

УДК 620.179.14

**МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ ТОНКОГО СЛОЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА****В.В. Букреев, А.П. Чурносков, С.Н. Швец**

*Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля,  
кв. Молодежный, 20а, г. Луганск, 91034, тел./факс: +380 (0642) 41-31-60,  
e-mail: prilad@snu.edu.ua*

*Приведені результати розробки магнітометричної установки, що призначена для вимірювання магнітних параметрів плівок. У якості магніточутливого елемента використовується феррозонд. Викладені розрахункові співвідношення, які дозволяють визначити намагніченість за величиною напруженості поля розсіювання. Приведені результати вимірювань.*

*Ключові слова: магнітні характеристики, котушка індуктивності, феррозонд, вимірювання, магнітні поля, намагніченість, коефіцієнт передачі.*

*Приведены результаты разработки магнитометрической установки, предназначенной для измерения магнитных параметров пленок. В качестве магниточувствительного элемента используется феррозонд. Изложены расчетные соотношения, позволяющие определить намагниченность по величине напряженности поля рассеяния. Приведены результаты измерений.*

*Ключевые слова: магнитные характеристики, катушка индуктивности, феррозонд, измерения, магнитные поля, намагниченность, коэффициент передачи.*

*The results of magnetometer installation design are given. The installation is designed to calculate magnetic characteristics of the magnetic layer. Flux gate is used as a magnetic susceptible element. Calculation relations are shown. They let identify magnetization according to extraneous field density value. The results of measurements are shown.*

*Key words: magnetic characteristics, inductance coil, flux gate, measurements, magnetic fields, magnetization, transfer constant.*

При виброупрочнении верхнего слоя ферромагнитных изделий контроль твердости и толщины слоя выполняется магнитными приборами. Для определения их метрологических характеристик требуются данные о магнитных параметрах упрочненного слоя материала. Для измерения магнитных параметров поверхностного слоя подвергающиеся обработке образцы стравливаются до толщины упрочненного слоя 0,05 – 0,3 мм, из них вырезаются пластины размерами 20x2x(0,05-0,3) мм, магнитные свойства которых в дальнейшем определяются. В процессе виброобработки магнитные параметры упрочненного слоя изменяются, поэтому необходимо исследовать несколько образцов на разных этапах виброобработки. Магнитные параметры – магнитная проницаемость и коэрцитивная сила верхнего слоя металла в процессе виброобработки изменяются на 20-40%. Сложность контроля заключается в том, что геометрические размеры образцов не позволяют производить контроль в

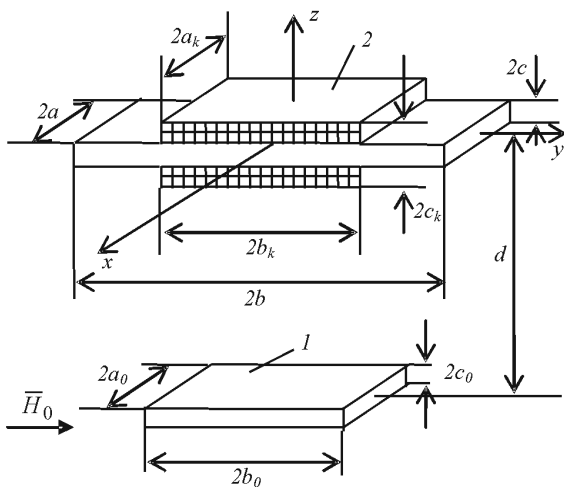
замкнутой магнитной цепи, поскольку образец является по геометрической форме пленкой. Поэтому магнитные измерения необходимо производить при размещении образцов в магнитном поле соленоидов. Погрешность измерений не должна превышать 5-8%.

Поскольку для контроля пластин требуются специальная магнитоизмерительная аппаратура, в настоящей работе приводятся результаты ее разработки и использования.

Целью работы является разработка магнитометрической аппаратуры для измерения магнитных параметров тонких ферромагнитных пластин (пленок).

Блок-схема магнитометрической установки показана на рис. 1. Исследуемый образец 2 помещается в одной из катушек 1. Измерительный феррозонд 3 размещается между катушек. Токи в катушках намагничивания 1 протекают в противоположных направлениях, поэтому в отсутствие образца теоретически напряженность поля в месте расположения

феррозонда 3 равна нулю. При размещении образца 2 в одной из катушек баланс нарушается и напряженность магнитного поля в сердечнике феррозонда 3 будет зависеть от намагниченности образца. Феррозонд 4 необходим для компенсации внешних магнитных полей. Корректирующая катушка 5 сводит к нулю поле небаланса катушек. Феррозонды 3 и 4 также имеют компенсационные обмотки. Феррозонды 3 и 4 возбуждаются током частотой 25 кГц. Генератор возбуждения, удвоитель частоты и синхронный детектор традиционны для ферромагнитных магнитометров второй гармоники [1].



1 – катушки; 2 – образец; 3 – измерительный феррозонд; 4 – компенсационный феррозонд;  
5 – корректирующая катушка;  
ДУ – дифференциальный усилитель;  
СД – синхронный детектор; УПТ – усилитель постоянного тока; И – индикатор;  
Г – генератор; УЧ – удвоитель частоты;  
БПК – блок питания катушек

**Рисунок 1 – Блок-схема магнитометрической установки**

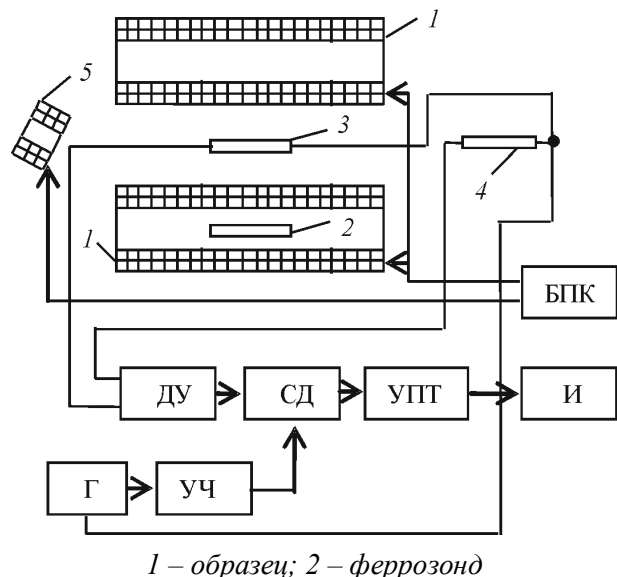
Катушки имеют прямоугольное сечение для возможности создания однородного магнитного поля между ними. Корректирующая катушка 5 имеет возможность поворачиваться вокруг оси, что позволяет изменять величину и направление корректирующего магнитного поля. Сердечники феррозондов имеют следующие размеры: 20x2x0,05 мм. Из-за малости размеров сердечников феррозондов последние практически не оказывают влияние на магнитное состояние образца и на топографию магнитного поля в окружающем его пространстве. Внешнее магнитное поле в месте

расположения феррозонда 3 компенсируется до величины  $10^{-3}$  А/м при поле в соленоиде  $10^4$  А/м. Расстояние между измерительным и компенсирующим феррозондами составляет 0,18 м. Каждый ферроэлемент феррозонда имеет обмотки возбуждения (измерительную и компенсирующую). Обмотка возбуждения длиной 10 мм содержит 20 витков провода диаметром 0,1 мм. Амплитуда поля возбуждения в несколько раз превышает оптимальную с целью снижения уровня шумов. Измерительная обмотка расположена в центре сердечника, ее длина 5 мм и она содержит 100 витков провода диаметром 0,05 мм. Чувствительность феррозондов  $0,2 \times 10^{-3}$  В\*м/А.

Соотношение между напряженностью поля в сердечнике феррозонда, вызванной намагниченным образцом, и намагниченностью образца можно определить с помощью теоремы о взаимности [2]

$$\Phi = \frac{\mu_0}{iw} \int \bar{H} \bar{M} dV, \quad (1)$$

где  $\bar{M}$  – вектор намагниченности в объеме образца;  $V$  – объем образца;  $\bar{H}$  – напряженность магнитного поля в объеме образца, созданная полем намагниченного сердечника феррозонда, обмотка которого содержит  $w$  витков и по ней протекает ток  $i$  (рис. 2).



1 – образец; 2 – феррозонд

**Рисунок 2 – Схема расположения ферроэлементов феррозонда и образца**

Согласно схеме расположения элементов магнитной системы магнитометрической

установки, приведенной на рис. 2, составляющая напряженности поля ферроэлемента  $\bar{I}_y H_y$  совпадает с направлением намагниченности образца, созданной напряженностью поля катушки  $H_0$ , поэтому в первом приближении соотношение (1) переписывается так:

$$\Phi \approx 8\mu_0 \left( \frac{1}{b_k} + \frac{\mu_\Phi}{2b} \right) h_y M a_0 b_0 c_0, \quad (2)$$

здесь  $\mu_\Phi = \frac{m\mu}{m + \mu - 1}$  – магнитная проницаемость сердечника ферроэлемента;  $m$  – проницаемость формы сердечника ферроэлемента;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала сердечника ферроэлемента,

$$h_y = \frac{1}{\pi} \frac{2abc}{(b^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (3)$$

Напряженность магнитного поля в сердечнике ферроэлемента связана с магнитным потоком в нем следующим соотношением:

$$\Phi = 4\mu_0 H a c \mu_\Phi,$$

откуда

$$H = \frac{\Phi}{4\mu_0 a c \mu_\Phi}.$$

С учетом формул (2) и (3) можно найти величину намагниченности в сердечнике ферроэлемента

$$M = \frac{DH\mu_\Phi (b^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}{4ba_0b_0c_0 \left( \frac{1}{b_k} + \frac{h_D}{2b} \right)}. \quad (4)$$

При  $\frac{\mu_\Phi}{2b} \gg \frac{1}{b_k}$  (4) упрощается до такого вида:

$$M \approx \frac{\pi H (b^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}{2a_0b_0c_0}. \quad (5)$$

Как видно из (5), напряженность  $H$  и намагниченность  $M$  в сердечнике ферроэлемента выражаются только через геометрические параметры сердечника

феррозонда и образца, а также определяются местоположением образца относительно феррозонда. Между напряженностью магнитного поля в сердечнике феррозонда, наведенной намагниченным образцом, и намагниченностью образца существует практически линейная зависимость:

$$H = k_H M, \quad k_H = \frac{2a_0b_0c_0}{\pi(b^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (6)$$

где для практически интересных случаев

$$k_H = 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-3}.$$

Если в диапазоне напряженности измеряемого поля феррозонд имеет коэффициент передачи  $G$ , а коэффициент передачи магнитометрического канала равен  $k_M$ , то (6) переписывается так:

$$U = k_H k_M G M, \quad (7)$$

где  $U$  – выходное напряжение феррозонда.

Поскольку обычно  $G = 0,005-0,008$  (В·м)/А,  $k_M \approx 10^2$  [3], то

$$U \approx 6 \times 10^{-4} M. \quad (8)$$

Напряженность магнитного поля в материале образца рассчитывается по формуле:

$$H = H_0 - \frac{1}{m} M, \quad (9)$$

где величина проницаемости формы  $m$  пластины прямоугольного сечения рассчитывается, у свою очередь по такой формуле [3]:

$$m = \frac{4\pi b_0^2}{16a_0c_0 \left( \ln \frac{2kb_0}{2a_0 + 2c_0} - 1 \right)}, \quad (10)$$

здесь  $k=3,6$ .

Для определения параметров поверхностного слоя стали изготавливались образцы в виде пластин размерами 200x40x1 мм из стали 20 и 40Х, которые подвергались поверхностному упрочнению путем виброобработки. После виброупрочнения из образцов вырезались пластины размером 40x5x1 мм, которые стравливались до величины 0,05; 0,1; 0,15 и 0,2 мм. Для стравливания металла применялось электрополирование. Металл стравливался со стороны противоположной обработанной плоскости. На магнитометрической установке определялись

следующие магнитные параметры металла:  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $M_s$  – намагниченность насыщения;  $\chi$  – начальная магнитная восприимчивость. Результаты эксперимента приведены в табл. 1 и табл. 2.

**Таблица 1 – Магнитные характеристики упрочненного слоя металла (сталь 20)**

Время обработки, мин	$2C_0$ , мм	$\chi$	$M_s$ , А/м	$H_c$ , А/м
0	0,2	58	$1,31 \cdot 10^6$	1300
40	0,05	48	$1,22 \cdot 10^6$	1450
80	0,15	38	$1,1 \cdot 10^6$	1670
120	0,2	36	$1,02 \cdot 10^6$	1700
160	0,2	35	$0,9 \cdot 10^6$	1280

**Таблица 2 – Магнитные характеристики упрочненного слоя металла (сталь 40X)**

Время обработки, мин	$2C_0$ , мм	$\chi$	$M_s$ , А/м	$H_c$ , А/м
0	0,2	26	$1,2 \cdot 10^6$	3200
40	0,05	20	$1,08 \cdot 10^6$	3600
80	0,1	16	$0,96 \cdot 10^6$	4060
120	0,15	14	$0,9 \cdot 10^6$	4260
160	0,2	13	$0,9 \cdot 10^6$	4080

Магнитные характеристики образцов были измерены баллистическим методом. Расхождение результатов измерений не превышает 7%.

### ВЫВОДЫ

Предложен метод измерения магнитных параметров тонких ферромагнитных пластин и его приборная реализация.

1. Веденеев М.А. Высокочувствительный магнитометр с феррозондовым индикатором / М.А.Веденеев, В.Н. Дрожжина, В.А. Куликов // Сб. Исследования в области теоретического и прикладного магнетизма.- Свердловск, 1967.- С.88-95. 2. Поливанов К.М. Потокосцепление намагниченного тела и электрического контура / К.М.Поливанов // Сб. Исследования в области теоретического и прикладного магнетизма.- Свердловск, 1963.- С.186-189. 3. Жученко Н.А. К расчету магнитомодуляционных датчиков неоднородных магнитных полей локального типа / Н.А. Жученко, В.В. Яковенко // Вісник СХУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2005.-№9(51).- С.131-139.

Поступила в редакцію 18.11.2010 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Середюк О. Є.