5. *Перепечко И. И., Голубь П. Д.* Вязкоупругие параметры некоторых полимеров в интервале температур 4,2—240° К. Механика полимеров, 1973, 4, 604–609.
6. *Андрианов К. А., Слонимский Г. Л., Цванкин Д. Я., Папков В. С., Левин В. Ю., Квачев Ю. П., Ильина М. Н., Макарова Н. Н.* Рентгенографическое исследование полиарилалкилсилсесквиоксанов. Высокомолек. соединения, 1974, *Б16*, 3, 208–212.
7. *Перепечко И. И.* Акустические методы исследования полимеров. М., «Химия», 1973.

Барнаульский государственный
педагогический институт

Поступила
10 сентября 1976 г.
После повторного исправления
25 августа 1977 г.

УДК 534.232

О СВЯЗИ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ФЕРРИТОВ С ИХ ПЬЕЗОАКТИВНОСТЬЮ

Е. Л. Закгейм, Р. И. Понкратьева, Л. А. Преснова

Пьезоактивность магнитострикционных материалов определяется коэффициентом магнитомеханической связи ($K_{мм}$). Теоретически связь этого параметра со статическими упругими и магнитными параметрами материала неоднократно рассматривалась в литературе [1–4]. В работе [1] определено максимальное значение $K_{мм}$ зависимостью

$$(K_{мм})^2_{макс} = 0{,}565\varkappa_a E\lambda_s^2/M_s, \tag{1}$$

где $\varkappa_a$ – начальная магнитная восприимчивость, λ_s – магнитострикция насыщения, E – модуль Юнга, M_s – намагниченность насыщения. На основе зависимостей [2] легко получить соотношение

$$(K_{мм})^2_{макс} \sim \lambda_s^2 M_s^2 E/|K_1|^2\varkappa, \tag{2}$$

где K_1 – первая константа магнитной кристаллографической анизотропии. Согласно [3],

$$K_{мм}^2 = \lambda_s^2 E/W_a + W_{\sigma_i} + W_{пор}, \tag{3}$$

где $W_{пор}$ – энергия размагничивающего действия пор, W_{σ_i} – энергия внутренних напряжений, W_a – энергия магнитной кристаллографической анизотропии.

Чтобы привести выражения для $K_{мм}$ к единой форме, примем ряд предположений. Если основным процессом при намагничивании является процесс вращения, то начальная восприимчивость определяется зависимостью

$$\varkappa_{o_{вр}} = M_s^2/4|K_1|. \tag{4}$$

Подставляя (4) в (1) и (2), получаем для обеих формул одно и то же выражение

$$(K_{мм})^2_{макс} \sim E\lambda_s^2/|K_1|,$$

а если под K_1 понимать не первую константу магнитной кристаллографической анизотропии, а эффективное значение магнитной анизотропии, то приходим к формуле (3).

Из анализа уравнения (3) видно, что для получения идеального материала, обладающего величиной $K_{мм}$=100%, необходимо свести к нулю размагничивающее действие пор ($W_{пор}$=0), скомпенсировать магнитную кристаллографическую анизотропию (W_a=0), свести внутренние напряжения к чисто магнитострикционным напряжениям, чтобы

$$W_{\sigma_i} = \lambda_s^2 E.$$

На практике ни одно из этих условий не может быть полностью реализовано. Никаких сведений о роли вклада различных видов магнитной энергии в формирование величины $K_{мм}$ выражение (3) не дает. Выражения (1) и (2) могут быть использованы лишь в случае, когда эффективное значение магнитной анизотропии определяется только первой константой магнитной кристаллографической анизотропии, а намагничивание происходит за счет процессов вращения.

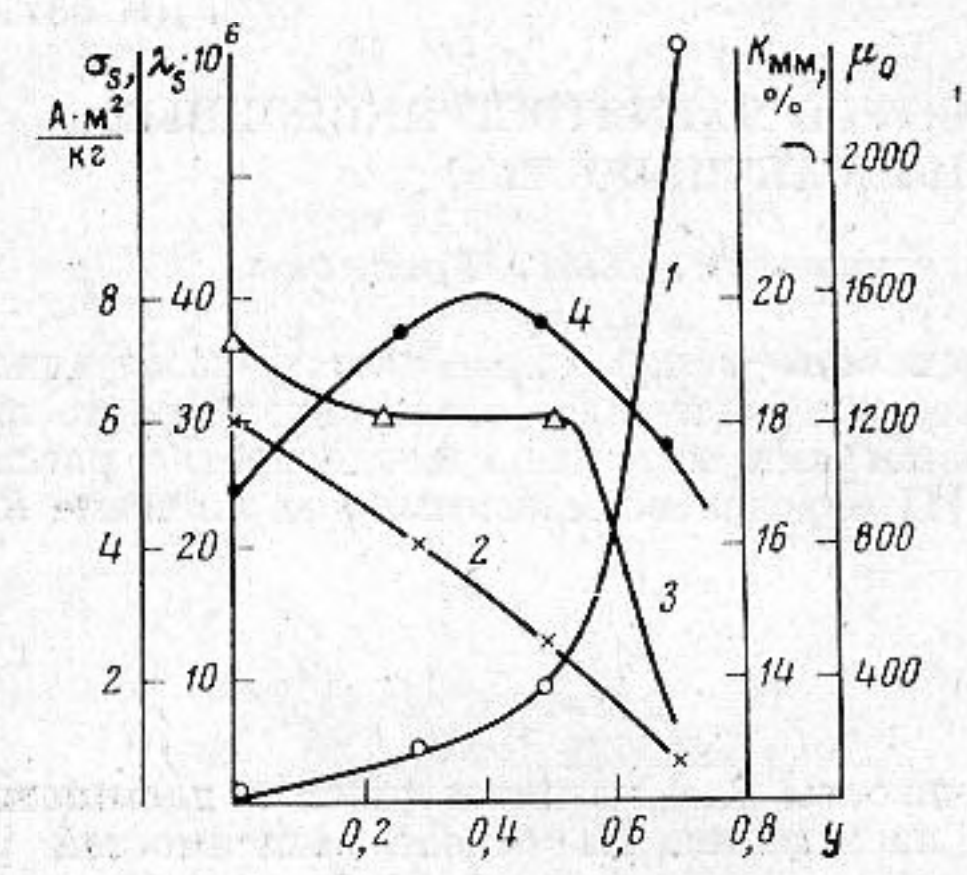
Цель настоящей работы – экспериментальное изучение применимости зависимостей (1)–(3) и выявление относительного вклада различных видов энергии в формирование величины $K_{мм}$.

Для исследований была выбрана система ферритов, описываемая общей формулой

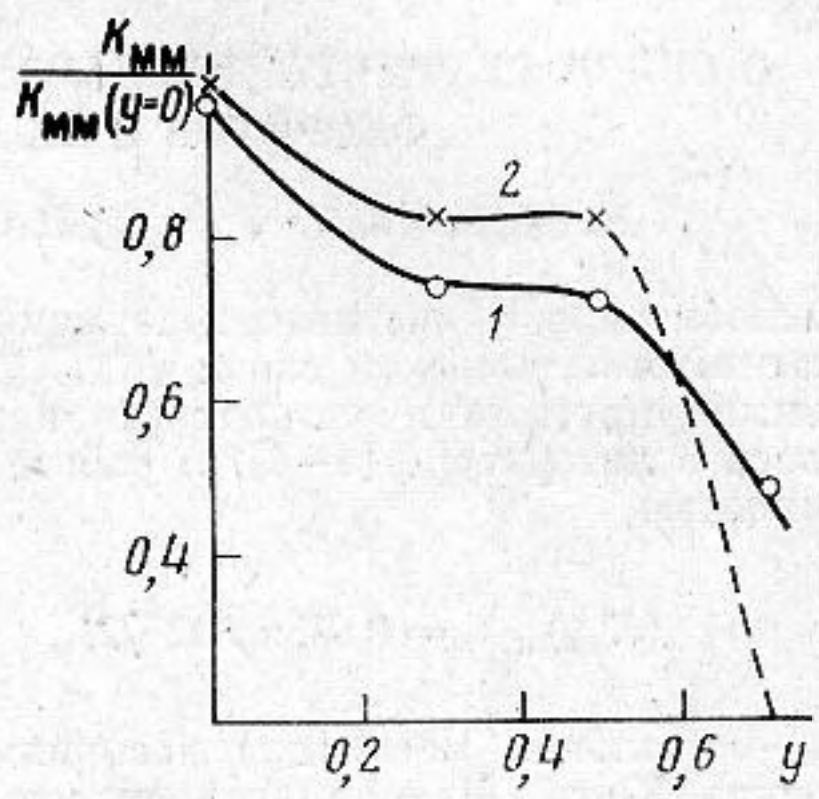
(5) $$Ni_{1-x-y-z}Co_xZn_yFe_{2+z}O_4,$$

где $0 \leqslant x \leqslant 0{,}6$; $0 \leqslant y \leqslant 0{,}65$; $0 \leqslant z \leqslant 0{,}06$. Варьируя в указанных пределах концентрацию компонентов, в этой системе легко получить большие изменения величин $\varkappa_0$, M_s, K_1.

Измерение $K_{мм}$ производилось на образцах в форме трубок с внешним и внутренним диаметром 5,5 и 2,5 мм и длиной 30 мм, возбуждаемых в режиме крутильных колебаний при оптимальном подмагничивающем поле. Модуль сдвига (G^H) магнитосвободного сердечника определялся из выражения $G^H = 4l^2 f_r \rho$, где l – длина трубки, f_r – резонансная частота, ρ – плотность материала. Величина λ_s измерялась на тех же образцах с помощью проволочных датчиков сопротивления. Удельная намагниченность σ_s определялась методом крутящих моментов на сферах диаметром 1 мм, которые вытачивались из тех же образцов. Для определения начальной проницаемости μ_0 одновременно с трубками изготавливались сердечники в форме торов. Величина измерялась стандартным прибором Е2-7.



Фиг. 1



Фиг. 2

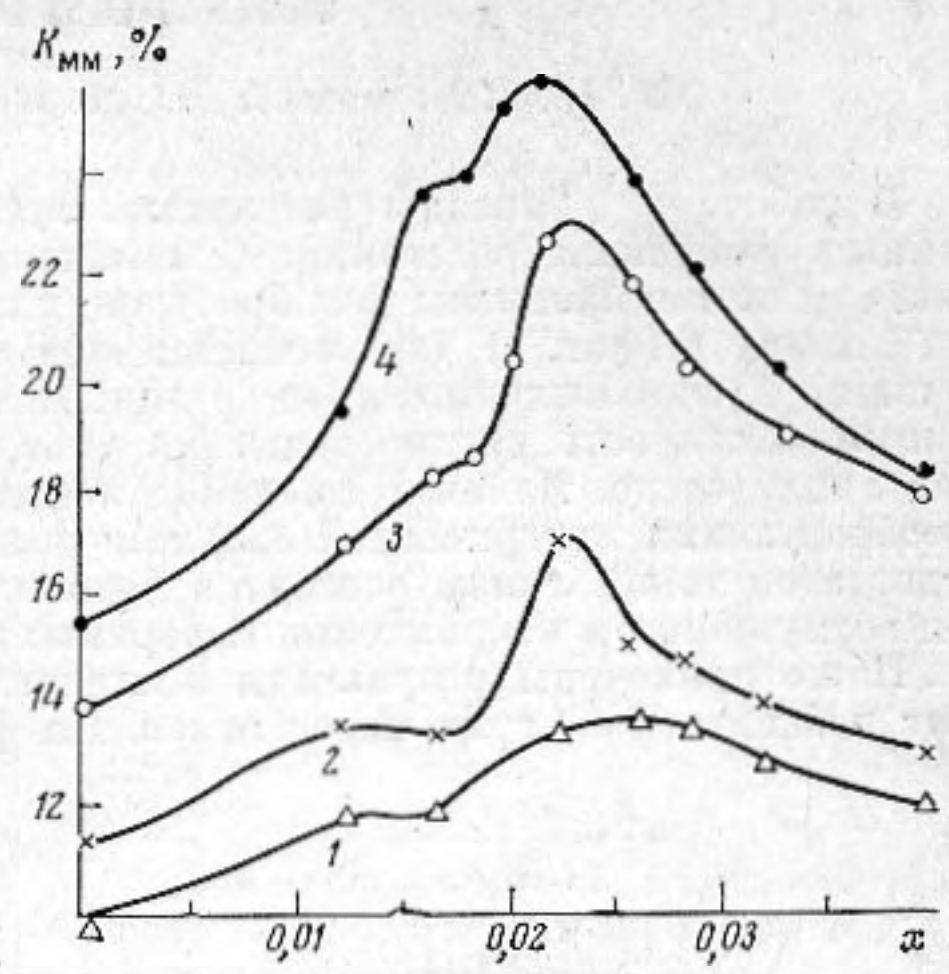
Фиг. 1. Концентрационная зависимость параметров ферритов системы (5) при $x=0$, $z=0{,}012$: *1* – $\mu_0(y)$, *2* – $\lambda_s(y)$, *3* – $(K_{мм})_{макс}(y)$, *4* – $\sigma_s(y)$

Фиг. 2. Сравнение экспериментальных и вычисленных значений $K_{мм}$ ферритов системы (5) при $x=0$, $z=0{,}012$, нормированных по $K_{мм}$ состава с $y=0$: *1* – расчетные, *2* – экспериментальные значения

На фиг. 1 приведены данные о магнитных параметрах системы ферритов, не содержащих кобальта ($x=0$) и с постоянным содержанием железа ($z=0{,}012$). С ростом концентрации ионов цинка величина λ_s почти линейно уменьшается, σ_s проходит через максимум, а μ_0 резко возрастает от значений порядка 10 при $y=0$ до 2400 при $y=0{,}65$. На этой же фигуре приведены экспериментально полученные значения $K_{мм}$. Сравним непосредственно измеренные и вычисленные значения. Данные о концентрационной зависимости величины $(K_{мм})_{макс}$, нормированной по составу с $y=0$, вычисленные по формуле (1) и непосредственно измеренные, приведены на фиг. 2. До концентрации $y=0{,}5$ характер расчетной и экспериментальной кривой согласуется удовлетворительно. При больших концентрациях цинка, когда λ_s становится малой величиной ($\lambda_s \sim 2 \cdot 10^{-6}$), возбудить магнитострикционные колебания в сердечниках практически не удается, несмотря на то что по расчетам коэффициент $K_{мм}$ у состава с $y=0{,}65$ должен быть лишь вдвое меньше, чем у состава с $y=0$, и составлять примерно 10%. Очевидно, для устойчивого возбуждения величина λ_s не должна быть меньше некоторого предельного значения. В противном случае колебания срываются.

Рассмотрим теперь влияние на величину $K_{мм}$ магнитной анизотропии. Известно, что введением в феррит малых добавок ионов кобальта можно свести к нулю величину K_1. При этом концентрационная зависимость $K_{мм}$ проходит через максимум [3, 5]. Для разделения различных видов магнитной энергии использовалась система ферритов (5) с $y=0$, $z=0{,}012$ и переменным x. Всего было изготовлено четыре серии ферритов. Каждая серия включала по 10 составов, отличающихся концентрацией кобальта. Величина K_1, зависящая только от катионного состава феррита, на исследованных составах изменялась от значений $(5-6) \cdot 10^3$ *дж/м³* до нуля. По катион-

ному составу аналогичные ферриты во всех четырех сериях были одинаковыми и отличались друг от друга только величиной плотности, которая возрастала от серии к серии от значений $4{,}2\cdot10^3$ до $5{,}1\cdot10^3$ *кГ/м*³, что соответствует изменению пористости от 22 до 5%. При изготовлении ферритов обращалось особое внимание на то, чтобы технологические режимы обеспечивали малые внутренние напряжения немагнитострикционного происхождения. Магнитострикционные напряжения λ_s^2E для исследуемых ферритов имеют порядок 10^2 *дж/м*³. Таким образом можно считать, что $W_{\sigma i}$ для всех составов, за исключением узкой области вблизи точки компенсации, много меньше, чем W_a.



Фиг. 3. Концентрационная зависимость $K_{мм}(x)$ ферритов системы (5) для составов с $y=0$ при различной пористости ферритов: *1* – $\rho=4{,}2\cdot10^3$ *кг/м*³, *2* – $\rho=4{,}5\cdot10^3$ *кг/м*³, *3* – $\rho=4{,}9\cdot10^3$ *кг/м*³, *4* – $\rho=5{,}1\cdot10^3$ *кг/м*³

Результаты экспериментального измерения $K_{мм}$ приведены на фиг. 3. Из приведенных данных видно, что положение концентрационного пика коэффициента связи для всех четырех серий не изменяется, несмотря на то что пористость образцов разных серий изменяется в 5 раз. Отсюда можно сделать вывод, что магнитная энергия пор действует независимо от энергии магнитной кристаллографической анизотропии. Из этих же данных можно грубо оценить относительный вклад энергии магнитной кристаллографической анизотропии и энергии размагничивающего действия пор в формирование величины $K_{мм}$. Для каждой серии составов можно определить относительное изменение $K_{мм}$, обусловленное изменением K_1, как отношение $K_{мм}$ при $x=0$ к $K_{мм}$ при значении x, соответствующем концентрационному пику. Для кривых *1–4* фиг. 3 это соотношение составляет 1,35; 1,55, 1,65, 1,67 соответственно.

Рассмотрим влияние на величину $K_{мм}$ плотности феррита. Для точек, соответствующих максимуму на кривых *1–4*, значения $K_{мм}$ равны 13,5; 17; 23; 26% соответственно, т. е. для выбранного состава $K_{мм}$ растет практически пропорционально повышению плотности. Для этого состава отношение значений $K_{мм}$ при плотности $5{,}1\cdot10^3$ и при плотности $4{,}2\cdot10^3$ *кГ/м*³ составляет 1,92. Отсюда видно, что повышение плотности оказывает большее влияние на величину $K_{мм}$, чем компенсация K_1. Здесь сказывается также увеличение модуля Юнга с ростом плотности.

Из полученных результатов следует, что для возбуждения магнитострикционных колебаний сердечников на резонансной частоте величина λ_s должна быть не менее $3\cdot10^{-6}$: изменение плотности не изменяет положения концентрационного пика зависимости $K_{мм}(x)$, откуда можно заключить, что W_a и $W_{пор}$ влияют независимо, и поэтому при повышении $K_{мм}$ путем увеличения плотности нет необходимости корректировать состав материала. Для получения высокого значения $K_{мм}$ плотность материала играет решающую роль.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кикучи Е.* Ультразвуковые преобразователи, М., «Мир», 1972.
2. *Бозорт Р.* Ферромагнетизм, М., Изд-во иностр. лит., 1956.
3. *Burgt C. M.* Ferroxcube material for pieromagnetic vibrators. Philips. Techn. Rev., 1956–1957, *18*, 10, 285–289.
4. *Голямина И. П.* Магнитострикционные ферриты как материал для электроакустических преобразователей. Акуст. ж., 1960, *6*, 3, 311–320.
5. *Преснова Л. А., Понкратьева Р. И., Фоменко Л. А.* Влияние термомагнитной обработки на коэффициент магнитомеханической связи Ni—Co ферритов в зависимости от концентрации ионов кобальта. Акуст. ж., 1969, *15*, 1, 116–120.

Поступила
27 мая 1977 г.