

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

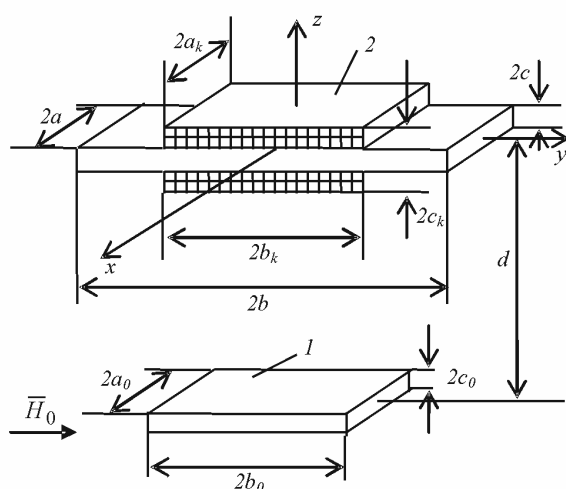
замкнутой магнитной цепи, поскольку образец является по геометрической форме пленкой. Поэтому магнитные измерения необходимо производить при размещении образцов в магнитном поле соленоидов. Погрешность измерений не должна превышать 5-8%.

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

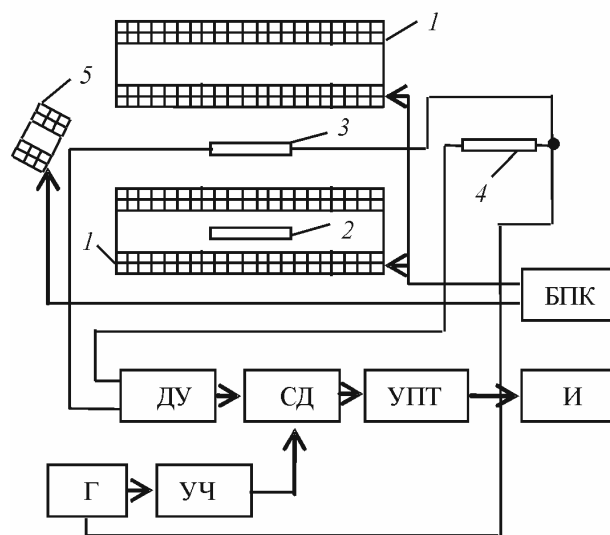
Катушки имеют прямоугольное сечение для возможности создания однородного магнитного поля между ними. Корректирующая катушка 5 имеет возможность поворачиваться вокруг оси, что позволяет изменять величину и направление корректирующего магнитного поля. Сердечники феррозондов имеют следующие размеры: $20 \times 2 \times 0,05$ 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]

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

где \vec{M} – вектор намагниченности в объеме образца; V – объем образца; \vec{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; μ – 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; χ – начальная магнитная восприимчивость. Результаты эксперимента приведены в табл. 1 и табл. 2.

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

Время обработки, мин	2C0, мм	χ	M_s , А/м	H_c , А/м
0	0,2	58	1,31·10 ⁶	1300
40	0,05	48	1,22·10 ⁶	1450
80	0,15	38	1,1·10 ⁶	1670
120	0,2	36	1,02·10 ⁶	1700
160	0,2	35	0,9·10 ⁶	1280

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

Время обработки, мин	2C0, мм	χ	M_s , А/м	H_c , А/м
0	0,2	26	1,2·10 ⁶	3200
40	0,05	20	1,08·10 ⁶	3600
80	0,1	16	0,96·10 ⁶	4060
120	0,15	14	0,9·10 ⁶	4260
160	0,2	13	0,9·10 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.