АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIV 1978 Вып. 2

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.234

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ РАЗМЕРОВ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ СЕРДЕЧНИКОВ НА ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ И «ДЕФЕКТ» МОДУЛЯ

И. Н. Андреева, А. А. Обухов

Известно, что внутреннее трение в магнитострикционных сердечниках трубчатой формы, совершающих крутильные колебания, зависит от размера этих сердечников. Например, в работах [1, 2] было показано, что при одной и той же амплитуде колебаний коэффициент затухания не меняется с длиной образцов, но обнаруживает явную зависимость от их наружных диаметров при фиксированных внутренних. Затухание при одной и той же амплитуде колебаний тем больше, чем меньше наружный диаметр сердечника.

Влияние абсолютных размеров образца на его диссипативные параметры обнаруживалось и при исследовании затухания упругих колебаний в металлах [3] и получило название «масштабного фактора». Следует отметить, что влияние «масштабного фактора» на затухание в металлах противоположно по характеру тому влиянию, которое наблюдалось в магнитных диэлектриках. С теоретической точки зрения задача о «масштабном факторе» не решена. Известны попытки решить ее на основании статистических представлений о распределении пластических деформаций, ответственных за затухание в металлах [3].

Принято считать, что в магнитострикционных ферритах затухание обусловливается магнитомеханическим гистерезисом. «Масштабный фактор» в этих материалах, как предполагается в [1], может возникать из-за различия доменной структуры большого и малого образцов. Однако вызывает сомнение, что на доменную структуру влияют размеры образцов, значительно превосходящие размеры доменов.

Нами рассмотрено внутреннее трение, характеризуемое логарифмическим декрементом затухания Δ, и «дефект» модуля сдвига G в зависимости от величины наружного диаметра ферритовых сердечников. «Дефектом» модуля — $\Delta G/G$ называют относительное изменение модуля сдвига при данном значении амплитуды механического напряжения σ, по сравнению с его значением при $\sigma=0$.

Образцы из никелевого феррита с избытком Fe_2O_3 и малым количеством CoO, трубчатой формы имели длину $l=25$ *мм* и внутренний диаметр $d=1$ *мм*. Наружный диаметр их D изменялся от 3 до 10 *мм*. Циркулярное постоянное поле подмагничивания создавалось с помощью термомагнитной обработки и было достаточным для технического насыщения образцов. Возбуждение производилось на частоте основной полуволновой моды крутильных колебаний при малых амплитудах деформации по методу, описанному в работе [4]. Возбуждающее поле было направлено вдоль оси образца, напряжение σ имело азимутальное направление. Модуль G определялся по резонансной частоте крутильных колебаний, декремент затухания Δ — по электрическому импедансу намотанной на образец катушки на резонансе и вне резонанса, согласно методике, описанной в [4]. Амплитуда азимутальных напряжений σ оценивалась по величине тока на резонансе [4].

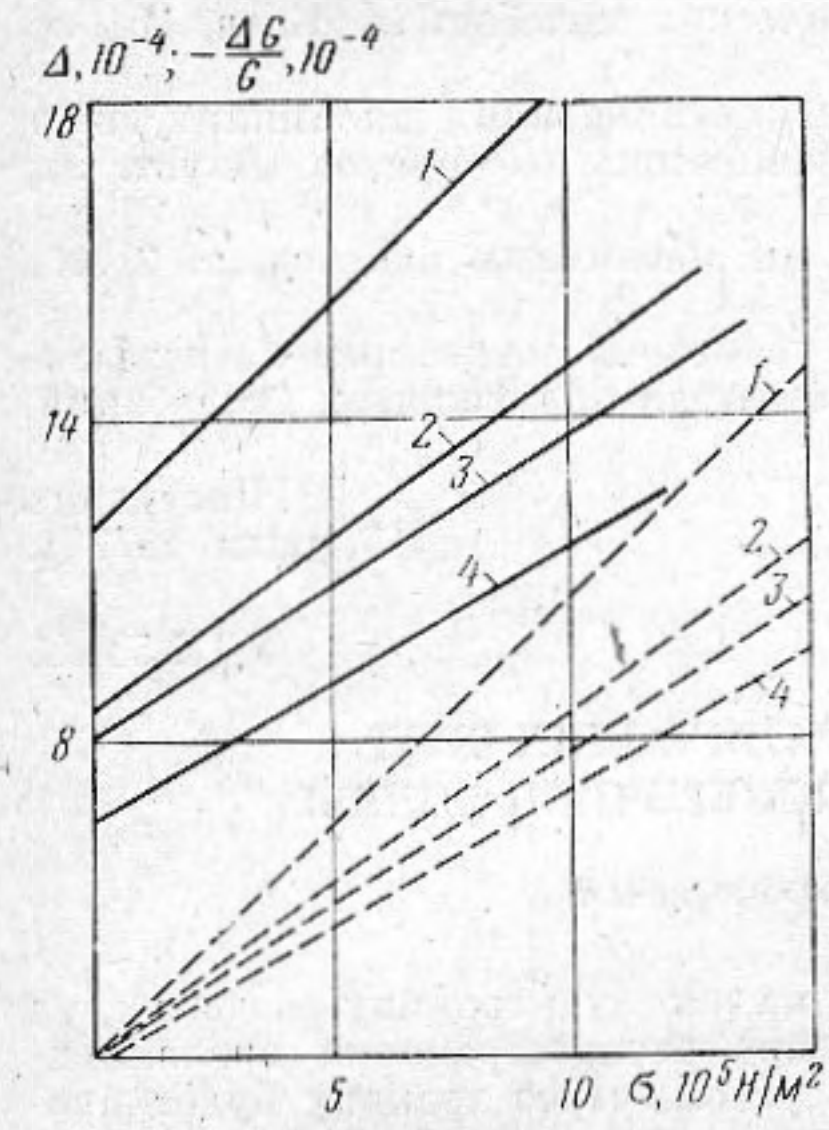
На фиг. 1 представлен логарифмический декремент затухания и «дефект» модуля в зависимости от амплитуды напряжения σ, где видно, что действие малых напряжений вызывает рост декремента затухания, сопровождаемый уменьшением модуля упругости.

Полный декремент затухания можно разделить на амплитудно-зависимую, гистерезисную составляющую $\Delta_г$ и релаксационную $\Delta_р$, определяемую по величине Δ при очень малых σ, т. е. в области обратимого смещения доменных границ. Гистерезисное затухание $\Delta_г$ и «дефект» модуля — $\Delta G/G$ каждого сердечника пропорциональны амплитуде напряжения и по абсолютной величине практически равны между собой, т. е. $\Delta_г \approx \Delta G/G$.

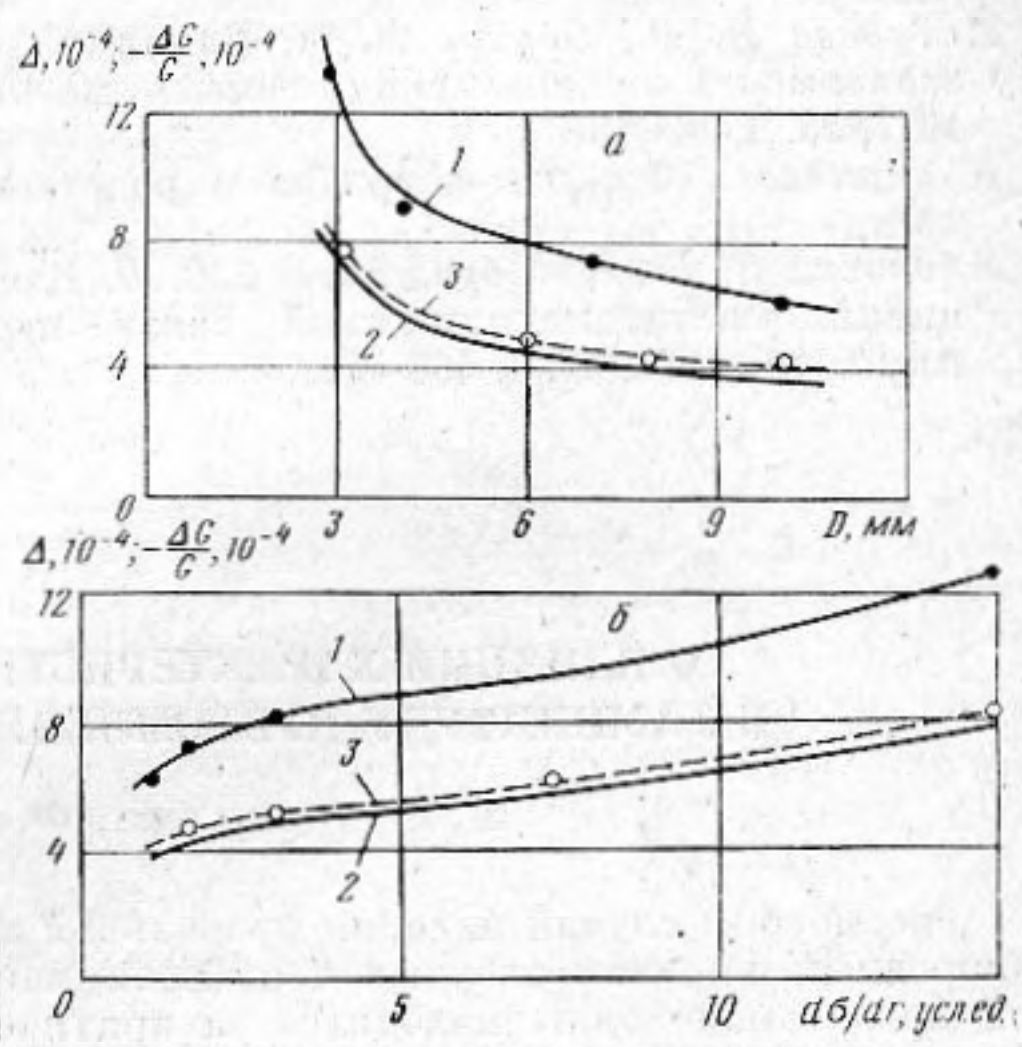
На фиг. 2, *а* показаны релаксационная компонента декремента затухания, а также гистерезисная компонента и «дефект» модуля при $\sigma=7\cdot10^5$ *н/м*^{2} в зависимости от наружного диаметра образцов. Можно видеть, что все три величины из-

меняются согласованно при изменении диаметра сердечника. С ростом D значения Δ_p, $\Delta_г$, $-\Delta G/G$ уменьшаются, причем $\Delta_г$ и $-\Delta G/G$ почти совпадают по величине. Таким образом, параметры материала, характеризующие релаксационные потери и потери на магнитоупругий гистерезис (например, константа Релея), взаимосвязаны и зависят от диаметра образцов.

Известно, что магнитоупругая релаксация, характеризуемая величиной Δ_p, вызвана упорядочением разновалентных ионов в решетке шпинели под действием очень малых упругих напряжений [5]. Феррит как бы «подстраивается» к существующим в нем механическим напряжениям путем локального упорядочения валентностей. Возрастание Δ_p с уменьшением наружного диаметра D, возможно, связано с тем, что при каждой амплитуде напряжения образцы меньшего диаметра находятся в более напряженном состоянии, и поэтому больший объем образца участвует в локальном упорядочении валентностей. При этом увеличивается и магнитоупругая



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Зависимость логарифмического декремента затухания Δ (сплошные кривые) и «дефекта» модуля $\Delta G/G$ (штриховые) от амплитуды напряжения σ на сердечниках с различным наружным диаметром D: *1* – D=–3,0, *2* – 4,0, *3* – 6,0, *4* – 10 *мм*

Фиг. 2. Зависимость релаксационной (*1*) и гистерезисной (*2*) компонент декремента затухания, а также «дефекта» модуля (*3*) от наружного диаметра сердечников (*а*) и от радиального градиента механического напряжения (*б*)

связь [6]. Зависимости величин Δ_p, $\Delta_г$, $-\Delta G/G$ от диаметра D можно объяснить различным распределением амплитуды напряжения σ по сечению образца, т. е. различным радиальным градиентом напряжения $d\sigma/dr$. Максимальное азимутальное напряжение полого цилиндрического образца при крутильных колебаниях может быть рассчитано из уравнения движения и уравнения магнитострикционного эффекта

$$\sigma = 4aBG^H \frac{(D-d)(D^3-d^3)}{D^4-d^4} \frac{\cos \omega/C^H x}{\cos \omega/C^H l/2},$$

где a — магнитострикционная постоянная, B — амплитуда магнитной индукции в образце, G^H — модуль сдвига при постоянном поле H, C^H — скорость звука при постоянном H, ω — частота колебаний, x — координата по оси образца.

Положим для простоты $x=0$, $\omega=0$. Тогда градиент напряжения в среднем сечении сердечника при $d=1$ *мм* равен

$$d\sigma/dr=4aBG(4/D^5-3/D^4-1/D^2).$$

По мере возрастания наружного диаметра образцов величина $d\sigma/dr$ экспоненциально убывает. На фиг. 2, *б* показаны зависимости Δ_p, $\Delta_г$, $-\Delta G/G$ от градиента напряжения в среднем сечении сердечника, откуда видно, что релаксационная, гистерезисная компоненты декремента затухания, а также относительное изменение модуля сдвига согласованно возрастают по мере увеличения градиента напряжения.

Можно предположить, что с ростом градиента напряжений в образце увеличивается упорядочение разновалентных ионов, которое сказывается на условии равновесия границ между доменами, изменяя как обратимое движение доменных границ

(магнитоупругая релаксация), так и необратимое их движение (магнитомеханический гистерезис).

Таким образом, можно считать, что «масштабный фактор» возникает ввиду зависимости диссипативных параметров магнитных диэлектриков от градиента механических напряжений в материале.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Преображенский В. Л.* Магнитоупругие явления и некоторые прикладные вопросы магнитоакустики. Канд. дис., Моск. энергетический ин-т, 1975.
2. *Аннамухамедов Д. В., Преображенский В. Л.* Расчет механической добротности магнитострикционного преобразователя крутильных колебаний. Тр. Моск. энергетического ин-та, 1975, вып. 251, 75–78.
3. *Писаренко Г. С.* Рассеяние энергии при механических колебаниях. Киев, Изд-во АН УССР, 1962.
4. *Андреева И. Н., Обухов А. А.* Влияние поля подмагничивания на амплитудную зависимость механических свойств магнитострикционных ферритов. Акуст. ж., 1977, *23*, 1, 14–18.
5. *Крупичка С.* Физика ферритов и родственных им магнитных окислов, т. 2. М., «Мир», 1976, 481—486.
6. *Андреева И. Н., Преображенский В. Л.* Влияние геометрии сердечника на коэффициент магнитомеханической связи преобразователя крутильных колебаний. Акуст. ж., 1975, *21*, 3, 460–462.

Поступила
15 июля 1977 г.

УДК 534.25

О ВЛИЯНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАНИЧАЩИХ СРЕД НА АМПЛИТУДУ ПРЕЛОМЛЕННОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ВОЛНЫ

В. Н. Бакулин, Ф. Ф. Горбацевич

Рассмотрим случай падения продольной волны на плоскую границу раздела двух однородных упругих твердых тел. Если направление распространения преломленной продольной волны находится за критическим углом, через границу будет проходить лишь поперечная волна [1]. Это явление можно использовать для получения поперечных волн. По сравнению с другими такой способ позволяет относительно легко получить волну, в которой среда совершает чисто поперечные линейно поляризованные смещения, без заметной доли объемных деформаций. Известно, что амплитуда преломленной поперечной волны зависит от угла падения продольной волны и свойств граничащих сред [2, 3]. Найдем условия, которые обеспечивают высокий коэффициент преобразования (K_{PS}) амплитуды смещения продольной (P_1) в амплитуду преломленной (S_2) волн. Из работы [4] следует, что

$$K_{PS}=\frac{A_{S2}}{A_{P1}}=\frac{-2\rho_1 a_1 v_{P1}\theta[m a_2 b_1-(\rho_2-\rho_1-m\theta^2)v_{P2}v_{S1}]}{m^2\theta^2 a_1 a_2 b_1 b_2+(\rho_1+m\theta)^2 v_{P1}v_{S1}a_2 b_2+(\rho_2-m\theta^2)^{-2}a_1 b_1 v_{P2}v_{S2}+(\rho_2-\rho_1-m\theta^2)^2 v_{P1}v_{S1}v_{P2}v_{S2}+\rho_1\rho_2(a_2 b_1 v_{P1}v_{S2}+a_1 b_2 v_{P2}v_{S1})}, \tag{1}$$

A_{P1}, A_{S2} — амплитуда смещения в волнах P_1 и S_2 соответственно;

$$a_1=\sqrt{1-(v_{P1}\theta)^2},\quad a_2=\sqrt{1-(v_{P2}\theta)^2},\quad b_1=\sqrt{1-(v_{S1}\theta)^2},$$
$$b_2=\sqrt{1-(v_{S2}\theta)^2},\quad m=2(\rho_2 v_{S2}^2-\rho_1 v_{S1}^2),\quad \theta=\sin\alpha/v_{P1},$$

α — угол падения луча P_1, v_{P1}, v_{S1} — скорость распространения продольной и поперечной волн в первой среде (где распространяется волна P_1), v_{P2}, v_{S2} — скорость распространения продольной и поперечной волн во второй среде (где распространяется волна S_2), $\rho_1\rho_2$ — плотности первой и второй сред соответственно. Введем новые обозначения: $t=\sin^2\alpha$, $Б=v_{P1}^2/v_{P2}^2$,

$$Г=v_{P1}^2/v_{S1}^2,\quad Д=v_{P1}^2/v_{S2}^2,\quad Н=\rho_2/\rho_1,\quad M=(1/Г-Н/Д). \tag{2}$$

После подстановки выражений (2) в формулу (1) получим

$$K_{PS}=\frac{-2\sqrt{Дt(1-t)}\,[1-Н-2M(t+\sqrt{Б-t}\sqrt{Г-t})]}{t(1-Н-2Mt)^2+\sqrt{1-t}\sqrt{Г-t}(Н+2Mt)^2+\sqrt{Б-t}\sqrt{Д-t}(1-2Mt)^2+Н(\sqrt{1-t}\sqrt{Д-t}+\sqrt{Б-t}\sqrt{Г-t})+4M^2t\sqrt{1-t}\sqrt{Б-t}\sqrt{Г-t}\sqrt{Д-t}}. \tag{3}$$