

**ПОЛУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ПЕТЛИ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ  
ТОНКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАЗЦА**

А. И. ГРУЗНОВ, И. Г. ЛЕЩЕНКО, Б. Б. ВИНОКУРОВ

Распределение амплитуды и фазы магнитного потока в прямых цилиндрических образцах бесконечной длины, находящихся в бесконечно длинном соленоиде, было вычислено в [1]. Результаты вычислений сводятся, в основном, к следующему:

а — непосредственно под поверхностью образца нет временного отставания между индукцией и напряженностью магнитного поля;

б — внутреннее поле равно внешнему полю;

в — если в заданный момент времени приложить к образцу постоянное внутреннее поле, то нарастание индукции на некотором расстоянии от поверхности образца будет происходить с определенным отставанием во времени, и конечного значения по всему объему индукция достигает асимптотически без колебаний.

При перемагничивании образца в переменном поле, ввиду монотонного изменения амплитуды и фазы напряженности в глубь образца, всегда можно выделить верхний слой образца такой глубины, напряженность в любой точке которого с любым малым допущением равна напряженности на поверхности. Перемагничивание данного слоя на не слишком высоких частотах, когда явлением магнитного последствия можно пренебречь, будет происходить по статической петле.

Для получения данной петли на экране осциллографа необходимо иметь два напряжения, одно из которых было бы пропорционально напряженности в слое, а другое — его индукции.

В качестве первого напряжения можно использовать падение напряжения на активном сопротивлении от тока перемагничивающего соленоида, протекающего через него. Как получить второе напряжение, будет видно из описания предлагаемой схемы установки и экспериментальных результатов, полученных на ней.

Ферромагнитный образец (рис. 1) перемагничивается одновременно в низкочастотном поле, амплитуда которого достаточна для модуляции магнитной проницаемости образца, и в высокочастотном поле с настолько малой амплитудой, что в отношении его образец является линейным элементом. Низкочастотное поле создается соленоидом, питающимся от сети, 50 гц, а высокочастотное (200 кгц) — узкой катушкой.

Фильтр-пробка служит для того, чтобы не пропустить от генератора ток второй гармоники (400 кгц), сопротивление  $R$  обеспечивает режим заданного тока. Селективный усилитель вольтметра В6-1 и осциллограф С1-19 позволяют наблюдать временное изменение сигнала второй гармоники  $E_{2\omega}$ , возникающего в измерительной катушке  $W_2$  при одновременном действии на образец указанных полей.

Результаты экспериментов показывают, что огибающая сигнала второй гармоники в области небольших подмагничивающих низкочастотных полей представляет собой абсолютное значение скорости

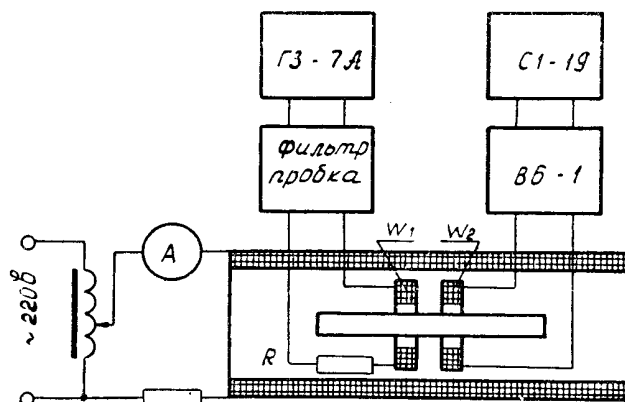


Рис. 1

изменения низкочастотной индукции в том слое, в который проникает высокочастотная компонента поля. Действительно:

1. Сигнал  $E_{2\omega}$  два раза за период низкочастотного поля проходит через ноль. Если в качестве образца взять трубку с очень тонкой стенкой и продольным разрезом (статическая и динамическая петли будут близки друг к другу), то можно установить следующее. Моменты прохождения сигнала  $E_{2\omega}$  через ноль соответствуют точкам  $\pm B_m$  на динамической (статической) петле. В точках  $\pm B_m$  скорость изменения низкочастотной индукции  $\frac{dB}{dt}$  также равна нулю. Одновременно уста-

навливаем, что моментам прохождения  $E_{2\omega}$  через максимум для того же образца на петле соответствуют точки  $\pm H_c$ .

При перемагничивании сплошного цилиндрического образца из проводящего ферромагнитного материала (динамическая и статическая петли значительно отличаются друг от друга) точки  $E_{2\omega} = 0$  и  $E_{2\omega} = E_{2\omega, \max}$  смещаются относительно точек  $B_{\text{дин}}^{\text{динам}}$  и  $H_{\text{дин}}$  по ходу часовой стрелки, что и следовало ожидать. Действительно, характерные точки на петле перемагничивания поверхностного слоя проходят раньше, чем те же точки для динамической петли.

Данная часть эксперимента проводилась на двух осциллографах. На экране одного осциллографа была получена динамическая петля, на экране другого — временная развертка сигнала  $E_{2\omega}$ . Схема синхронной подцветки позволяла высвечивать на экранах осциллографов точки одного и того же времени.

2. Сигнал  $E_{2\omega}$  отсутствует при подмагничивании образца постоянным полем ( $\frac{dB}{dt} = 0$ ) и появляется при подмагничивании переменным полем ( $\frac{dB}{dt} \neq 0$ ). Строго говоря, сигнал  $E_{2\omega}$  появляется и при подмагничивании постоянным полем, но величина его на несколько порядков меньше. При перемагничивании в указанных полях неферромагнитных образцов сигнал двойной частоты не возникает.

3. На ферромагнитный образец тороидальной формы нанесена толстым медным проводом подмагничивающая обмотка. На небольшом участке образца, свободном от обмотки, помещаются две короткие катушки  $W_1$  и  $W_2$  высокочастотного датчика. Подмагничивающая обмотка

подключается к источнику синусоидального напряжения. В этом случае перемагничивание верхнего слоя образца происходит в режиме синусоидальной индукции. Если огибающая сигнала второй гармоники

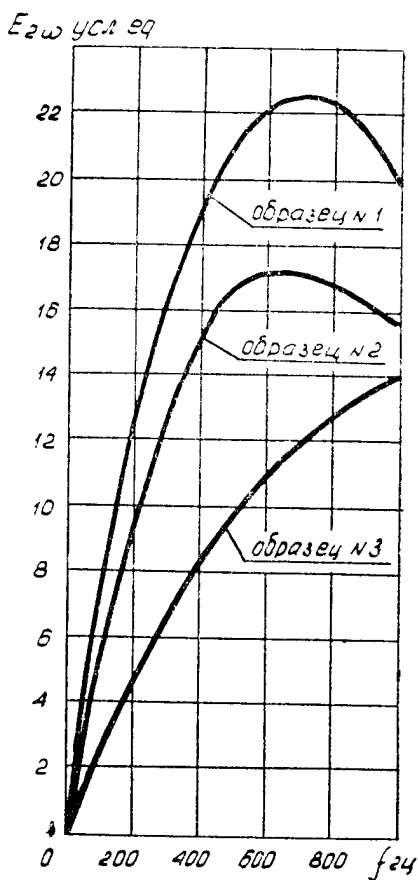


Рис. 2.

является скоростью изменения низкочастотной индукции в поверхностном слое образца, то она должна иметь синусоидальную форму. Действительно, протектировав сигнал  $E_{2\omega}$ , подадим его в канал У осциллографа, а в канал X — напряжение от источника питания подмагничивающей обмотки, фазу которого можно изменять. При определенной фазе этого напряжения на экране получается изображение сломанной пополам прямой линии (V). Излом линии происходит потому, что протектированный сигнал второй гармоники имеет форму однопольных полувольт синусоиды.

4. Сохраняя неизменной величину подмагничивающего тока в эксперименте 3, будем изменять его частоту. В этом случае скорость изменения низкочастотной индукции в поверхностном слое должна линейно возрастать с частотой. Если сигнал  $E_{2\omega}$  есть скорость изменения индукции поверхностного слоя, то значение этого сигнала, измеренное селективным вольтметром В6-1, также линейно должно зависеть от частоты. Данные этого эксперимента приведены на рис. 2. Из графиков видно, что до частоты подмагничивания порядка 200 гц зависимость действительно является линейной. Наличие максимума и последующий спад сигнала объясняется тем, что боковые его

частоты, имеющие вид  $\pm k\omega$ , при больших частотах подмагничивания ( $\Omega$ ) начинают выходить за пределы полосы пропускания избирательного усилителя вольтметра. В итоге в полосе прозрачности усилителя может остаться только несущая частота  $2\omega$ .

5. К сожалению, нет возможности измерить действительное значение статистической коэрцитивной силы поверхности образца, с которым можно было бы сравнить мгновенные значения тока подмагничивания, соответствующие максимуму второй гармоники, т. е. значения, которые, как мы считаем, характеризуют статическую коэрцитивную силу поверхностного слоя. Правда, можно ожидать наличия корреляционной связи между коэрцитивной силой поверхности и, следовательно, между мгновенными значениями указанного тока, и коэрцитивной силой всего образца. Действительно, такая связь имела место (рис. 3).

6. Петля перемагничивания верхнего слоя, полученная на экране осциллографа по блок-схеме, изображенной на рис. 4, всегда получалась уже соответствующей динамической петле. В блок-схеме использованы следующие обозначения:

И — электронный интегратор, АД — амплитудный детектор, ИУ — избирательный усилитель, СП — синхронный переключатель.

Схема позволяла получать на экране то статическую, то динамическую петлю.

7. Известно, что статическая коэрцитивная сила никелевого образца при растяжении увеличивается [2]. Получая последовательно на экране статическую петлю и динамическую петлю никелевого образца и подвергая его растяжению, отмечаем, что статическая петля расширяется, а динамическая суживается. Уменьшение динамической коэрцитивной силы, связанной с потерями на гистерезис и вихревые токи, происходит вследствие уменьшения потерь на вихревые токи, обусловленных снижением магнитной проницаемости никеля при растяжении.

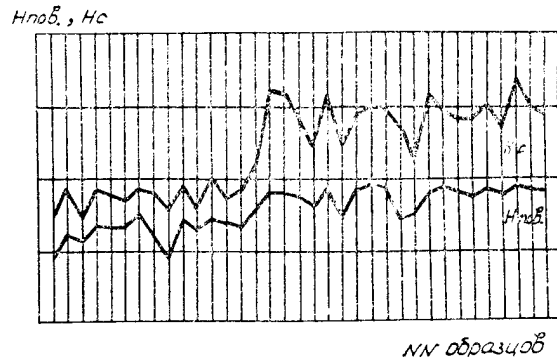


Рис. 3

Статическая коэрцитивная сила часто имеет однозначную связь с различными металлургическими и физическими характеристиками изделия. Получая возможность производить измерения статической коэрцитивной силы на поверхности изделия, можно будет вести конт-

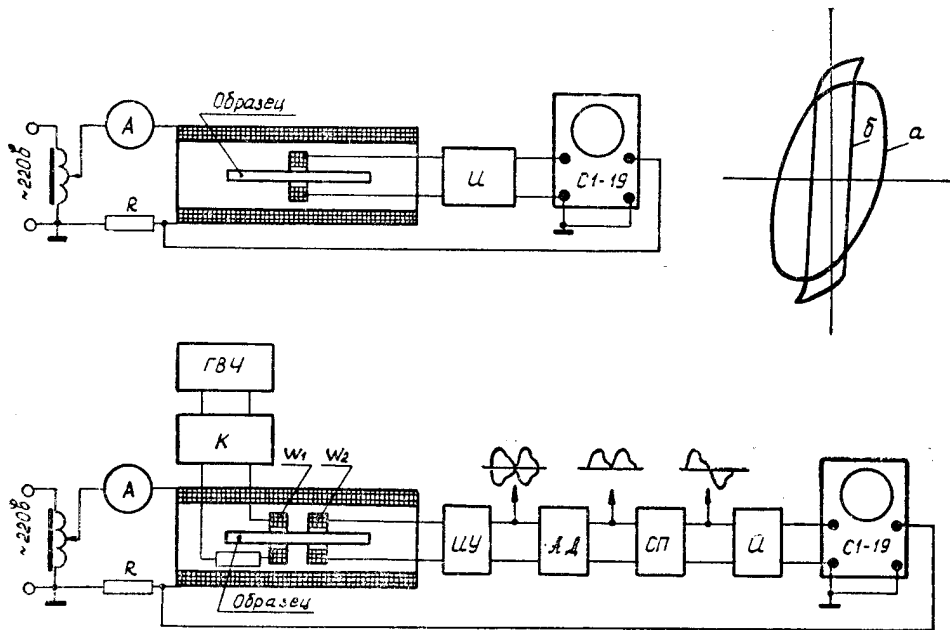


Рис. 4

роль указанных характеристик исключительно для верхнего слоя изделия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. Л. Скотт, Proc. Inst. Radio Eng. 18, 1750 (1930) Bell Syst. Techn. Publ. В 620.
2. К. П. Белов. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных материалах. ГТТИ, М.-Л., 1951.
3. А. М. Грузнов, Б. Б. Винокуров, И. Г. Лещенко. Влияние упругих напряжений на величину второй гармоники высокочастотного поля при суперпозиции параллельных полей разных частот и амплитуд. Изв. ТПИ, том 194 (в печати).