

УДК 620.179.14

## МАГНИТНЫЙ МЕТОД ОДНОВРЕМЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ИЗДЕЛИЯ И ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАЩИТНОГО СЛОЯ

А.А. ЛУХВИЧ, А.К. ШУКЕВИЧ, Н.В. КРЕМЕНЬКОВА,  
В.И. ШАРАНДО, А.А. ПОЛОНЕВИЧ  
(Институт прикладной физики НАН Беларуси)

*Рассмотрен магнитный метод одновременного определения толщины изделия и поверхностного защитного слоя. Показана важность измерения как толщины основы, так и толщины покрытия (коррозии) при определении остаточного ресурса конструкций и изделий.*

Ряд задач неразрушающего контроля связан с измерением толщины ферромагнитной основы под слоем защитного немагнитного покрытия или коррозии. При этом часто необходимо знать как толщину основы, так и толщину покрытия (коррозии). Особенно важно измерять эти параметры при определении остаточного ресурса конструкций и изделий.

Широко распространенные магнитные или иные толщиномеры решают эту задачу в два этапа: сначала измеряется толщина покрытия, а после его удаления и толщина металла. В ИПФ НАН Беларуси разработан метод [1, 2] и создан прибор [3] для одновременного измерения толщины немагнитного покрытия и металла под этим покрытием.

При магнитном методе контроля всю информацию о параметрах контролируемого участка несет вторичное магнитное поле. В случае ферромагнетика под немагнитным покрытием вторичное поле в заданной точке для данного источника намагничивания является функцией толщины основы  $h$  и немагнитного покрытия  $d$ . Для раздельного определения этих двух параметров необходимо иметь два уравнения и решить их совместно. Уравнения можно получить, измеряя вторичное поле в 2-х неэквивалентных точках, например, на различном расстоянии  $z_1$  и  $z_2$  от поверхности контролируемого участка. Для системы, имеющей цилиндрическую симметрию, это будет

$$\begin{aligned} B(z_1, R) &= f_1(h, d, p_1); \\ B(z_2, R) &= f_2(h, d, p_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $B$  – индукция вторичного поля;  $z, R$  – координаты точки измерения (расчета);  $p$  – параметр, значение которого определяется геометрией преобразователя и координатами точки измерения (расчета).

Записанная система относится к классу некорректно поставленных обратных задач, и ее аналитическое решение в общем случае встречает трудности. Поэтому в предложенном нами методе используется графо-аналитический метод решения. Суть метода заключается в сопоставлении результатов, полученных на контролируемом объекте с аналогичными от эталонных образцов и последующем расчете контролируемых параметров  $h$  и  $d$ . Для этого в системе координат  $S_1 S_2$  ( $S_1, S_2$  – сигналы в измерительных элементах) строится зависимость:

$$S_1 = F(S_2). \quad (2)$$

Очевидно, что при этом получим два семейства изолиний:

$$\begin{aligned} S_1' &= F'(S_2)|_d \\ S_2'' &= F''(S_2)|_h \end{aligned} \quad (3)$$

Это значит, что любая  $n$ -ная линия семейства  $S_1'$  соответствует  $d_n = const$ , а любая  $S_2'' - h_k = const$ . Семейства, пересекаясь, образуют некоторую криволинейную четырехугольную сетку, которая эквивалентна обычному градировочному графику в случае одного параметра. Из принципа построения сетки следует, что любая ячейка характеризуется двумя парами значений  $h$  и  $d$ , соответствующих ее сторонам. В каждом узле ячейки известны  $h$  и  $d$ . Таким образом устанавливается однозначная связь между толщиной основы и немагнитного покрытия, с одной стороны, и сигналами в измерительных элементах, с другой стороны. Результаты градуировки можно рассматривать как два двухмерных массива  $h(S_1, S_2)$  и  $d(S_1, S_2)$ , индексами которых служат сигналы в измерительных элементах. Массивы записываются в память прибора и используются при расчетах. Градировочную сетку можно рассчитать или построить экспериментально по эталонным образцам.

Из сказанного следует, что для определения толщины основы и немагнитного покрытия контролируемого объекта необходимо, во-первых, по сигналам в измерительных элементах определить, к какой ячейке сетки относится результат. Во-вторых, определить относительное положение точки в найденной ячейке и, используя известные значения  $h$  и  $d$  на сторонах ячейки, найти их значения для контролируемого объекта. Соответствующая программа расчета закладывается в память прибора.

Разработанная методика реализована в двух приборах - УМТ-1 и УМТ-2. Прибор УМТ-1 по принципу действия является магнитным толщиномером. Источником намагничивающего поля служит система постоянных магнитов, которая вместе с ферромагнитным магнита проводом создает в контролируемом участке две области с противоположным направлением намагниченности. Блок-схема прибора УМТ-1 показана на рис. 1.

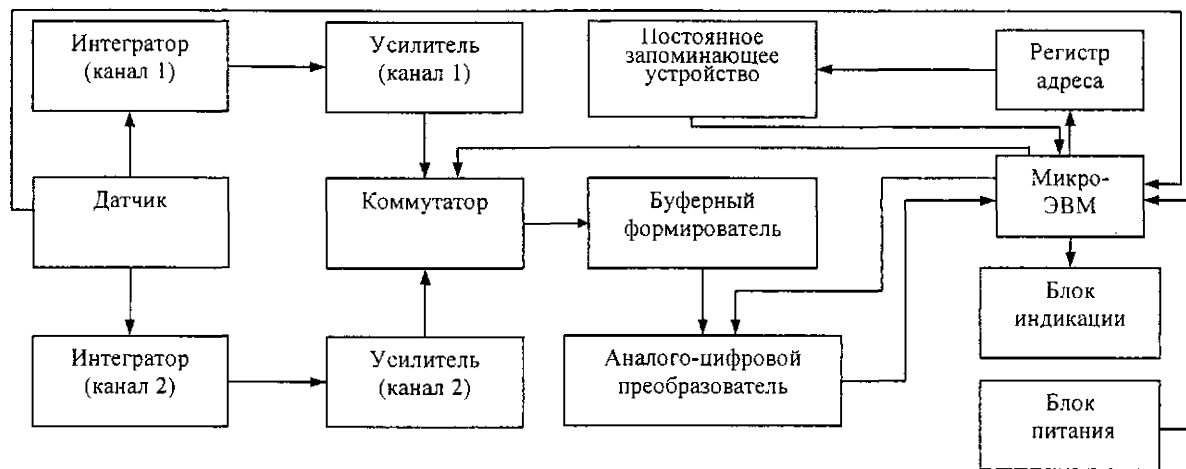


Рис. 1. Блок-схема прибора

Прибор имеет два идентичных канала обработки аналогового сигнала, включающих усилитель, интегратор. Коммутатор обеспечивает поочередную передачу сигнала с выходов усилителей на вход буферного формирователя и далее на АЦП для преобразования измеренных сигналов в цифровой код. Регистр адреса необходим для фиксации младшего байта адреса обращения к постоянному запоминающему устройству. Постоянное запоминающее устройство содержит программу работы микроЭВМ, а также данные для вычисления истинных значений толщины покрытия и основы. МикроЭВМ осуществляет управление работой прибора, а также производит обработку результатов измерения и вывод на блок индикации значений толщины покрытия и основы.

Преобразователь УМТ-1 имеет внешний диаметр 45 мм и позволяет измерять толщину ферромагнитной основы до 5 мм под немагнитным покрытием до 1,5 мм.

Определенным недостатком прибора УМТ-1 является пондеромоторное взаимодействие (притяжение) преобразователя и контролируемого объекта. Это ограничивает максимальную толщину основы 5 мм. При  $h > 5$  мм без дополнительных приспособлений преодолеть взаимодействия трудно.

Однако существует ряд потенциальных объектов контроля, исходная толщина металла в которых  $\sim 10$  мм. Следовательно, имеется потребность в расширении диапазона измеряемых параметров. Очевидно, что при этом необходимо как увеличить параметры самого преобразователя, так и уменьшить или исключить вообще пондеромоторное взаимодействие.

Поставленная задача решена в толщиномере УМТ-2, Макет такого толщиномера изготовлен и испытан в ИПФ НАН Беларуси. Исключить пондеромоторное взаимодействие и тем самым получить возможность расширить диапазон  $h$  удалось за счет замены источника намагничивающего поля с постоянными магнитами на электромагнит. Преобразователь УМТ-2 представляет собой два полых ферромагнитных цилиндра, расположенных соосно, и шайбу, которая замыкает концы цилиндров. На внутренний цилиндр намотана обмотка возбуждения для создания намагничивающего поля. Измерительными элементами также как и в УМТ-1 служат две многovitковые катушки индуктивности, расположенные во внутренней полости системы. Замена постоянных магнитов на электромагнит вносит определенные особенности в процесс измерения.

Как в УМТ-1, так и в УМТ-2 сигнал в измерительных элементах обусловлен изменением магнитного потока за время измерения

$$S = k \cdot (\Phi_n - \Phi_0) \tag{4}$$

В случае УМТ-1  $\Phi_n = 0$  (в исходном состоянии преобразователь удален от ферромагнетика) и  $S = k \cdot \Phi_k$  ( $\Phi_k$  – магнитный поток при установленном на контролируемый объект преобразователе). В случае УМТ-2 включение и выключение намагничивающего тока происходит при установленном на объект преобразователе и, следовательно, в общем случае  $\Phi_n$  соответствует потоку от остаточной намагниченности и намагничивающего тока. Таким образом, сигнал в каждой катушке содержит неинформативное поле намагничивания и поле остаточной намагниченности. Известно [4], что остаточная намагниченность является чувствительным параметром к состоянию структуры. Это может внести существенную ошибку в определение толщин. Поэтому в преобразователе УМТ-2 предусмотрена возможность предварительного размагничивания и исключение влияния на величину сигнала собственного поля намагничивающего тока.

Для вычисления  $h$  и  $d$  как для УМТ-1, так и для УМТ-2 необходимо иметь градуировочные (калибровочные) зависимости, построенные по эталонным образцам. В качестве эталонных образцов используются ферромагнитные пластины различной толщины и пластмассовые пленки, имитирующие немагнитные покрытия (коррозию). Часть градуировочной сетки, в качестве примера, показана на рис. 2.

Программа по обработке результатов измерения находит, к какой ячейке сетки относится полученный результат (в выбранной системе координат это будет точка), и по положению этой точки относительно элементов ячейки вычисляет как  $h$ , так и  $d$ .

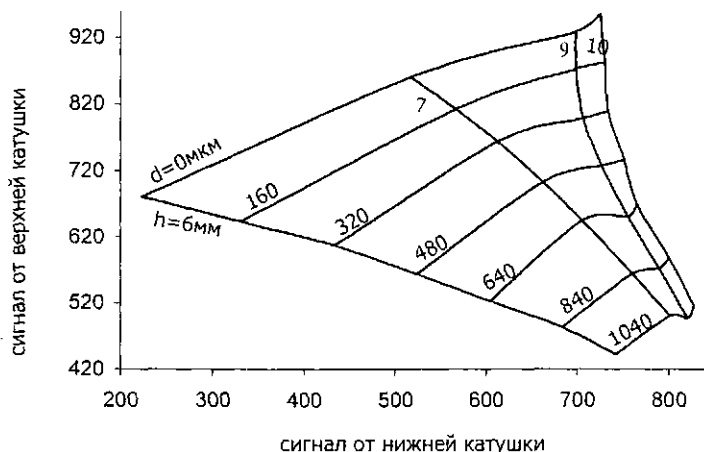


Рис. 2. Градуировочные зависимости

Из рис. 2 видно, что преобразователь УМТ-2 можно использовать для измерения  $h$  до 10 мм при толщине немагнитного покрытия  $d$  до 1 мм, разрешение при этом составляет: по  $h$  минимум 125 мкм, а по  $d$  5 мкм.

В заключение отметим, что как по принципу действия, так и по функциональным возможностям описанные приборы не имеют аналогов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шукевич А.К., Лухвич А.А., Шарандо В.И. Магнитная толщинометрия ингредиентов в паре немагнитное покрытие - ферромагнитная основа // Дефектоскопия. - 2000. - № 1. - С. 31 - 36.
2. Расчет вторичного поля применительно к магнитной толщинометрии пары немагнитное покрытие-ферромагнитная основа / А.К. Шукевич, А.А. Лухвич, В.И. Шарандо, Н.В. Кременькова // Дефектоскопия. - 2000. - № 12. - С. 28 - 34.
3. Магнитный метод для одновременного измерения толщин ферромагнитного металла и немагнитного покрытия / А.К. Шукевич, А.А. Лухвич, В.И. Шарандо и др. / Весці НАН Беларусі Сер. фіз.-мат. навук.-2002.-№3.-С. 54- 58.
4. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. - Мн.: Наука и техника, 1980. - 184 с.