АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XIV 1968 Вып. 1

УДК 534.232

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО СПЛАВА НИКОСИ

М. Д. Авраменко, Н. А. Баранова, В. И. Бородин, Н. В. Ерофеева, В. Г. Майков, Я. С. Шур

В результате исследования сплавов системы Ni — Co — Si получен новый магнитострикционный сплав никоси (3,5—4,5% Co, 1,3—2,0% Si, остальное Ni). Сплав имеет малую величину константы магнитной кристаллографической анизотропии ($K = 3{,}4 \cdot 10^3$ *эрг/см*^{3}) и как следствие этого — низкую коэрцитивную силу ($H_c = 0{,}2$—$0{,}3$ *эрст*), высокую начальную проницаемость ($\mu_0 = 1400$ *гс/эрст*).

По сравнению с никелем, который до последнего времени является основным магнитострикционным материалом, сплав никоси имеет в 3 раза бо́льшую постоянную чувствительность, в 1,6 раза больший коэффициент магнито-механической связи, в несколько раз меньшие электромагнитные потери и лучшие механические свойства.

Высокие статические и динамические свойства сплава никоси обеспечивают значительные его преимущества как магнитострикционного материала по сравнению с никелем.

Основными характеристиками магнитострикционных материалов являются их динамические физические параметры [1]: магнитострикционная постоянная a, коэффициент магнитомеханической связи k, постоянная чувствительности материала к малым упругим напряжениям Λ, обратимая проницаемость μ_r, электромагнитные потери $P_{эм}$. Эти параметры в свою очередь связаны со статическими магнитными и магнитострикционными свойствами [1, 2]:

$$a_{\max} \simeq E_B \frac{\lambda_s}{B_s}, \tag{1}$$

$$k_{\max} \sim \frac{\lambda_s}{B_s}\sqrt{E_H \mu_r} = \sim \frac{\lambda_s \sqrt{E_H}}{\sqrt{K}}, \tag{2}$$

$$\Lambda \sim \frac{\lambda_s R_0}{K}\left(1 - \frac{B_0^2}{B_s^2}\right); \quad \Lambda_{\max} \sim \frac{\lambda_s B_s}{K} = \sim \frac{\mu_0 \lambda_s}{P}. \tag{3}$$

$$P_{эм} = P_{гист} + P_{в.т} \sim \alpha H_c B_r + \beta \frac{1}{\rho}, \tag{4}$$

где B_s — индукция насыщения, B_0 — величина подмагничивающей индукции, λ_s — магнитострикция насыщения, μ_r — обратимая проницаемость, μ_0 — начальная проницаемость, K — суммарная константа магнитной кристаллографической анизотропии, E_H, E_B — модуль упругости при постоянном поле или индукции соответственно, $P_{эм}$ — удельные электромагнитные потери, $P_{гист}$ — потери на магнитный гистерезис, $P_{в.т}$ — потери на вихревые токи, H_c — коэрцитивная сила материала, B_r — остаточная индукция, ρ — удельное электросопротивление, α, β — коэффициенты, зависящие от частоты, проницаемости и др.

При использовании магнитострикционных материалов в электромеханических преобразователях предъявляются определенные требования к их динамическим параметрам, а следовательно, к их магнитным, магнитострикционным, электрическим и механическим свойствам. С целью изыскания новых более эффективных магнитострикционных материалов нами были проведены подробные исследования сплавов системы Ni — Co — Si, содержащих от 2 до 22% Co и от 0 до 4% Si.

Известно [3], что в сплавах Ni — Co, содержащих около 4 и 18% Co, первая константа магнитной кристаллографической анизотропии близка к нулю. Это дает возможность, исходя из соотношений (2) и (3), предполагать, что данные сплавы должны обладать высокими значениями коэффициента магнитомеханической связи k и постоянной чувствительности Λ.

Известно также, что малые добавки кремния к никелю и его сплавам приводят к увеличению удельного электрического сопротивления, некоторому упрочнению сплавов [2] и мало влияют на константу магнитной кристаллографической анизотропии.

На основании результатов исследования магнитных, механических и некоторых динамических свойств сплавов системы Ni — Co — Si был выбран оптимальный состав сплава, названный «никоси» [4], обладающий высокими магнитострикционными свойствами. Содержание основных компонент в сплаве следующее: Co — 3,5—4,5%, Si — 1,3—2%, остальное Ni. Содержание неизбежных малых примесей (серы, углерода, магния, марганца и др.) в сумме не должно превышать 0,6%.

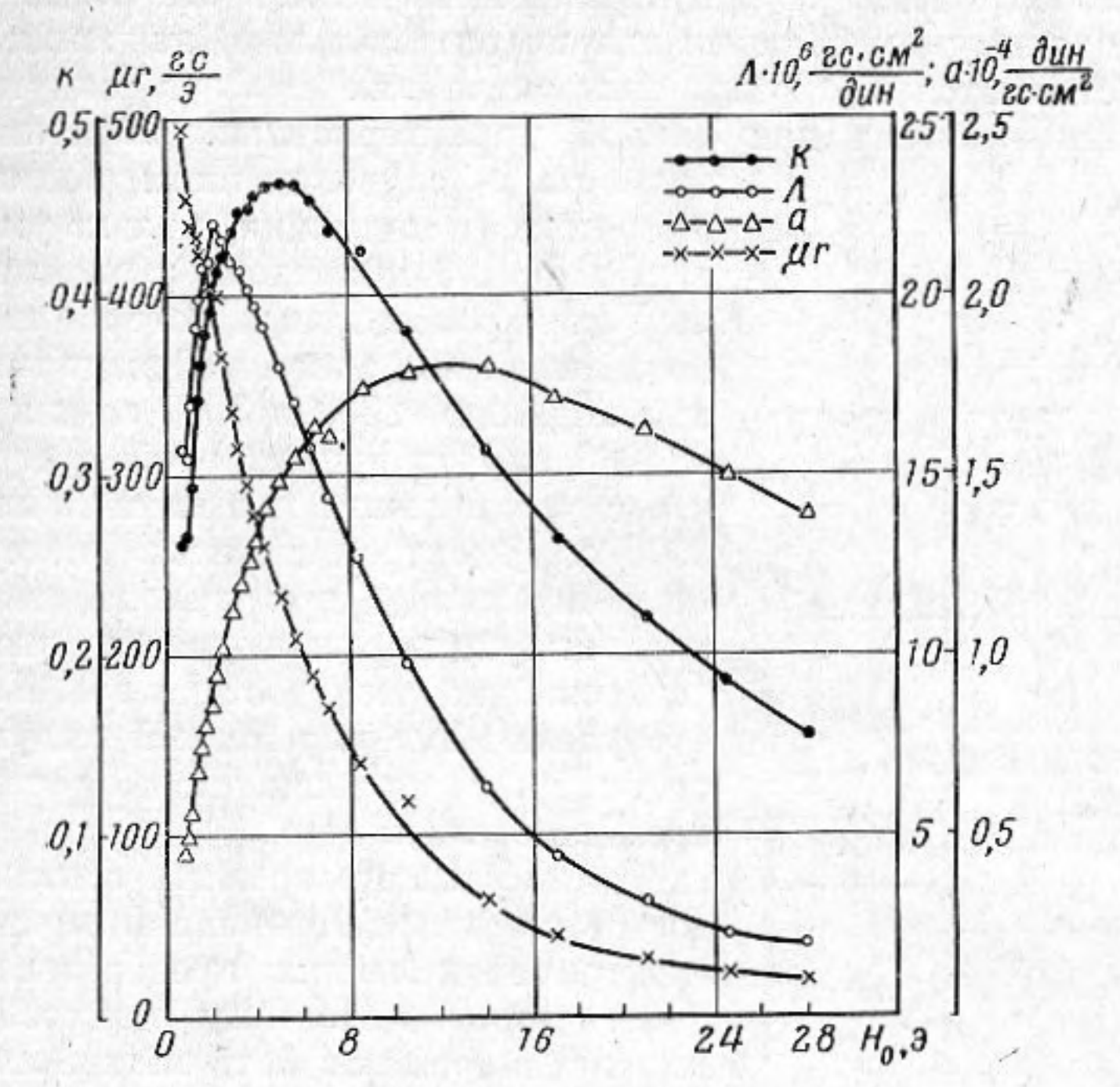
На сплаве никоси оптимального состава были проведены подробные исследования влияния степени деформации и режима термообработки (температуры и среды отжига, скорости охлаждения и т. д.) на его магнитные, магнитострикционные, электрические и механические свойства, а также динамические параметры. Эти исследования показали, что с увеличением температуры отжига улучшаются статические магнитные свойства и динамические параметры и несколько ухудшаются прочностные характеристики сплава, причем резкое изменение свойств наблюдается при температурах отжига до 800° С; при более высоких температурах отжига происходит незначительное улучшение свойств. В настоящей работе приводятся только результаты измерения различных свойств образцов сплава никоси, прошедших отжиг в вакууме при температуре 1000° в течение двух часов и охлажденных с оптимальной скоростью.

Измерение статических магнитных свойств (намагниченности насыщения I_s, остаточной намагниченности I_r, коэрцитивной силы H_c, начальной μ_0 и максимальной μ_{max} проницаемостей) проводилось баллистическим методом на образцах кольцевой формы (наружный диаметр 40,5 *мм*, внутренний — 27,5 *мм*, толщина кольца 0,1 *мм*, высота набора колец 1,0—3,0 *мм*).

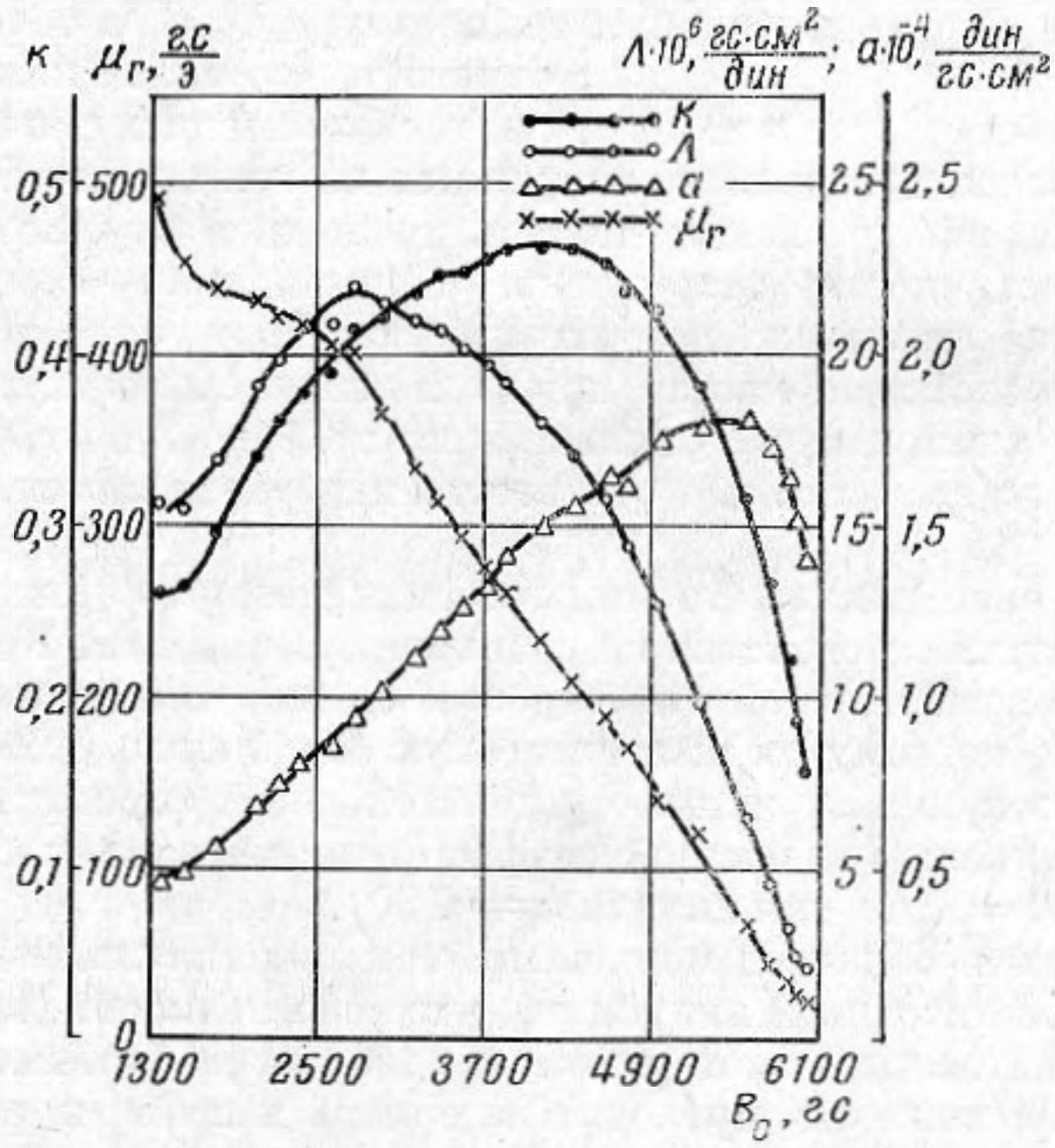
Измерение магнитострикции λ_s проводилось методом механооптического рычага [5] на образцах в форме дисков диаметром 27,5 и толщиной 0,1—0,2 *мм*. Константа магнитной кристаллографической анизотропии K измерялась методом механических моментов с помощью анизометра [5] на монокристальных образцах в форме дисков диаметром 6,0, толщиной 0,6 *мм*. Плоскость образца совпадала с плоскостью (110).

Для измерения динамических параметров (k, a, Λ, μ_r, E) использовался усовершенствованный метод резонанса и антирезонанса [6] с автоматической записью M-образной кривой зависимости полного внутреннего сопротивления от частоты. Исследовалась зависимость динамических параметров (k, a, Λ, μ_r, E) от величины подмагничивающего поля и индукции. Амплитуда переменной индукции при этом не превышала 100 *гс*.

Измерение полных электромагнитных потерь производилось мостовым методом по первой гармонике возбуждающего поля в диапазоне частот 500—12 000 *гц*. Величины постоянных и переменных индукций изменялись



Фиг. 1

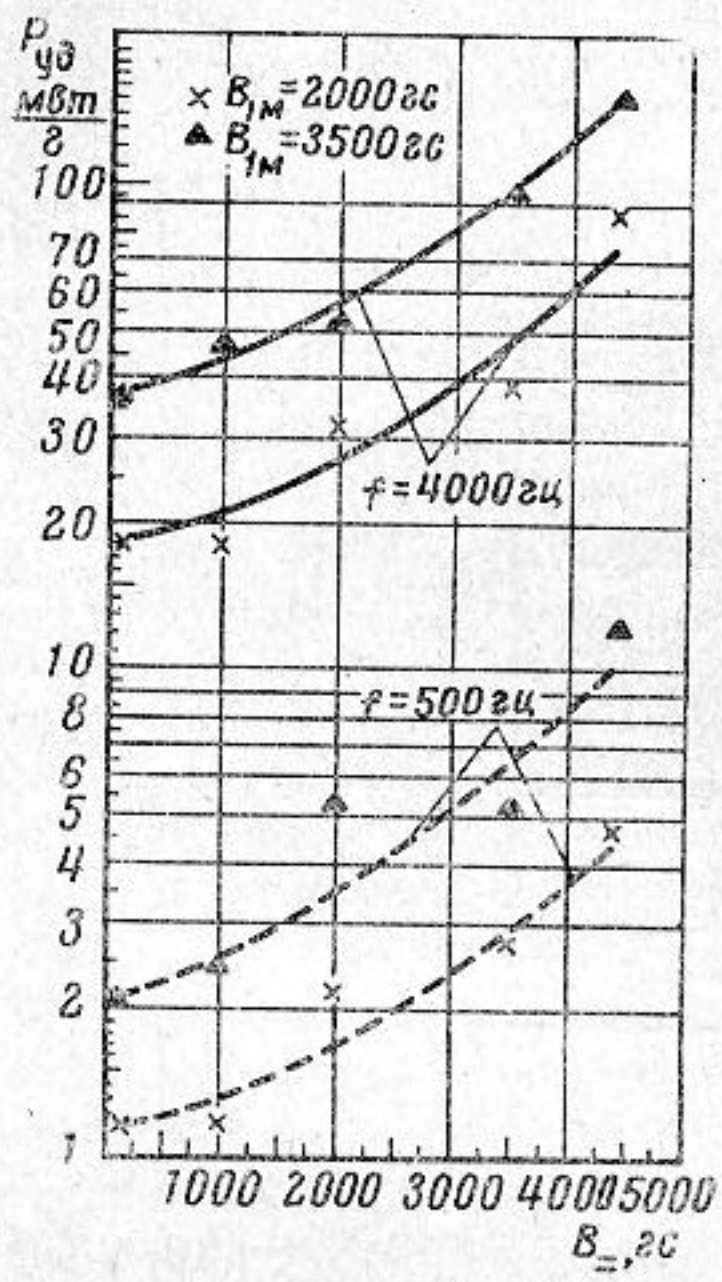


Фиг. 2

в пределах от 100 до 4000 *гс*. Измерения всех динамических характеристик проводились на кольцевых образцах указанных выше размеров.

На фиг. 1 и 2 приведены зависимости динамических параметров k, a, Λ, μ_r от величины подмагничивающего поля и индукции в образце. Из кривых на этих фигурах видно, что зависимости магнитострикционной постоянной a, коэффициента магнито-механической связи k и постоянной

чувствительности Λ от подмагничивающего поля и индукции имеют вид кривых с максимумом. Максимальные (оптимальные) значения этих параметров достигаются при различных значениях поля и индукции, называемых оптимальными для данной характеристики. Обратимая проницаемость μ_r с увеличением подмагничивающего поля (и индукции) только уменьшается.



Фиг. 3

На фиг. 3 приведена зависимость удельных электромагнитных потерь от величины постоянной индукции в образце при переменной индукции 2000 и 3500 *гс* для частот 500 и 4000 *гц*. Из кривых этой фигуры видно, что с увеличением постоянной индукции до 2000 *гс* электромагнитные потери растут незначительно, а при дальнейшем увеличении индукции наблюдается значительный (в несколько раз) рост потерь. Естественно, что увеличение переменной индукции и частоты также приводит к возрастанию электромагнитных потерь.

До настоящего времени основным магнитострикционным материалом, применяемым в электромеханических преобразователях, является никель. Поэтому целесообразно провести сравнение свойств сплава никоси и никеля. В таблице приведены основные физические свойства сплава никоси и никеля марки НП-2, прошедших отжиг в вакууме при температуре 1000° в течение 2 *час*. Следует отметить, что сплав никоси после такой обработки имеет достаточно высокую механическую прочность и может быть использован в изделиях, набранных из тонких (до 0,1 *мм*) пластин, в то время как использование никеля, прошедшего ту же обработку, из-за высокой пластичности затруднено. Применяемая в промышленности термообработка никеля на воздухе при температуре 800° улучшает его механические свойства, однако при этом значительно ухудшаются магнитные свойства (например, H_c повышается с 0,7 до 2 *эрст*, M_0 уменьшается с 400 до 150 *гс/эрст* и т. д.), соответственно ухудшаются и динамические параметры.

Сопоставление данных таблицы показывает, что сплав никоси имеет значительно лучшие свойства по сравнению с никелем. Константа магнитной кристаллографической анизотропии сплава никоси на порядок ниже, чем у никеля, поэтому он имеет высокую начальную и обратимую проницаемости, высокую постоянную чувствительности (примерно в 3 раза большую, чем у никеля) и большой коэффициент магнито-механической связи (для никоси $k = 0{,}49$, для никеля $k = 0{,}30$).

Сплав никоси обладает меньшими, чем никель значениями коэрцитивной силы и остаточной индукции, что обеспечивает в нем снижение потерь на магнитный гистерезис. В два раза большее электрическое удельное сопротивление приводит в сплаве никоси к снижению потерь на вихревые токи. В результате сплав никоси имеет значительно меньшие, чем никель, полные электромагнитные потери. Так, на частотах до 12 000 *гц* при переменной индукции 1000 *гс* потери в сплаве никоси примерно в 4 раза меньше, чем в никеле. Сплав никоси имеет также лучшие, по сравнению с никелем, механические свойства. Его предел текучести примерно в два раза выше, чем у никеля. Сплав никоси хорошо механически обрабатывается, из него могут быть изготовлены тонкие листы (до 0,1 *мм*) и трубы различных диаметров и толщин. По коррозионной стойкости сплав никоси не уступает никелю.

Свойства	Обозначение	Никоси	Никель НП-2
Плотность	d, *г/см³*	8,8	8,9
Удельное электросопротивление	ρ, *мком·см*	16—18	8—9
Константа магнитной кристаллографической анизотропии	K, *эрг/см³*	$3,4\cdot10^3$	$6,0\cdot10^4$
Намагниченность насыщения	I_s, *гс*	495	485
Остаточная намагниченность	I_r, *гс*	100	240
Коэрцитивная сила	Hc, *эрст*	0,2—0,3	0,7—0,8
Начальная проницаемость	μ_0, *гс/эрст*	1400	400
Максимальная проницаемость	μ_{max}, *гс/эрст*	4000	1600
Магнитострикция насыщения	$\lambda_s\cdot10^6$	25—27	30/34
Коэффициент магнито-механической связи	$k_{опт}$	0,49	0,30
Магнитострикционная пост.	$a_{опт}\cdot10^{-4}, \frac{дин}{гс\cdot см^2}$	1,8	1,9
Постоянная чувствительности	$\Lambda_{опт}\cdot10^6, \frac{гс\cdot см^2}{дин}$	28	8,6
Обратимая проницаемость: при	μ_r, *гс/эрст*	520	150
$\Lambda_{опт}$, при $k_{опт}$		210	60
Скорость звука	c, *см/сек*	$4,8\cdot10^5$	$4,9\cdot10^5$
Модуль упругости	E, *кг/см²*	$1,9\cdot10^6$	$2,1\cdot10^6$
Предел текучести	$\sigma_{0,2}$, *кг/мм²*	8,5	4,0
Предел прочности	σ_B, *кг/мм²*	42,0	33,0
Удельные электромагнитные потери при $f=4000$ *гц*; $B_0=3900$ *гс*; $B_\sim=1000$ *гс*	$P_{уд}$, *вт/кг*	8,8	35,0

Высокие статические и динамические свойства сплава никоси обеспечивают значительные его преимущества как магнитострикционного материала по сравнению с никелем.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Ван дер Бургт. Динамические физические параметры магнитострикционных продольных и крутильных колебаний в ферритах. В сб. «Проблемы современной физики — ферромагнетизм», 1954, 6, 126—165.
2. Р. Бозорг. Ферромагнетизм. М., ИЛ, 1956, 255, 492.
3. C. A. Clark. The dinamic magnetostriction of nickelcobalt alloys. Brit. J. Appl. Phys., 1956, 7, 355—360.
4. Я. С. Шур, Н. А. Баранова, В. Г. Майков. Авторское свидетельство № 135223 от 16.06.1960 г.
5. И. И. Кифер, В. С. Пантюшин. Испытания ферромагнитных материалов. М., Энергоиздат, 1955, 217—222.
6. H. J. Round. Magnetostriection transducer measurements.— Wirelles Engr., 1952, 29, 101--105.

Институт физики металлов АН СССР
Свердловск

Поступила в редакцию
16 августа 1966 г.