режиме и соотношение этих потерь при частотах 400 и 1000 *гц* и максимальной индукции 0,4 и 0,8 *тл*. Как видно из таблицы, суммарные потери увеличиваются при увеличении частоты, доля потерь на гистерезис с увеличением частоты уменьшается. Для железо-алюминиевых сплавов при одинаковом значении индукции наименьшие потери как в статическом,

так и в динамическом режимах наблюдаются в сплаве 14Ю, наибольшие — в сплаве 10Ю. Для сплава 14Ю наблюдается наибольшее увеличение потерь с частотой, доля потерь на гистерезис в суммарных потерях наименьшая — 25 ÷ 40%. Для сплава 10Ю при наименьшем увеличении суммарных потерь наблюдается наибольшая доля гистерезисных потерь в суммарных — 65—90%.

В той же таблице приведены потери в статическом и динамическом режимах намагничивания для сплава 50КФ и никеля толщиной 0,1 *мм*.

На фиг. 5 приведена амплитудная проницаемость $\mu_\sim$ исследованных сплавов толщиной 0,2 и 0,1 *мм*, определенная при частотах 50 и 100 *кгц* в зависимости от подмагничивающего поля *H*. Как видно из фигуры, проницаемость сплавов 8Ю и 14Ю уменьшается с ростом подмагничивающего поля. Аналогичная зависимость наблюдается для сплава 50КФ и никеля. Для сплава 10Ю при частоте 50 *кгц* в исследуемом интервале индукций резкой зависимости проницаемости от подмагничивающего поля не было обнаружено. Проницаемости, определенные при частоте 50 *кгц* без подмагничивания и при значениях подмагничивающих полей от 96 до 200 *а/м* близки между собой. Проницаемость, снятая при напряженности подмагничивающего поля 400 *а/м*, уменьшается по сравнению с проницаемостью без подмагничивания на 15—20%.



Фиг. 5

Таблица 3

Марка сплава	Толщина, *мм*	Амплитуда индукции, *тл*	$P_с$, *дж/кг*	$P_д$ за цикл, *дж/кг*		$\frac{P_д - P_с}{P_с} \cdot 100$, %		$\frac{P_с}{P_д} \cdot 100$, %	
				400 *гц*	1000 *гц*	400 *гц*	1000 *гц*	400 *гц*	1000 *гц*
8Ю	0,2	0,4	0,006	0,0075	0,0105	25	75	80	57
		0,8	0,016	0,025	0,036	56	125	64	46
10Ю	0,2	0,4	0,011	0,0125	0,015	14	36	88	73
		0,8	0,03	0,0375	0,045	25	50	80	67
14Ю	0,2	0,4	0,002	0,005	0,007	150	250	40	30
		0,8	0,006	0,0175	0,025	190	320	35	25
50КФ	0,1	0,5	0,013	0,015	0,015	13	18	86	84
		1,0	0,043	0,048	0,051	10	18	90	84
Ni	0,1	0,2	0,006	0,0075	0,003	25	33	80	75
		0,35	0,016	0,019	0,021	19	31	84	76

Примечание. $P_с$ — мощность потерь в статическом режиме намагничивания; $P_д$ — мощность потерь в динамическом режиме намагничивания.

На основании изложенного железо-алюминиевые сплавы (14Ю и текстурованные 8Ю и 10Ю) могут быть рекомендованы для изготовления магнитострикционных преобразователей. Обладая сравнимой с никелем и пермендюром магнитострикцией насыщения, они имеют преимущество перед указанными материалами по величине коэрцитивной силы и суммарных потерь. Наиболее перспективным из них является текстурованный сплав 8Ю, который наряду с высокими магнитными и электрическими параметрами обладает лучшими технологическими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каталог японской фирмы «Гохоку металл индастриз».
2. H. Masumoto, G. Otomo. Science Repts. Research Insts. Tohoku Univ., 1950, A2, 413.
3. C. M. Davis, S. F. Ferebee, Dynamic magnetostrictive properties alfenol. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 2, 286—290.
4. Miles, T. Pigott. Iron-aluminum alloys for use in magnetostriktive transducers. J. Acoust. Soc., America, 1956, 28, 3, 343—346.
5. O. Henkel. Eisen — Aluminium — Legierungen für magnetostriktive Wandler, Hochfrequenztechn. Elektroakust., 1962, 71, 5, 161—165.
6. М. М. Бородкина, З. Н. Булычева, Я. П. Селисский. Исследование текстуры и анизотропии магнитострикции сплавов Fe — Al и Fe — Cr. Физ. металл. и металловед., 1960, 9, 3, 390—399.
7. З. Н. Булычева, М. М. Бородкина. Исследования текстуры и магнитострикции в сплавах системы Fe — Al. Прецизионные сплавы. Сб. тр. ЦНИИЧМ, М., Металлургиздат, 1962, 25, 146—158.
8. З. Н. Булычева, М. М. Бородкина, В. Л. Сандомирская. Исследование текстуры и магнитных свойств магнитострикционных сплавов железо — алюминий. Физ. метал. и металловед., 1965, 19, 1, 152—154.

Центральный н.-и. институт черной металлургии имени И. П. Бардина
Москва

Поступила в редакцию
13 мая 1964 г.