

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Сибирское отделение
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

Л. В. КИРЕНСКИЙ, В. Е. КУЗНЕЦОВ, В. У. УСАТОВ

ДИНАМИЧЕСКАЯ МАГНИТОСТРИКЦИЯ ЖЕЛЕЗА

1964

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

ДИНАМИЧЕСКАЯ МАГНИТОСТРИКЦИЯ ЖЕЛЕЗА

Явление статической магнитострикции, заключающееся в изменении размеров и формы тел под действием постоянного магнитного поля было открыто в 1842 г. Джоулем. Количественное выражение статической линейной магнитострикции, характеризующее свойство магнитного материала имеет вид:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l}$$

где l - длина образца;
 Δl - изменение длины образца под действием постоянного поля.

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

$$\lambda = \mathcal{F}(H_-, \sigma, t) \quad (1)$$

Динамическая линейная магнитострикция заключается также в изменении размеров тел, только под действием переменного магнитного поля. Ее количественное выражение:

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

где Δl_{\sim} - изменение длины образца под действием переменного магнитного поля.

Динамическая магнитострикция также, как и статическая зависит от постоянного магнитного поля H_- , упругих напряжений σ и температуры t и, кроме этого, зависит от переменного магнитного поля H_{\sim} , его частоты f , потерь на гистерезис P_r , потерь на вихревые токи P_B , других дополнительных потерь δ_d , модуля Юнга E_0 , коэффициента внутреннего трения η , массы m и поперечного сечения образца S .

$$\lambda_{\sim} = \mathcal{F}(H_-, \sigma, t, H_{\sim}, f, P_r, P_B, \delta_d, E_0, \eta, m, S) \quad (3)$$



Из сравнения (1) и (3) видно, что явление динамической магнитострикции гораздо сложнее. В связи с потерями энергии при перемагничивании динамическая магнитострикция по величине значительно меньше статической.

Характерно отметить, что исследование магнитострикции в постоянных полях проводится уже более 120 лет, по ней накоплен обширный материал, и несмотря на это статическая магнитострикция почти не получила практического приложения. Что касается магнитострикции в переменных полях, то она изучена очень слабо, и тем не менее широко применяется в технике и промышленности. 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.

Указанное практическое значение динамической магнитострикции подчеркивает важность и необходимость ее глубокого изучения.

В литературе имеется не мало исследований, связанных с магнитострикцией в переменных и пульсирующих полях. Однако эти работы имеют косвенное отношение к самому явлению динамической магнитострикции и рассматривают только его следствие. Исследование же самой динамической магнитострикции, заключающееся в изменении амплитуды колебания ферромагнетика и ее зависимости от поля и других параметров, развиты очень слабо. В этой области работы начаты примерно 10 лет назад, по ним опубликовано всего несколько статей. Такое положение объясняется сложностью явления динамической магнитострикции, отсутствием необходимой для исследования аппаратуры и достаточно разработанных методик.

Из ряда методов изучения статической магнитострикции только емкостный, после специальной доработки, оказался пригодным и применяется в настоящее время для измерения динамической магнитострикции. Основа этого метода заключается в изменении емкости измерительного конденсатора соответственно стрикции образца. В работах Ипатова /1,2,3/ емкостный метод был применен для исследования магнитострикционных колебаний образцов в виде пакетов из пермендюра и никеля в слабых постоян-

ных и переменных полях при резонансных частотах. Созданная им установка имела чувствительность 10^{-8} , погрешность измерений 6-10%.

Установка с емкостным микрометром, предназначенная для измерения динамической магнитострикции в слабых переменных полях, описана в работе Литла /4/. Чувствительность установки $\sim 10^{-7}$ погрешность измерений 4%. На этой установке Уиклендтом /5/ проведено исследование динамической магнитострикции кремнистого железа до индукций 15 кгаусс при частоте поля 60 герц.

Учитывая малую изученность динамической магнитострикции, в данной работе ставится задача - исследовать это явление в широком интервале переменных и пульсирующих полей (вплоть до насыщения) при различных частотах, т.е. исследовать зависимость:

$$\lambda_{\sim} = \varphi(H_{\sim}, H_{\sim}, f)$$

В качестве материала для исследования взято железо - один из классических ферромагнетиков, магнитострикция которого хорошо изучена в постоянных полях и совершенно не исследована в динамических режимах.

Установка

Учитывая, что в силу различных потерь динамическая магнитострикция значительно меньше статической, для проведения исследований в соответствии с поставленной задачей, была создана специальная установка высокой чувствительности. Установка позволяет измерять динамическую магнитострикцию порядка 10^{-6} - 10^{-9} и динамическую магнитострикционную восприимчивость порядка 10^{-6} - $10^{-10 \frac{1}{2}}$ в переменных полях до 45 э и в постоянных (поляризуемых) полях до 2000 э при наложении переменных (модулирующих) полей звуковых и ультразвуковых частот. Установка также позволяет измерять статическую магнитострикцию порядка 10^{-6} - 10^{-7} .

Работа установки основана на принципе модуляционной интерферометрии, разработанном Берштейном в радиопизике /6,7,8/ и

Горедиком в оптике /9/ и примененном для измерения смещений колеблющихся кристаллов Фотченковым и Желудевым /10,11/, и для измерения магнитоотрицательных деформаций Кузнецовым и Усатовым /12/. Согласно этого принципа интерференционная картина модулируется переменным полем заданной частоты и проектируется на катод фотоумножителя. По получающейся при этом переменной составляющей фототока можно определить весьма малые смещения испытуемого образца.

Установка состоит из оптической, радиотехнической и магнитной частей. Блок-схема установки представлена на рис. 1.

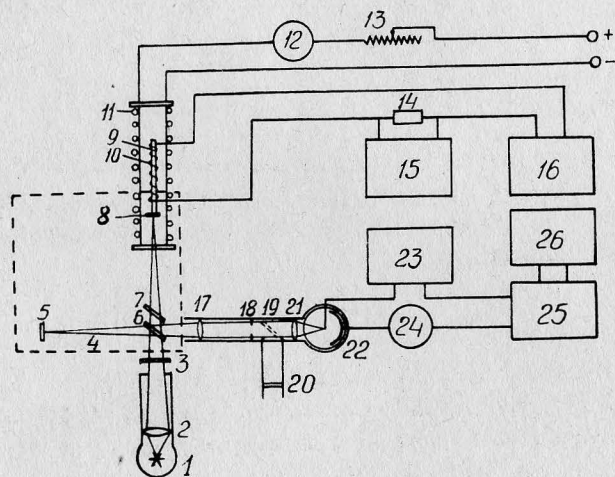


Рис. 1.

Свет от кинопроекторной лампы 1 проходит через линзу 2, светофильтр 3 и поступает в интерферометр Майкельсона 4. Пройдя плоско-параллельные стеклянные пластинки 6 и 7, пучки света отражаются от зеркал 5 и 8 и при выходе из интерферометра интерферируют. Зеркало 8 жестко прикрепляется к исследуемому образцу. Образец 9 вместе с зеркалом помещается внутри концентрически расположенных магнитных катушек. Катушка 11 создает постоянное магнитное поле напряженностью до 2000 э, сила тока при этом измеряется амперметром 12 и регулируется реостатом 13.

Намагничивающая катушка 10 служит для получения переменного поля напряженности до 45 э; она питается от звукового генератора 16. Сила тока в катушке переменного поля определяется с помощью лампового вольтметра 15 на сопротивлении 14.

Интерференционную картину, увеличенную линзой 17 в 4 раза и выделенную щелью 18, можно наблюдать на экране 20, или линзой 21 фокусировать на катод фотоумножителя 22. Интерферирующие лучи направляются на экран поворотом зеркала 19. Фотоумножитель питается от стабилизированного источника высокого напряжения 23. Постоянная составляющая фототока измеряется микроамперметром 24. При наложении на образец переменного магнитного поля, интерференция модулируется и создает на фотоумножителе переменную составляющую фототока, которая поступает в селективный измерительный приемник 25, детектируется и измеряется. Электронный осциллограф 26, включенный на входе измерительного приемника служит для наблюдения сигнала переменной составляющей и шумов, и позволяет контролировать правильность работы установки.

Селективный измерительный приемник представляет собой резонансный ламповый милливольтметр переменного тока с регулируемой частотой в пределах от 30 до 300000 гц. Ширина полосы пропускания в диапазоне от 30 до 10000 гц равна 5 ± 1 гц., и в диапазоне от 10 кгц до 300 кгц 50 ± 10 гц.

Образец

Исследуемый образец, изготовленный из железа армко, имеет размеры : длина 80 мм, диаметр 1,5 мм. Конструкция его крепления показана на рис. 2.

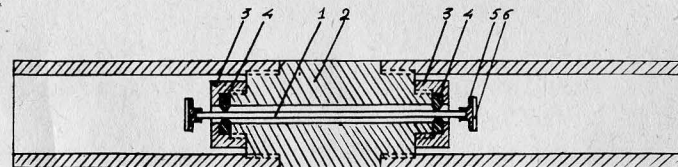


Рис. 2.

Образец I помещается в трубке из оргстекла 2 и свободно лежит на двух точках опоры-резиновых кольцах 4, которые крепятся гайками 3. На оба конца образца приклеиваются клеем БФ-2 держатели зеркала 5 и зеркальца 6.

К образцу предъявлялись следующие требования:

1. наименьшее возможное значение размагничивающего фактора ;
2. образец должен быть достаточно массивным и упругим, чтобы вес зеркальца и его держателя не оказывал влияния на амплитуду колебания;
3. с другой стороны он должен быть достаточно тонким, чтобы промагничиваться переменным полем.

Первым двум требованиям образец удовлетворял, а третье требование в области максимальной проницаемости ($\mu = 1500 - 3880 \frac{\text{ГС}}{\text{э}}$) выполнялось не полностью.

Перед исследованием образец отжигался при температуре 1000-1100°C в течение 4-х часов в вакууме. Его рентгеноструктурное исследование показало отсутствие текстуры.

Модуляционно-интерференционный метод измерения динамической магнитострикции

Интерференция поворотом зеркала I9 проектируется на контрольный экран 20 (рис. I) Щелевой диафрагмой I8 выделяется темная полоса, имеющая наибольшую контрастность. Затем зеркало поворачивается и эта полоса направляется на фотоумножитель 22. Для постоянной составляющей фототока поочередным перекрыванием лучей, идущих от зеркал 5 и 8 интерферометра, микроамперметром 24 проверяется условие:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \frac{1}{2} (\bar{I}_{\text{макс}} + \bar{I}_{\text{мин}}),$$

где \bar{I}_1 и \bar{I}_2 - фототоки лучей от зеркал 5 и 8 интерферометра ; $\bar{I}_{\text{макс}}$, $\bar{I}_{\text{мин}}$ - фототоки от максимума и минимума освещенности интерференционной полосы. Это условие определяет

линейную зависимость между током на выходе фотоумножителя и интенсивностью света. Оно же дает значение средней точки, расположенной на линейном участке между максимумом и минимумом интерференционной полосы (рис. 4). Средняя точка является рабочей точкой, на которой измеряется амплитуда колебания образца. Поскольку прямолинейный участок равен $\sim 1/4 \lambda'$, максимальная амплитуда измеряемых колебаний на установке не должна превышать этой величины. При значениях амплитуды больше $\frac{1}{4} \lambda'$ нарушается прямолинейная зависимость между фототоком и интенсивностью света и результаты измерений искажаются.

После проверки вышеприведенного условия включается постоянное и переменное магнитные поля, или одно переменное, в зависимости от условий опыта. Модулирующее поле, поданное на образец, заставляет его вместе с зеркалом совершать периодические колебания вследствие магнитострикции. С этой же частотой интерференционная картина будет перемещаться около средней точки и создаст переменную составляющую фототока. В тот момент, когда микроамперметр покажет постоянную составляющую фототока в средней точке, милливольтметр селективного измерительного приемника 25 (настроенного на частоту колебания образца) покажет напряжение переменной составляющей фототока на нагрузочном сопротивлении. Амплитуда магнитострикционного колебания образца определяется согласно [8] по формуле :

$$\Delta \rho_k = \frac{\lambda' V}{\sqrt{2} \pi R (\bar{I}_{\text{макс}} - \bar{I}_{\text{мин}})} \quad (4)$$

где

- $\lambda' = 5470 \text{ \AA}$ - длина волны монохроматического света;
- R - нагрузочное сопротивление;
- $\bar{I}_{\text{макс}}$ и $\bar{I}_{\text{мин}}$ - фототоки, соответствующие максимуму и минимуму освещенности интерференционной полосы;
- V - напряжение переменной составляющей фототока, измеряемое милливольтметром селективного измерительного

приемника на нагрузочном сопротивлении, которое вместе с входным сопротивлением приемника тщательно измерено при различных положениях делителя, стоящего на входе. Это сопротивление и входит в расчетную формулу (4).

Чувствительность при измерении динамической магнитострикции составляет $4 \cdot 10^{-10}$, погрешность 5-10%.

Колебание образца в переменном поле схематично показано на рис. 3 а.

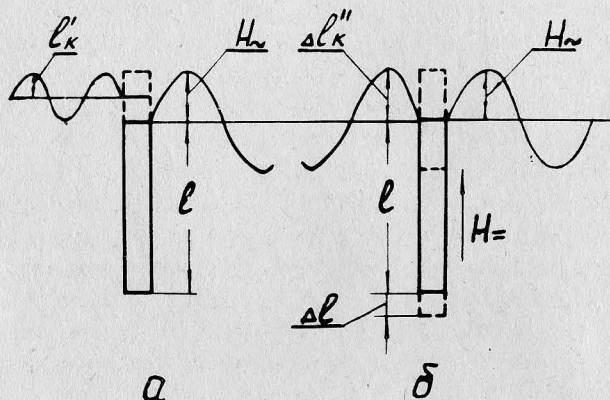


Рис. 3.

В силу четности эффекта магнитострикции образец будет колебаться на двойной частоте поля. Изменение его длины равно удвоенной амплитуде $2 \Delta l'_k$. Учитывая, что образец находится в держателе в свободном состоянии и совершает колебания в обе стороны одинаково, то полное изменение его длины будет равно $4 \Delta l'_k$. Отсюда динамическая магнитострикция в переменном поле в соответствии с (2) выразится:

$$\lambda_{\sim} = \frac{\Delta l_{\sim}}{l} = \frac{4 \Delta l'_k}{l} \quad (5)$$

где $\Delta l'_k$ - амплитуда колебания образца в переменном поле определяется из формулы (4).

Поскольку изменение длины образца, в этом случае, соответствует амплитуде переменного поля, то для магнитострикционной восприимчивости получим:

$$\chi_{\lambda_{\sim}} = \frac{\lambda_{\sim}}{H_{\sim}} \quad (6)$$

В пульсирующем поле при $H_{\sim} < H_0$ колебание образца будет происходить по схеме, изображенной на рис. 3б. Вследствие суперпозиции полей здесь образец колеблется с заданной частотой переменного поля. Под влиянием постоянного и переменного поля возникает статическая и динамическая магнитострикция. Динамическую магнитостриксию в пульсирующем поле обозначим в отличие от динамической магнитострикции в переменном поле, через $\Delta \lambda_{\sim}$, т.к. она является дополнительной величиной к статической. Образец будет также колебаться в обе стороны с удвоенной амплитудой. Отсюда по аналогии с (5) получим:

$$\Delta \lambda_{\sim} = \frac{4 \Delta l''_k}{l} \quad (7)$$

где $\Delta l''_k$ - амплитуда колебания образца в пульсирующем поле, определяется из формулы (4).

Поскольку в пульсирующем поле изменение длины образца соответствует двойной амплитуде переменного поля, то магнитострикционная восприимчивость будет иметь вид:

$$\chi_{\Delta \lambda_{\sim}} = \frac{\Delta \lambda_{\sim}}{\Delta H_{\sim}} \quad (8)$$

где $\Delta H_{\sim} = 2 H_{\sim}$.

Из схемы колебания образца (рис. 3) можно заключить, что для области слабых полей, где зависимость $\lambda = \varphi(H)$ близка к линейной и при условии $H_0 = H_{\sim}$, амплитуда колеба-

ния образца в пульсирующем поле будет в 2 раза больше, чем в переменном: $\Delta l_k'' = 2 \Delta l_k'$. Отсюда и динамическая магнитострикция в пульсирующем поле будет в 2 раза больше магнитострикции в переменном поле.

Интерференционно-фотометрический метод измерения статической магнитострикции

Параллельно измерению динамической магнитострикции, как было указано выше, на установке можно измерять и статическую магнитострикцию. В основу статических измерений положен метод Розинга / 13/, согласно которому магнитострикция определялась, как величина пропорциональная числу интерференционных полос прошедших через поле зрения вследствие изменения длины образца.

Существенным отличием данного метода от метода Розинга, является то, что интерференционная картина проектируется на электронный фотоумножитель и по фототоку определяется магнитострикция. При этом перемещение образца происходит в пределах одной интерференционной полосы, вследствие чего повышается чувствительность и точность измерений.

Интерференционная картина полос равного наклона проектируется на экран 20 (рис. 1). Щелью 18 выделяется примерно десятая часть ширины наиболее контрастной полосы. Затем поворотом зеркала 19 интерференцию направляют на фотоумножитель и микроамперметром 24 определяют фототоки $I_{\text{макс}}$ и $I_{\text{мин}}$, соответствующие максимуму и минимуму освещенности интерференционной полосы. Участок между максимумом и минимумом и используется для измерения. Он соответствует половине длины волны монохроматического света, который дает светофильм 3. С помощью микрометрического винта, передвигая интерференционную полосу, устанавливают фототок i_1 . В катушку II включается постоянный ток, создающий магнитное поле. Образец намагничивается и изменяет свою длину. Это ведет к смещению интерференции, значение фототока будет i_1' .

После этого снова измеряют $I_{\text{макс}}$ и $I_{\text{мин}}$ и фототок i_2 , повышают напряженность постоянного поля и измеряют фототок и т.д. до необходимого, по условиям опыта, значения магнитного поля.

Изменение фототока будет пропорционально изменению размера образца в единицах длины волны монохроматического света.

Распределение освещенности интерференционной полосы согласно / 14/ выражается известной формулой:

$$A^2 = 4a^2 \cos^2 \frac{\pi l h}{\lambda D}, \quad (9)$$

где

- a - амплитуда волны монохроматического света;
- l - расстояние между двумя когерентными источниками света;
- h - координата, в зависимости от которой изменяется освещенность;
- λ - длина волны монохроматического света;
- D - расстояние от когерентных источников до экрана.

Учитывая, что фототок пропорционален освещенности, а максимум и минимум фототока измеряются микроамперметром, по аналогии с формулой / 9/ можно написать:

$$I = I_0 \sin d$$

Если построить синусоиду с периодом (по оси абсцисс) равным длине волны монохроматического света (для нашей установки $\lambda' = 5470 \text{ Å}$), а по ординат отложить изменение фототока от максимума до минимума, то по изменению фототока можно определить магнитострикцию образца.

Представим это графически (рис. 4)

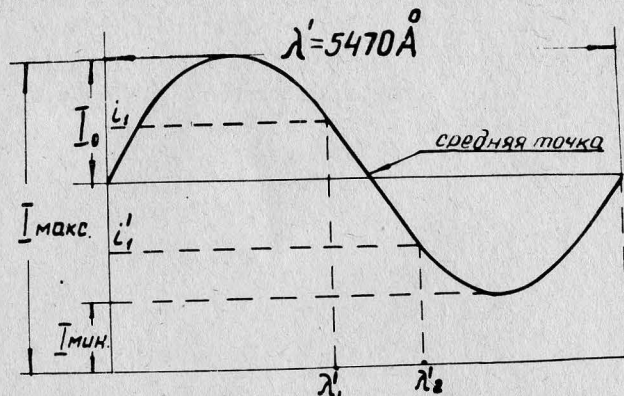


Рис. 4.

Из графика следует:

$$I_{\max} - I_{\min} = 2I_0; \quad I_0 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2}$$

Без постоянного поля фототок i_1 соответствует фиксированному положению образца, определяемому значением λ'_1 . После включения постоянного поля $H_{=1}$ интерференционная полоса относительно щелевой диафрагмы переместится и значение фототока будет i'_1 , соответствующее λ'_2 . Следовательно, изменение длины образца под действием магнитного поля определится:

$$\Delta l_1 = \lambda'_2 - \lambda'_1$$

Учитывая, что образец находится в свободном положении, опираясь своим весом на 2 резиновых кольца и удлиняется (укорачивается) одинаково в обе стороны, то магнитострикция выразится:

$$\text{для } H_{=1} \quad \lambda_1 = \frac{2\Delta l_1}{e}$$

$$\text{для } H_{=2} \quad \lambda_2 = \frac{2(\Delta l_1 + \Delta l_2)}{e}$$

2552

$$\text{для } H_{=3} \quad \lambda_3 = \frac{2(\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3)}{e}$$

и т.д.

Чувствительность метода 10^{-7} . Погрешность измерений 10%.

Магнитострикция в переменном поле.

Как было указано выше, вследствие потерь на гистерезис, вихревые токи, магнитную вязкость и внутреннее трение, динамическая магнитострикция по своей величине должна быть значительно меньше статической. Согласно /15/ в слабых полях при сравнительно низких частотах потери на гистерезис являются постоянной для каждого ферромагнетика величиной, а потери на вихревые токи имеют наименьшее значение. В связи с этим измерение динамической магнитострикции железа проводилось при низких частотах и небольших полях.

На рис. 5 представлены кривые статической и динамической магнитострикции. λ_{\sim} было снято в переменном поле частотой 80 герц.

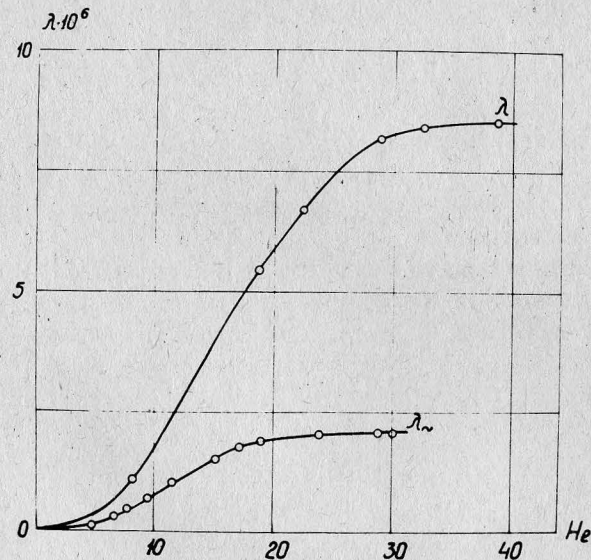


Рис. 5.

2552

Характер кривых один и тот же, однако по величине статическая магнитострикция в несколько раз больше динамической. Причиной этого, наряду с другими потерями, является не полное промагничивание образца.

Согласно теории Акулова и Кондорского / 16 / для ферромагнетиков в области смещения существует квадратичная зависимость статической магнитострикции от намагниченности. Это подтверждено экспериментально Джиренциным для поликристаллического никеля / 17 / . Для железа, в соответствии с этой теорией, можно записать:

$$\lambda = \frac{3}{5} \lambda_{100} \frac{\mathcal{T}^2}{\mathcal{T}_s^2}, \quad (I0)$$

где λ_{100} - магнитострикция насыщения в монокристалле железа в направлении [100];

\mathcal{T} - намагниченность в постоянном поле;

\mathcal{T}_s - намагниченность насыщения.

Обозначим постоянные величины в (I0) через

$$\mathcal{A} = \frac{3}{5} \frac{\lambda_{100}}{\mathcal{T}_s^2}, \quad (II)$$

тогда получим:

$$\lambda = \mathcal{A} \mathcal{T}^2. \quad (I2)$$

На рис. 6 представлено изменение статической и динамической магнитострикции от \mathcal{T}^2 .

Обе магнитострикции имеют линейную зависимость. λ_n (прямая II) снималась в переменном поле частоты 30 гц. Вследствие потерь, в основном на гистерезис, прямая динамической магнитострикции имеет более пологий ход чем статическая.

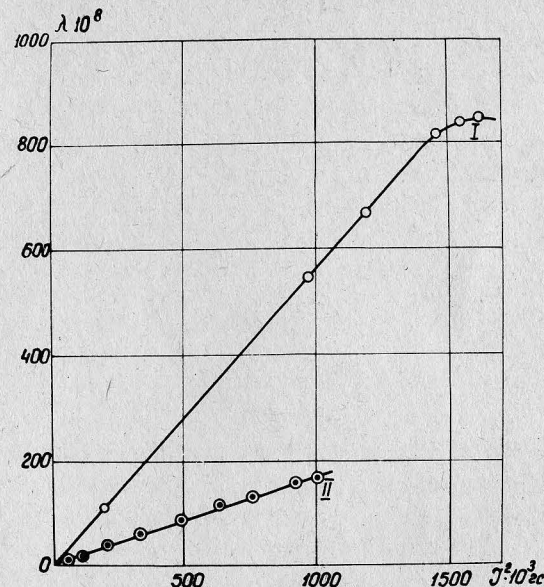


Рис. 6.

Ипатовым /2/ 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, приведенную на рис. 6. Следовательно, по аналогии с (I2) можно записать:

$$\lambda_n = \mathcal{A}_n \mathcal{T}_n^2 \quad (I3)$$

В соответствии с (I2) и (I3) из графиков получим:

$$\mathcal{A} = 5,65 \cdot 10^{-12} 1/2c^2; \quad \mathcal{A}_n = 1,65 \cdot 10^{-12} 1/2c^2$$

Очевидно выражение

$$\mathcal{A} - \mathcal{A}_n = 4 \cdot 10^{-12} 1/2c^2$$

будет характеризовать потери, возникающие в динамических

режимах; чем больше потери при перемагничивании, тем меньше d_n .

В выражении (II) величины λ_{100} и \mathcal{I}_S являются постоянными, они не меняются и при динамических режимах. Относительно λ_{100} это подтверждено экспериментом, проведенным в области подхода к насыщению, на описанной выше установке в пульсирующем поле частотой 65 герц. В то же время $d_n < d$, следовательно числовой коэффициент в (II) равный 3/5 и справедливый для статической магнитострикции, в динамических режимах должен быть также меньше. Из экспериментальных данных:

$$d_n = 1,65 \cdot 10^{-12} \text{ 1/2c}^2; \quad \lambda_{100} = 15,5 \cdot 10^{-6};$$

$$\mathcal{I}_S = 1670 \text{ 2c}.$$

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

$$\frac{d_n \cdot \mathcal{I}_S^2}{\lambda_{100}} \approx \frac{3}{10}.$$

На рис. 7 показана зависимость динамической магнитострикции

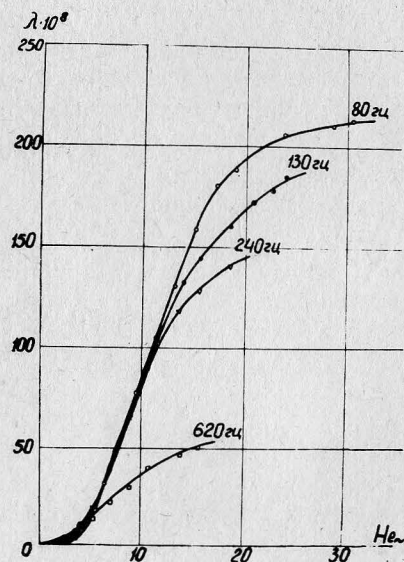


Рис. 7.

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 потери на вихревые токи 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 зависимости 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, высшие гармоники будут содержаться в магнитной индукции /18/.

Исследование образца в поле до 16 э частотой 30 гц. показало наличие 5 гармоник магнитострикции. Основная величина магнитострикции характеризуется первой гармоникой; результаты измерений на этой гармонике и отражены в приведенных графиках. Магнитострикция на второй гармонике имеет наибольшую величину при 16 э и составляет около 10% от значения λ_n на первой гармонике. Соответственно 3, 4 и 5 гармоники составляют 7, 2 и 1 %. Отсюда можно заключить, что величина магнитострикции образца во внешнем поле до 16 э отражается первой гармоникой, а возможные изменения от последующих гармоник не значительны и практически не выходят за пределы ошибок измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.Г.Ипатов. Измерение высокочастотных деформаций конденсаторным методом. Труды Воронежского гос. зооинститута, ХУ, 478, 1956.
2. Л.Г.Ипатов. Колебание ферромагнетика в переменном магнитном поле. Журнал технической физики, т. XXIX, в. 5, 662, 1959.
3. Л.Г.Ипатов. О магнитных характеристиках ферромагнетика при колебательном режиме. Журнал технической физики, т. XXX, в. 6, 685, 1960.
4. C.W.Little Instrumentation for the rapid measurement of magnetostriction at low alternating field intensities. Conf. Magnet. and Magnet. (Boston Mass 1956) New-York.
5. D.A.Wycklend. A survey of magnetostriction at low alternating field intensities in silicon iron. Conf. Magnet. and Magnet. Mater. (Boston Mass 1956) New-York.
6. И.Л.Берштейн. Опыт Саньяка на радиоволнах. ДАН СССР, 75, 5, 635, 1950.
7. И.Л.Берштейн. Об измерении весьма малых изменений разности хода двух световых колебаний. ДАН СССР, 94, 4, 655, 1954.
8. И.Л.Берштейн. Исследование весьма малых изменений разности фаз в радио и оптике. Докторская диссертация. институт радиотехники и электроники АН СССР, 1955.
9. Г.С.Горелик. О применении модуляционного метода в оптической интерферометрии. ДАН СССР, 83, 4, 549, 1952.
10. А.А.Фотченков. Установка для измерения весьма малых смещений колеблющихся кристаллов. Кристаллография, 2, 5, 653, 1957.
11. И.С.Желудев, А.А.Фотченков. Электрострикция линейных диэлектриков. Кристаллография, 3, 3, 1958.
12. В.В.Кузнецов, В.У.Усатов. измерение периодических магнито-стрикционных деформаций. Приборы и техника эксперимента, 3, 157, 1962.

13. В.Л.Розинг. ИРФХО (часть физ.), 26, 253, 1894.
14. Г.С.Ландсберг. Оптика. Гостехиздат, 51, 1940.
15. А.И.Рабкин. Высокочастотные ферромагнетики. Физматгиз, 54, 56, 1960.
16. Н.С.Акулов и Е.И.Кондорский. ЖЭТФ, 3, 109, 1933.
17. К.П.Белов. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. Гостехтеориздат, 71, 1957.
18. К.М.Поливанов. Ферромагнетики. Госэнергоиздат, 73, 1957.
19. Л.В.Киренский, В.Е.Кузнецов, В.У.Усатов. Динамическая магнитострикция железа. Изд. ВИНТИ, 1964.
20. Н.С.Акулов. Ферромагнетизм. Госиздат, 1939.
21. Г.П.Дьяков. Известия АН СССР, т.21, 8, 1957.
22. E.W.Lee. Proc.Phys.Soc., A67, 381, 1954.
23. E.W.Lee. Phys.Soc., 18, 209, 1955.
24. Г.П.Дьяков. Современное состояние вопроса по исследованию четных эффектов в области подхода к насыщению. Магнитная структура ферромагнетиков (материалы Всесоюзного совещания), 227, 1960.
25. И.Л.Гуськова. Определение констант магнитострикции железа на поликристаллическом образце. Магнитная структура ферромагнетиков (материалы Всесоюзного совещания), 241, 1960.
26. Р.М.Бозорт. Ферромагнетизм, 518, 1956.
27. Р.М.Бозорт. Ферромагнетизм, 518, 1956.
28. Релей. Теория звука. Госиздат, т.1, 264, 1955.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Л.В.Киренский, В.Е.Кузнецов, В.У.Усатов	
Динамическая магнитострикция железа	I.
Установка	3.
Образец	5.
Модуляционно-интерференционный метод	
измерения динамической магнитострикции . .	6.
Интерференционно-фотометрический метод	
измерения статической магнитострикции . .	10.
Магнитострикция в переменном поле . . .	13.
В.Е.Кузнецов.	
Магнитострикция железа в пульсирующих полях . .	18.
Литература	27.