

УДК 538.652

МАГНИТОСТРИКЦИЯ ЖЕЛЕЗА В ПЕРЕМЕННЫХ ПОЛЯХ

Л. В. Киренский, В. Е. Кузнецов и В. У. Усатов

Методом модуляционной интерферометрии проведены экспериментальные исследования динамической магнитострикции железа в зависимости от амплитуды и частоты переменного поля и от намагниченности. Показано, что в области смещения динамическая магнитострикция, так же как и статическая, имеет линейную зависимость от квадрата намагниченности. Измерены величины магнитострикции при колебании образца на высших гармониках.

Статическая линейная магнитострикция является функцией постоянного магнитного поля, упругих напряжений и температуры

$$\lambda = \varphi(H_{\sim}, \sigma, t). \quad (1)$$

Динамическая линейная магнитострикция, как и статическая, заключается в изменении размеров тела только под действием переменного магнитного поля

$$\lambda_{\sim} = \frac{\Delta l_{\sim}}{l}, \quad (2)$$

где Δl_{\sim} — изменение длины образца под действием переменного магнитного поля; l — длина образца.

Кроме постоянного магнитного поля H_{\sim} , упругих напряжений σ и температуры t , динамическая магнитострикция зависит еще от амплитуды переменного магнитного поля H_{\sim} , его частоты f , потерь энергии на гистерезис P_{Γ} , на вихревые токи $P_{\text{в}}$, других дополнительных потерь $\delta_{\text{д}}$, модуля Юнга E_0 , коэффициента внутреннего трения r , массы m и поперечного сечения образца S , то есть

$$\lambda_{\sim} = \varphi(H_{\sim}, \sigma, t, H_{\sim}, f, P_{\Gamma}, P_{\text{в}}, \delta_{\text{д}}, E_0, r, m, S). \quad (3)$$

Из сравнения (1) и (3) видно, что явление динамической магнитострикции гораздо сложнее, чем статическая магнитострикция. В связи с потерями энергии при перемагничивании динамическая магнитострикция по величине значительно меньше статической. Однако при резонансных частотах она может намного превышать статическую магнитострикцию. Динамическая магнитострикция используется в различного рода магнитострикционных реле, датчиках и вибраторах, применяющихся в виде излучателей и приемников ультразвука, а также в магнитострикционных преобразователях, резонаторах, стабилизаторах и фильтрах многих автоматических и радиотехнических устройств.

В литературе имеется немало работ, посвященных изучению магнитострикционных колебаний в переменных и пульсирующих полях. Однако исследования самой динамической магнитострикции, заключающейся в изменении амплитуды колебания ферромагнетика, и ее зависимости от поля и других параметров не получили достаточного развития. Это объясняется сложностью явления динамической магнитострикции, недостатком необходимой для исследования аппаратуры и разработанных методик.

Для измерения динамической магнитострикции в настоящее время применяется в основном емкостный метод. В [1] с помощью этого метода измерена динамическая магнитострикция никеля при резонансных частотах в зависимости от поляризующего поля и температуры. В работе [2] приведены результаты измерения магнитострикции кремнистого железа в слабых переменных полях: в [3] — кривые зависимости амплитуды колебания в резонансе для ферромагнитных стержней от величины постоянного поля; в [4] дана зависимость динамической магнитострикции кремнистого железа от термообработки и растягивающих усилий. Методом проволочных тензометров сопротивления исследованы магнитострикционные колебания никелевого вибратора [5].

В связи с малой изученностью динамической магнитострикции в данной работе ставится задача — исследовать это явление в зависимости от амплитуды и частоты переменного поля и от намагниченности образца. В качестве материала для исследования взято железо Армко — один из классических ферромагнетиков, магнитострикция которого хорошо изучена в постоянных полях и совершенно не исследована в динамических режимах.

Поскольку в силу различных потерь динамическая магнитострикция может быть значительно меньше статической, для проведения исследований была создана специальная установка высокой чувствительности, работающая на принципе модуляционной интерферометрии [6, 7]. Она позволяет измерять динамическую магнитострикцию величиной 10^{-6} — 10^{-9} , что на 2—3 порядка выше существующих методов, а также порядка 10^{-6} — 10^{-7} . Исследуемый образец имел размеры: длина 80 мм, диаметр 1,5 мм; отожжен при 1000—1100°С в течение 4 ч в вакууме. Его рентгеноструктурное исследование показало отсутствие текстуры. Образец находился в намагничивающих катушках постоянного и переменного поля в свободном положении и мог колебаться в обе стороны одинаково. Изменение его длины, входящее в формулу (2),

$$\Delta l_{\sim} = 4 \Delta l'_k,$$

где $\Delta l'_k$ — измеряемая амплитуда колебания образца в переменном магнитном поле.

Согласно [8], в слабых полях при сравнительно низких частотах коэффициент потерь на гистерезис является постоянной для каждого ферромагнетика величиной, а потери на вихревые токи имеют наименьшее значение. В связи с этим измерение динамической магнитострикции проводилось при низких частотах и сравнительно небольших полях.

На рис. 1 представлены кривые статической и динамической магнитострикции. λ_{\sim} измерялась в переменном поле частотой 80 гц. Характер кривых один и тот же, однако по величине статическая магнитострикция в несколько раз больше динамической. Причиной этого, наряду с другими потерями, является неполное промагничивание образца.

В соответствии с теорией Акулова и Кондорского [9] для ферромагнетиков в области смещения существует квадратичная зависимость статической магнитострикции от намагниченности. Это подтверждено экспериментально для поликристаллических образцов в [10—12]. Для железа, согласно этой теории,

$$\lambda = \frac{3}{5} \lambda_{100} \frac{I^2}{I_s^2}, \quad (4)$$

где λ_{100} — магнитострикция насыщения в монокристалле железа в направлении [100]; I — намагниченность в постоянном поле; I_s — намагниченность насыщения.

Введем обозначение

$$\alpha = \frac{3}{5} \frac{\lambda_{100}}{I_s^2}. \quad (5)$$

Тогда

$$\lambda = \alpha I^2. \quad (6)$$

На рис. 2 представлено изменение статической и динамической магнитострикции от I^2 .

Обе магнитострикции имеют линейную зависимость. λ_{\sim} (прямая 2) снималась в переменном поле частотой 30 гц. Вследствие потерь, в

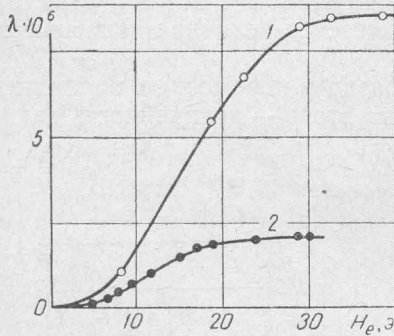


Рис. 1. Кривые статической (1) и динамической (2) магнитострикции, $f = 80$ гц.

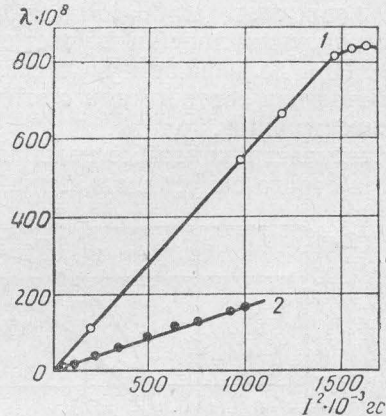


Рис. 2. Зависимость статической (1) и динамической (2) магнитострикции от квадрата намагниченности.

основном на гистерезис, прямая динамической магнитострикции имеет более пологий ход, чем статическая.

Ипатовым [13] теоретически показано, что закон магнитострикции Акулова и Кондорского, выведенный для статического режима, может быть применен в области смещения и для динамической магнитострикции. С этим выводом согласуются экспериментальные данные, характеризующие линейную зависимость, приведенные на рис. 2. Следовательно, по аналогии с (6)

$$\lambda_{\sim} = \alpha_{\sim} \cdot I_{\sim}^2. \quad (7)$$

В соответствии с (6) и (7) из графиков получим:

$$\alpha = 5,65 \cdot 10^{-12} \text{ 1/гс}^2; \quad \alpha_{\sim} = 1,65 \cdot 10^{-12} \text{ 1/гс}^2.$$

Очевидно, величина

$$\alpha - \alpha_{\sim} = 4 \cdot 10^{-12} \text{ 1/гс}^2$$

будет характеризовать потери, возникающие в динамических режимах; чем больше потери при перемагничивании, тем меньше α_{\sim} .

В выражении (5) величины λ_{100} и I_s являются постоянными, они не меняются и при динамических режимах. Относительно λ_{100} это подтверждено экспериментально в области подхода к насыщению на описанной выше установке в пульсирующем поле частотой 65 гц. В то же время $\alpha_{\sim} < \alpha$. Следовательно, числовой коэффициент в (5), равный $3/5$ и справедливый для статической магнитострикции, в динамических режимах должен быть также меньше. Из экспериментальных данных

$$\alpha_{\sim} = 1,65 \cdot 10^{-12} \text{ гс}^{-2}; \quad \lambda_{100} = 15,5 \cdot 10^{-6}; \quad I_s = 1670 \text{ гс.}$$

Отсюда для динамической магнитострикции в слабых полях и при низких частотах числовой коэффициент будет иметь значение

$$\frac{\alpha \sim I_s^2}{\lambda_{100}} \approx \frac{3}{10}.$$

На рис. 3 показана зависимость динамической магнитострикции от амплитуды переменного магнитного поля для различных частот. В полях до 10 э при частотах 80, 130 и 240 гц кривые магнитострикции совпадают и имеют крутой линейный участок. Здесь потери на вихревые токи очень малы. При дальнейшем увеличении напряженности поля они с частотой возрастают, в соответствии с этим изменяется и величина динамической магнитострикции.

Магнитострикционные колебания образца в переменных полях не являются строго синусоидальными. Причина этого — нелинейность зависи-

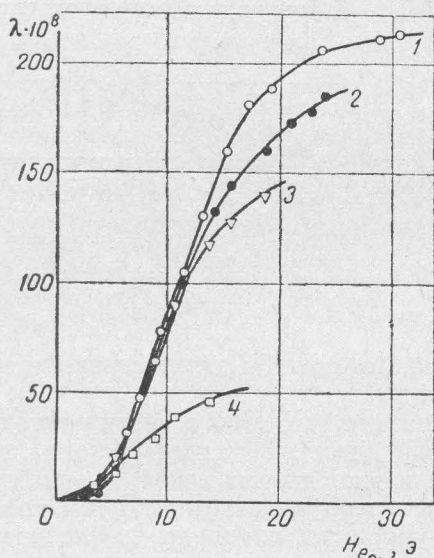


Рис. 3. Динамическая магнитострикция в зависимости от амплитуды переменного поля различной частоты:
1 — 80; 2 — 130; 3 — 240; 4 — 620 гц.

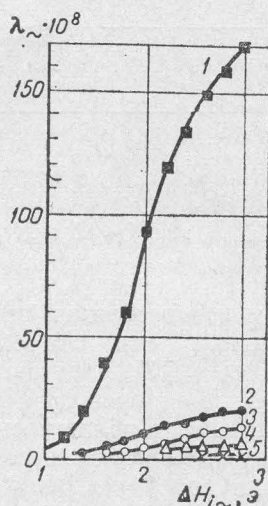


Рис. 4. 1—5 — гармоники динамической магнитострикции при $f = 30$ гц.

мости намагниченности и магнитострикции от поля и неравномерность распределения магнитного поля по сечению образца. Затухание переменного поля по мере проникновения в ферромагнетик возрастает. При синусоидальном изменении напряженности поля, в случае петли, в магнитной индукции будут содержаться высшие гармоники [14].

Исследование образца в поле до 16 э частотой 30 гц показало наличие пяти гармоник магнитострикции (рис. 4). Основная величина магнитострикции характеризуется первой гармоникой (результаты измерений на первой гармонике и отражены на предыдущих рисунках). Магнитострикция на второй гармонике имеет наибольшую величину при 16 э и составляет 11,5% от значения $\lambda \sim$ на первой гармонике. Соответственно 3, 4 и 5 гармоники составляют 7,9; 2,9 и 1,2%. Отсюда можно заключить, что величина магнитострикции образца во внешнем поле до 16 э в основном отражается первой гармоникой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cook J. C. Nuovo Cimento, 1950 7, Suppl., ser. 9, № 2, 192.
2. Wycklendt D. A. Conf. Magnet. a. Magnet. Mater. (Boston, Mass, 1956), 1957, № 9, AIEE, 323.
3. Kimura R., Nose H., Kuwajima T. J. Appl. Phys. Japan, 1958, 27, № 6, 331.
4. George W. R., Holt C., Thompson J. E. Proc. Inst. Electr. Engrs., 1962, A109, № 43, 101.
5. Скоробогатов В. И. Труды ин-та инженеров ж/д транспорта, вып. 165, 1963, стр. 68.
6. Кузнецов В. Е., Усатов В. У. ПТЭ, 1962, 3, 157.
7. Киренский Л. В., Кузнецов В. Е., Усатов В. У. Динамическая магнито-стрикция железа, М., Изд. ВИНТИ, 1964.
8. Рабкин А. И. Высокочастотные ферромагнетики, М., Физматгиз, 1960, стр. 54.
9. Акулов Н. С., Кондорский Е. И. ЖЭТФ, 1933, 3, 2, 109.
10. Sow. Phys., 1936, 10, 689.
11. Гуськова И. Л. Кандидатская диссертация, Красноярский государственный педагогический институт, 1959.
12. Власов А. Я. и др. Изв. СО АН СССР, 1959, № 2, 16.
13. Ипатов Л. Г. ЖТФ, 1959, 29, 5, 662.
14. Поливанов К. М. Ферромагнетики, М.—Л., Госэнергоиздат, 1957, стр. 73.