

УДК 620.179.14

МАГНИТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ НЕМАГНИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Яковенко В.В., Кушнир Н.В.

MAGNETIC METHODS OF MEASURING THE THICKNESS OF NON-MAGNETIC COATINGS

Yakovenko V.V., Kushnir N.V.

Предложен магнитный метод измерения толщины немагнитного покрытия, нанесенного на плоскость ферромагнитной детали. Магнитная система представляет собой П-образный магнитопровод, в который встроены постоянный магнит и магниточувствительные элементы. Для определения статической характеристики толщиномера произведен расчет магнитного поля в магнитопроводе системы. Расчет произведен путем численного решения нелинейного векторного интегрального уравнения. Получены данные о магнитном потоке в магнитопроводе при различных значениях толщин немагнитного слоя. Определена чувствительность и потенциальная разрешающая способность толщиномера.

Ключевые слова: феррозонд, сердечник, намагниченность, магнитный поток, метод зеркальных изображений, расчет поля.

Введение. Известны измерители толщины немагнитных покрытий в дальнейшем толщиномеры, нанесенные на ферромагнитный материал, использующий индукционный физический принцип работы [1]. Их недостаток заключается в необходимости наличия катушки в магнитной системе толщиномеров и в низкой чувствительности.

Постановка задачи. Постоянные магниты в настоящее время используются в магнитных системах толщиномеров, принцип действия которых заключается в измерении усилия отрыва магнитопровода с постоянным магнитом от ферромагнитной детали [2], поверхность которой покрыта слоем немагнитного вещества. Этот метод имеет также малую чувствительность и необходимость измерять силу отрыва магнитной системы от поверхности ферромагнитной детали и вносит определенную погрешность при измерениях.

Решение задачи. Предлагаемый магнитный метод измерения толщины немагнитного покрытия в большей мере лишен вышеперечисленных недостатков. Принцип построения магнитной системы предлагаемого толщиномера показан на рис. 1.

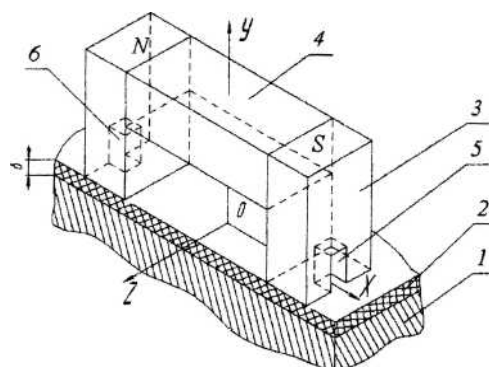


Рис. 1. Конструкция магнитной системы толщиномера
1 – контролируемая ферромагнитная деталь;
2 – немагнитное покрытие; 3 – магнитопровод;
4 – постоянный магнит; 5,6 – ниша для размещения магниточувствительного элемента

В магнитопроводе 3 размещен постоянный магнит 4, а в двух нишах 5,6 расположены магниточувствительные элементы. Магнитопровод расположен на ферромагнитной детали 1, на поверхность которой нанесен слой немагнитного материала 2.

Принцип работы толщиномера следующий. Магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, замыкается через контролируемую деталь и магнитопровод. Величина этого потока зависит от толщины немагнитного зазора δ . Величина магнитного потока оценивается путем измерения напряженности магнитного поля в нишах феррозондами, которые расположены в нишах, в компенсационных катушках. При размещении магнитопровода на ферромагнитной детали с известной толщиной слоя немагнитного материала напряженность поля компенсируется полем катушек, в которых размещены феррозонды. Путем изменения толщины слоя происходит тарировка прибора, после чего он готов для измерений.

Поскольку такого типа толщиномеры ранее не были известны, в статье предлагается метод расчета их статической характеристики, определение чувствительности и порога чувствительности.

Анализ статической характеристики толщиномера основывается на расчете магнитного поля в магнитной системе, который производится путем численного решения нелинейного векторного интегрального уравнения.

$$\vec{H}_p = \text{grad} \left[\int_V \frac{\text{div} \vec{M}}{r} dV - \int_S \frac{\vec{M} dS}{r} \right] + \vec{H}_0 \quad (1)$$

Которое дополняется следующим соотношениями

$$\begin{aligned} \vec{H} &= \vec{H}_0 - \vec{H}_r, \\ \vec{M} &= f(\vec{H}). \end{aligned}$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля в магнитопроводе;

\vec{H}_0 – напряженность магнитного поля созданного постоянным магнитом;

\vec{H}_r – напряженность размагничивающего магнитного поля;

V, S – объем и площадь поверхности магнитопровода;

r – расстояние от точки наблюдения до точки источника;

\vec{M}, \vec{B} – векторы намагниченности и индукции в магнитопроводе.

Для расчета поля используется метод зеркальных изображений (рис.2).

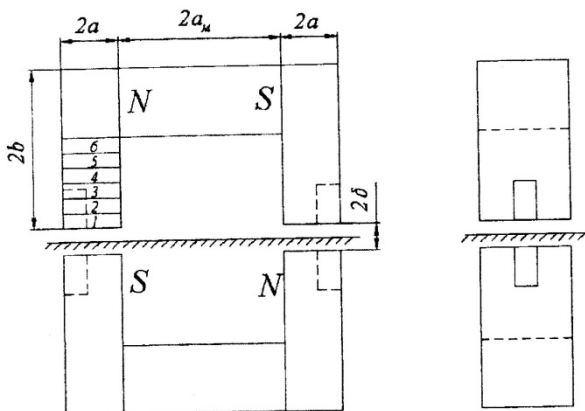


Рис. 2. Геометрическая модель магнитной системы толщиномера при расчете методом зеркальных изображений

В качестве материала постоянного магнита используется сплав ЮНДКГ5АА, который имеет следующие магнитные параметры:

- остаточная индукция, Тл - 1,1,
- коэрцитивная сила, кА/м - 122,
- максимальное значение энергии, кДж/м³ - 84,
- коэффициент насыщения - 0,948.

Магнитные параметры постоянного магнита дают основания сделать заключение о том, что постоянный магнит можно отнести к магнитам критической группы [2]. Поэтому полагается, что вектор намагниченности по всему объему постоянного магнита является величиной постоянной.

Геометрические параметры магнитной системы толщиномера следующие: размеры магнитопровода - $2a * 2b * 2c = 15 * 65 * 15$ мм; размеры постоянного магнита $2a_m * 2b_m * 2L_m$; размеры ниш для магниточувствительных элементов $6 * 15 * 6$ мм.

Объем магнитопровода разбивается на элементарные объемы, представляющие собой параллелипеды, следующим образом $N_x = 7$; $N_y = 11$; $N_z = 1$. Магнитный поток в магнитопроводе рассчитывается по формуле:

$$\Phi = \mu_0 \sum_{k=1}^{N_x} M_{yk} \Delta S_k \quad (2)$$

здесь N_x - количество элементарных объемов в сечении по координате;

ΔS_k - площадь элементарного объема по координате Y .

В табл. 1 приведены значения магнитного потока Φ в 6 контрольных слоях магнитопровода (рис.2) при различных значениях толщины немагнитного слоя δ , выраженной в процентах от длины стержней магнитопровода. В табл. 2 представлены значения составляющих напряженности магнитного поля в нише для двух величин длин сердечников $2b = 45$ мм и $2b = 65$ мм.

Таблица 1
Значения магнитного потока $\Phi * 10^{-3}$ Вб
в контрольных слоях магнитопровода

| № слоя | Толщина немагнитного слоя δ , % | | | | | | |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | 0 | 2,5 | 5 | 10 | 15 | 25 | ∞ |
| 1 | 0,241 | 0,112 | 0,083 | 0,064 | 0,057 | 0,052 | 0,05 |
| 2 | 0,251 | 0,142 | 0,117 | 0,1 | 0,093 | 0,089 | 0,086 |
| 3 | 0,271 | 0,178 | 0,156 | 0,141 | 0,135 | 0,13 | 0,128 |
| 4 | 0,3 | 0,22 | 0,2 | 0,186 | 0,18 | 0,172 | 0,174 |
| 5 | 0,33 | 0,263 | 0,247 | 0,234 | 0,23 | 0,226 | 0,224 |
| 6 | 0,372 | 0,311 | 0,297 | 0,284 | 0,282 | 0,279 | 0,227 |

Таблица 2
Значение напряженности магнитного поля
в нишах магнитопровода

| | | $\delta=0$ | $\delta=0,1$ мм | $\delta=1,0$ мм | $\delta=2,5$ мм | $\delta=5,0$ мм |
|-------------|----------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 2b=65 мм | H_x , А/м | 1354 | 698 | 278 | 191 | 76 |
| | H_y , А/м | 2543 | 2350 | 1847 | 1760 | 1710 |
| 2b=45 мм | H_x , А/м | 1825 | 1239 | 221 | 99 | 40 |
| | H_y , А/м | 3080 | 2822 | 2248 | 2064 | 1950 |

Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что в наших вертикальная составляющая напряженности магнитного поля имеет преобладающее значение. На рис. 3 показана зависимость вертикальной составляющей напряженности поля от толщины немагнитного слоя (статическая характеристика)

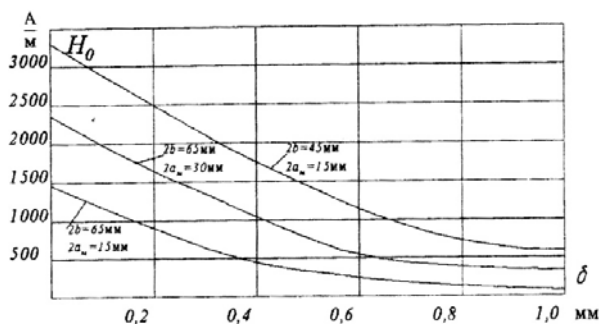


Рис. 3. Статическая характеристика толщиномер

Вывод. Из графиков, приведенных на рис. 3, следует, что линейный участок статической характеристики толщиномер имеет при значении толщин немагнитного слоя $0 < \delta < 0,4$ мм при выбранных значениях геометрических размеров магнитопровода. Чувствительность толщиномер

$$\frac{A}{M}$$

составляет $S=2000$ $\frac{A}{M \cdot mm}$. Если принять порог чувствительности магнитометрического канала магниточувствительного элемента $H_n = 10$ А/м, то разрешающая способность толщиномер составит 0,005 мм.

Литература

1. Мирошников В.В., Романенко А.В. Математическая модель поля датчика над ферромагнитной поверхностью // Вісник державного університету // Львівська політехніка // Радіоелектроніка та телекомунікації. - 2000. - № 387. - С.480-483.
2. Постоянные магниты. Справочник / Под ред. Ю.М. Пятиня. - М. - Энергия, 1980. - 484 с.

References

1. Miroshnikov V.V., Romanenko A.V. Matematicheskaja model' polja datchika nad ferromagnitnoj poverhnost'ju // Visnik derzhavnogo universitetu // L'vivs'ka politehnika // Radioelektronika ta telekomunikacii.-2000.- № 387. - S.480-483.
2. Postojannye magnity. Spravochnik / Pod red. Ju.M. Pjatina. - M. - Jenergija, 1980. - 484 s.

Яковенко В.В., Кушнір М.В. Магнітний метод виміру товщини немагнітних покриттів.

Запропоновано магнітний метод вимірювання товщини немагнітного покриття, нанесеного на площину ферромагнітної деталі. Магнітна система являє собою П-подібний магнітопровід, в який вбудовані постійний магніт і магніточутливі елементи. Для визначення статичної характеристики товщиноміра проведено розрахунок магнітного поля в магнітопроводі системи. Розрахунок виконано шляхом чисельного рішення нелінійного векторного інтегрального рівняння. Отримано дані про магнітний потік в магнітопроводі при різних значеннях товщини немагнітного шару. Визначено чутливість і потенційна роздільна здатність товщиноміра.

Ключові слова: феррозонд, сердечник, намагніченість, магнітний потік, метод дзеркальних зображень, розрахунок поля.

Yakovenko V.V., Kushnir N.V. Magnetic methods of measuring the thickness of non-magnetic coatings.

We propose a magnetic method of measuring the thickness of the non-magnetic coating of a ferromagnetic part. The magnetic system is a U-shaped magnetic core, with a built-in permanent magnet and a magneto-sensitive element. To determine the clearance gauge static characteristic the magnetic field calculation was performed in the magnetic system. The calculation was made with the help of the numerical solution of a nonlinear vector integral equation. Consequently we obtained the data on the magnetic flux in the magnetic circuit for nonmagnetic layers of different thickness. Also we determined the gauge sensitivity and its potential resolution.

Keywords: ferroprobes, core, magnetization, magnetic flux, the method of mirror images, the calculation of the field.

Яковенко Валерій Владимирович – доктор технічних наук, професор кафедри електротехніки, Восточноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, г. Северодонець, Україна.

Кушнір Николай Валентинович – аспірант кафедри «Електромеханіки», Восточноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, г. Северодонець, Україна.

Рецензент: **Суворін О. В.**, д.т.н., доцент.

Стаття подана 23.03.2014