

Влияние упругих напряжений растяжения на дифференциальную магнитную проницаемость аморфных ферромагнитных проволок в широком частотном диапазоне

© А.В. Семиров, В.О. Кудрявцев, А.А. Гаврилюк, А.А. Моисеев

Иркутский государственный педагогический университет
E-mail: semirov@isttu.irk.ru

Поступило в Редакцию 17 января 2006 г.

Исследовано влияние упругих механических напряжений на полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости аморфных низкомгнитострикционных проволок составов $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ и $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ в диапазоне частот магнитных полей $1 \text{ kHz} \div 10 \text{ MHz}$. Обнаружено, что влияние упругих растягивающих напряжений на дифференциальную магнитную проницаемость различно на разных частотах. Наиболее существенное влияние упругих напряжений на величину магнитной проницаемости наблюдалось на частотах выше 100 kHz .

PACS: 75.50.Kj, 75.80.+q

Изучение магнитоимпедансных и магнитоупругих свойств аморфных магнитомягких материалов в настоящее время является одним из наиболее актуальных направлений в физике магнитных явлений. Данные свойства во многом определяются магнитной проницаемостью материала и ее зависимостью от внешних магнитных полей и упругих деформаций. До настоящего времени не проводилось систематических исследований, касающихся влияния упругих растягивающих напряжений на высокочастотную дифференциальную магнитную проницаемость низкомгнитострикционных аморфных проволок.

Влияние упругих деформаций растяжения на дифференциальную магнитную проницаемость μ исследовано на аморфных магнитомягких проволоках составов $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ и $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$, диаметром $150 \div 170 \mu\text{m}$, длиной 30 mm . Индукция насыщения образцов составляла 0.4 T , константа магнитострикции порядка 10^{-7} . Измере-

ния μ проводились в частотном диапазоне от 1 кГц до 10 МГц. Максимальное значение внешнего квазистатического магнитного поля H , приложенного вдоль длины образца, составляло 10 кА/м. Амплитуда пробного высокочастотного перемагничивающего поля, создаваемого измерительной катушкой, составляла 5 А/м. Величина упругих растягивающих напряжений σ , приложенных вдоль оси проволоки, варьировалась в диапазоне от 0 до 350 МПа.

При измерении магнитной проницаемости внешнее квазистатическое магнитное поле H создавалось соленоидом, в центре которого размещалась аксиально-ориентированная измерительная катушка с образцом. Напряжение с выхода генератора через высокоомный резистор R_b подавалось на измерительную катушку, сердечником которой являлся исследуемый образец [1]. Так как активное сопротивление резистора R_b на два порядка превышает максимальные измеряемые значения импеданса измерительной катушки с образцом, изменением тока в цепи можно пренебречь.

В высокочастотном диапазоне для медного проводника измерительной катушки активное и внутреннее индуктивное сопротивления равны и могут быть найдены из выражения [2]:

$$r = \omega L_i = \frac{\omega l}{\lambda} \sqrt{\frac{\mu_0}{2\omega\gamma}}, \quad (1)$$

где L_i — составляющая индуктивности, связанная со скин-эффектом в обмотке измерительной катушки; ω — круговая частота тока, l — длина провода катушки, λ — периметр поперечного сечения провода, γ — удельная проводимость провода катушки.

Компонента импеданса Z_e , связанная с внешней индуктивностью L_e системы измерительная катушка–сердечник, определяется как

$$Z_e = \omega L_e = \frac{\omega\mu\mu_0 n^2 d}{4\pi} K, \quad (2)$$

где d — диаметр катушки, n — число витков, K — поправочный коэффициент, величина которого зависит от отношения a/d , a — длина катушки, μ — эффективная магнитная проницаемость сердечника

катушки, которая в общем случае является комплексной величиной

$$\mu = \mu_1 - j\mu_2, \quad (3)$$

где μ_1 характеризует обратимую проницаемость, а μ_2 — вязкую проницаемость (связанную с процессами, при которых энергия затрачивается на перемагничивание и на нагрев токами Фуко).

Расчеты показывают, что на максимальной применяемой частоте 10 МГц для использованной в эксперименте измерительной катушки $L_e/L_i \sim 10^2$, т. е. основной вклад в индуктивность измерительной катушки вносит L_e , зависящая от конструктивного исполнения измерительной катушки и эффективной магнитной проницаемости исследуемого образца. Следовательно, импеданс катушки определяется выражением (2). При этом действующее значение напряжения на измерительной катушке будет равно

$$U = IZ = I\omega \frac{\mu\mu_0 n^2 d}{4\pi} K, \quad (4)$$

а значит, при изменении эффективной дифференциальной магнитной проницаемости исследуемого образца, под воздействием упругих напряжений σ и внешнего поля H , отношение напряжений на измерительной катушке будет определяться отношением соответствующих проницаемостей.

Проведенные исследования показали, что влияние упругих растягивающих напряжений на дифференциальную магнитную проницаемость различно на низких и высоких частотах переменного магнитного поля. В качестве примера на рис. 1 представлены характерные полевые зависимости отношения $\mu_{(H)}/\mu_{m(\sigma=0)}$ — дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{(H)}$ в магнитном поле H при различных значениях величины упругих растягивающих напряжений к максимальной дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{m(\sigma=0)}$ при $\sigma = 0$. Зависимости $\mu_{(H)}/\mu_{m(\sigma=0)} = f(H)$ приведены для частот 1 кГц и 10 МГц при различных значениях величины растягивающих напряжений в аморфных проволоках состава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$.

Изменение максимальной дифференциальной магнитной проницаемости μ_m на частотах менее 10 кГц под воздействием изменяющихся растягивающих напряжений в интервале от 0 до 350 МПа не превышает 10%. При $\sigma = 0$ зависимость $\mu_{(H)}/\mu_{m(\sigma=0)} = f(H)$ имеет в магнитном поле $H = 0$ четко выраженный максимум (рис. 1, а). При увеличении

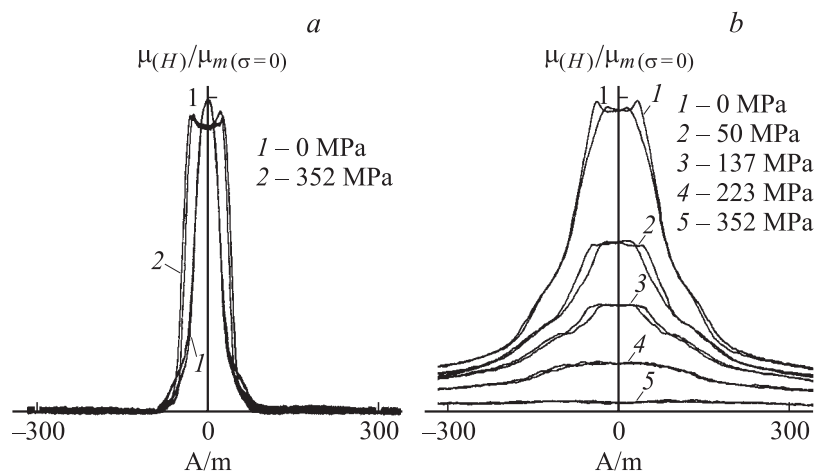


Рис. 1. Полевые зависимости отношения дифференциальной магнитной проницаемости $\mu(H)$ в магнитном поле H при различных значениях величины упругих растягивающих напряжений к максимальной дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_m(\sigma=0)$ при $\sigma = 0$. Частоты 1 кГц (*a*) и 10 МГц (*b*). Зависимости получены для аморфных проволок состава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ диаметром $170 \mu\text{m}$.

поля H магнитная проницаемость падает и при $H_n = 100 \text{ A/m}$ становится близка к проницаемости насыщения. С ростом растягивающих напряжений μ_m уменьшается и на кривой $\mu(H)$ появляются два пика. Соответствующие им магнитные поля H с увеличением σ возрастают, при этом величина поля H_n изменяется незначительно.

На частотах более 10 кГц характер влияния упругих растягивающих напряжений на зависимость $\mu(H)/\mu_m(\sigma=0) = f(H)$ изменяется. При $\sigma = 0$ в магнитных полях до 100 А/м наблюдается слабый гистерезис магнитной проницаемости (рис. 1, *b*). С дальнейшим ростом магнитного поля μ монотонно уменьшается. При увеличении σ интервал полей гистерезиса магнитной проницаемости возрастает. Наблюдаемые при $\sigma = 0$ на кривой $\mu(H)$ два пика с ростом упругих напряжений уменьшаются и при некотором, характерном для данной частоты значении σ полностью исчезают. Максимум зависимости $\mu(H)/\mu_m(\sigma=0) = f(H)$ с ростом σ также уменьшается и сглаживается. На частоте 10 МГц с увеличением σ до 352 МПа падение μ_m достигает 93%.

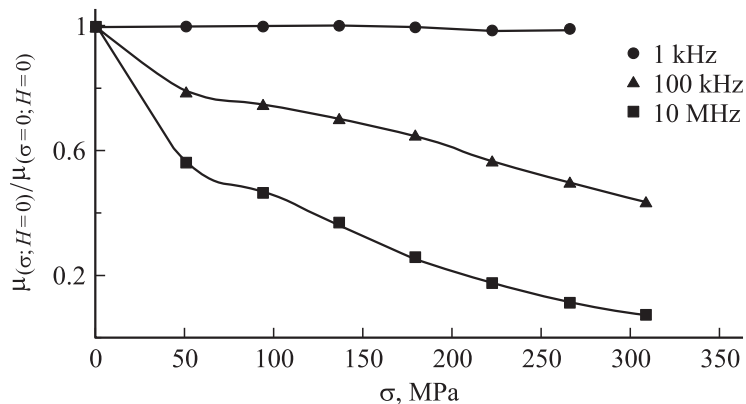


Рис. 2. Зависимости приведенной дифференциальной магнитной проницаемости $\mu(\sigma; H=0)/\mu(\sigma=0; H=0)$ от величины упругих растягивающих напряжений σ при разных частотах переменного магнитного поля для проволок состава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$.

Существенное различие в степени влияния упругих растягивающих напряжений на зависимость $\mu(H)$ на низких и высоких частотах переменного магнитного поля отражается и на зависимостях приведенной дифференциальной магнитной проницаемости образца в состоянии с остаточной индукцией $\mu(\sigma; H=0)/\mu(\sigma=0; H=0)$ от величины растягивающих напряжений σ (рис. 2). Как видно на частотах порядка единиц килогерц, $\mu(\sigma; H=0)$ практически не зависит от величины упругих механических напряжений. На более высоких частотах с ростом σ магнитная проницаемость монотонно падает. Наиболее значительное влияние механических напряжений на величину дифференциальной магнитной проницаемости наблюдалось на частотах переменного магнитного поля выше 100 кГц.

Представленные на рис. 1 и 2 зависимости $\mu(H)/\mu_m(\sigma=0) = f(H)$ и $\mu(\sigma; H=0)/\mu(\sigma=0; H=0) = f(\sigma)$ для образцов состава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ характерны также и для образцов состава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$.

Наблюдаемое различие в зависимостях дифференциальной магнитной проницаемости от упругих растягивающих напряжений на разных частотах переменного магнитного поля можно объяснить исходя из различия в доминирующих процессах перемагничивания областей проволоки, соответствующих скин-слоям разной толщины.

Таким образом, обнаружено, что:

упругие растягивающие напряжения могут оказывать существенное влияние на величину высокочастотной дифференциальной магнитной проницаемости аморфных ферромагнитных проволок, имеющих низкое значение константы магнитострикции;

степень и характер влияния упругих напряжений на высокочастотную дифференциальную магнитную проницаемость зависят от частоты магнитного поля, на которой она определялась;

с ростом упругих растягивающих напряжений аморфных ферромагнитных проволок, имеющих низкое положительное значение константы магнитострикции на частотах более 10 кГц, наблюдается уменьшение дифференциальной магнитной проницаемости.

Проведение исследований поддержано РФФИ (проект № 05-08-18063).

Список литературы

- [1] Семиров А.В., Аграфонов Ю.В., Душутин К.В. и др. // ПТЭ. 2005. Т. 48. № 2. С. 155–156.
- [2] Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.