

УДК 620.179.142.6

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО НАКОНЕЧНИКА НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИНЫ ИМИТАТОРОВ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

О. В. БУЛАТОВ, В. И. ШАРАНДО

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179.142.6

INFLUENCE OF THE MEASURING TIP SHAPE ON THE PRECISION OF THICKNESS MEASUREMENT OF THE IMITATORS OF NON-FERROMAGNETIC COATINGS

O. V. BULATOV, V. I. SHARANDO

Аннотация. Исследовано влияние формы измерительного наконечника на точность измерений толщины имитаторов неферромагнитных покрытий. Показано, что в том случае, когда имитатор изготовлен из мягкого материала (фторопласт), относительная погрешность измерений толщины имитатора может по модулю превышать 50 %. В случае высокотвердого материала (керамика или ее аналог) погрешность измерений практически не зависит от формы наконечника. Приведены рекомендации по выбору материалов имитаторов.

Ключевые слова: средство измерений, измерительный наконечник, форма наконечника, покрытие, толщина, погрешность измерений.

Abstract. The influence of the shape of the measuring tip on the measurement accuracy of the thickness of imitators of non-ferromagnetic coatings is investigated. It is shown that in the case when an imitator is made from soft material (e.g. fluoroplast), the measurement relative error of the imitator thickness may exceed in absolute value 50 %. In the case of very hard material (ceramic or its analog) the measurement error is practically independent on the tip shape. Recommendations on the choice of materials for the imitators are given.

Keywords: measuring gauge, measuring tip, tip shape, coating, thickness, measurement error.

ИПФ НАН Беларуси с 2004 г. серийно выпускает толщиномеры покрытий магнитные цифровые МТЦ-3, которые в настоящее время внесены в Государственный реестр средств измерений и стандартных образцов Республики Беларусь под регистрационным № РБ 03 20 8604 22, что подтверждается сертификатом № 14878. Приборы данного типа относятся к одной из категорий средств измерений, применяемых в сфере законодательной метрологии (см. п. 15.4 приложения к [1]). Все это позволяет проводить государственную поверку приборов типа МТЦ-3 для официального подтверждения их основных метрологических характеристик.

При проведении очередных государственных испытаний вышеуказанных приборов была разработана новая методика поверки МРБ МП.1416–2022 [2], регламентирующая использование эталонного набора имитаторов неферромагнитных покрытий для воспроизведения толщины в начальном диапазоне от 15 до 500 мкм и высокоточного микрометра для ее предварительного опреде-

ления. При формировании такого набора необходимо измерить микрометром толщину каждого имитатора и определить погрешность ее измерений, которая не должна выходить за допускаемые пределы Δ_{lim} , которые для приборов МТЦ-3 составляют $\pm(0,5 + 0,006X\delta)$ мкм, где $X\delta$ – действительная толщина имитатора (среднее арифметическое значение показаний микрометра).

В ходе исследований выяснилось, что при измерениях толщины имитатора возможно различие показаний толщиномера и микрометра, обусловленное тем, что цилиндрический наконечник преобразователя прибора имеет полусферическое закругление, а стержневой наконечник микрометра заканчивается плоскостью. Разная форма окончаний измерительных наконечников приводит к тому, что при измерениях толщины имитатора, изготовленного из недостаточно твердого материала, закругленный наконечник преобразователя прибора и плоский наконечник микрометра по-разному продавливают его поверхность. В итоге среднеарифметическое значение показаний прибора может оказаться существенно меньше среднеарифметического значения показаний микрометра. Степень продавливания и значение обусловленной им дополнительной погрешности зависят от измерительного (контактного) усилия, твердости материала имитатора, гладкости его поверхности и радиуса закругления наконечника.

Далее будут приведены результаты исследований влияния формы измерительного наконечника на точность измерений толщины имитаторов неферромагнитных покрытий, выполненных из разных материалов. При этом отметим, что конкретно в магнитодинамических приборах типа МТЦ-3 информативный сигнал возникает в момент отрыва преобразователя от покрытия, что снижает негативный эффект начального продавливания поверхности покрытия. В то же время полученные результаты актуальны при использовании толщиномеров любого принципа действия, в которых преобразователь имеет наконечник с малой контактной площадью.

Методика исследований состояла в измерениях высокоточным микрометром Mitutoyo Absolute Digimatic 2 с разрешающей способностью 0,1 мкм, обеспечиваемой в диапазоне от 0 до 25 мм, толщины образцов из неферромагнитных материалов, различающихся по твердости в максимально широком диапазоне (от фторопласта до керамики), в обработке результатов измерений и оценке их погрешностей. Начальная серия измерений получена микрометром в его исходной конструкции (с плоским завершением наконечника). Зависимость показаний микрометра от степени закругления торца прижимаемого к образцу цилиндра исследована с помощью двух специально изготовленных насадок на наконечник микрометра, заканчивающихся полусферами радиусами 3 и 5 мм. Толщину неферромагнитных покрытий воспроизводили имитаторы, изготовленные из различающихся по твердости материалов и имеющие порядковые номера, возрастающие по мере увеличения толщины имитаторов:

- 1, 3, 11 – образцы из алюминиевой фольги;
- 2, 4, 6, 7, 9, 15 – образцы из различных полимеров;
- 5, 8 – пленки из фторопласта;
- 10, 13 – пленки из полиэтилентерефталата (ПЭТ);

- 12 – пленка из полипропилена;
- 14 – рентгеновская фотопленка;
- 16 – пластина из керамики.

Измерения толщины всех имитаторов микрометром с наконечником без насадки позволили определить действительную толщину всех имитаторов, а также оценить качество их поверхности в зоне измерений.

Действительная толщина $X\partial$, мкм, каждого имитатора вычислена как среднее арифметическое значение десяти показаний микрометра.

Для оценки среднего квадратичного отклонения $\sigma[\Delta ou]$, мкм, отдельных показаний от $X\partial$ использована формула

$$\sigma[\Delta ou] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X\partial)^2}{n - 1}}, \quad (1)$$

где i – порядковый номер показания микрометра; n – общее число его показаний, соответствующих конкретному имитатору (в данном случае $n = 10$); X_i – очередное (i -е) показание микрометра с наконечником без насадки, мкм.

Случайная составляющая Δou , мкм, абсолютной погрешности Δu вычислена по формуле

$$\Delta ou = tp \cdot \sigma[\Delta ou], \quad (2)$$

где tp – коэффициент Стьюдента (при $n = 10$ и доверительной вероятности $p = 0,95$ в первом приближении $tp = 2$).

Абсолютная погрешность Δu , мкм, измерений толщины имитатора микрометром с наконечником без насадки определена по формуле

$$\Delta u = \pm \sqrt{\Delta ou^2 + \Delta m^2}, \quad (3)$$

где Δm – абсолютная погрешность микрометра, $\Delta m = \pm 0,5$ мкм.

Относительная погрешность δu , %, вычислена по формуле

$$\delta u = \frac{\Delta u}{X\partial} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Результаты расчетов по формулам (1)–(4) приведены в табл. 1.

Исходя из формулы (3), абсолютная погрешность Δu по модулю не может быть меньше 0,5 мкм. По табличным данным видно, что только имитатор 11 имеет относительно большую Δu , тогда как у остальных имитаторов ее модуль не достигает даже 1 мкм. Исходя из допуска $\Delta \text{lim} = \pm(0,5 + 0,006X\partial)$ мкм, лишь указанный имитатор нельзя использовать для проведения испытаний или проверки приборов.

Табл. 1. Значения абсолютной Δ_i и относительной δ_i погрешностей измерений толщины имитаторов неферромагнитных покрытий микрометром с наконечником без насадки

Номер имитатора	X_{∂} , мкм	Δ_{oi} , мкм	Δ_i , мкм	δ_i , %	Номер имитатора	X_{∂} , мкм	Δ_{oi} , мкм	Δ_i , мкм	δ_i , %
1	12,0	0,2	$\pm 0,5$	$\pm 4,2$	9	80,9	0,4	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$
2	12,4	0,4	$\pm 0,6$	$\pm 4,8$	10	103,9	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 0,6$
3	13,1	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 4,6$	11	104,3	1,3	$\pm 1,4$	$\pm 1,3$
4	21,2	0,2	$\pm 0,5$	$\pm 2,4$	12	175,3	0,2	$\pm 0,5$	$\pm 0,3$
5	44,2	0,5	$\pm 0,7$	$\pm 1,6$	13	186,4	0,7	$\pm 0,9$	$\pm 0,5$
6	46,8	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 1,3$	14	211,4	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 0,3$
7	48,3	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 1,2$	15	323,6	0,8	$\pm 0,9$	$\pm 0,3$
8	48,5	0,5	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	16	500,7	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 0,1$

Обработка остальных результатов, полученных с помощью двух насадок, выполнена по методике, применяемой при проведении испытаний приборов МТЦ-3. В частности, систематическая составляющая Δ_s , мкм, абсолютной погрешности Δ измерений толщины каждого имитатора вычислена по формуле

$$\Delta_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} X_{ni} - X_{\partial}, \quad (5)$$

где X_{ni} – очередное (i -е) показание микрометра, наконечник которого оснащен насадкой, мкм.

Для оценки $\sigma[\Delta_o]$, мкм, среднего квадратичного отклонения случайной составляющей Δ_o погрешности Δ использована формула (1), в которую вместо параметра X_i подставлена разность Δ_i очередного (i -го) показания микрометра и толщины X_{∂} , а вместо этой толщины – систематическая составляющая Δ_s , определенная по формуле (5). Случайная составляющая Δ_o , мкм, вычислена по формуле (2), в которую вместо параметра $\sigma[\Delta_{oi}]$ подставлена оценка $\sigma[\Delta_o]$. Абсолютная погрешность Δ , мкм, измерений толщины каждого имитатора микрометром с наконечником, оснащенным насадкой, определена по формуле

$$\Delta = \Delta_s \pm \Delta_o. \quad (6)$$

Выбор знака в формуле (6) зависит от значения параметра Δ_s : если оно положительное или нулевое, то к нему прибавляют значение параметра Δ_o , а если отрицательное, то отнимают.

Относительная погрешность δ , %, определена по формуле (4), в которую вместо параметра Δ_i подставлена погрешность Δ , вычисленная по формуле (6).

Все результаты вычислений представлены в табл. 2.

Из табличных данных следует, что самая большая по модулю погрешность Δ (или δ) имеет место при измерениях толщины имитаторов, изготовленных из такого легко сминаемого материала, как фторопласт.

Табл. 2. Значения абсолютной Δ_i и относительной δ_i погрешностей измерений толщины имитаторов неферромагнитных покрытий микрометром, оснащенным насадкой с окончанием радиусом r

Номер имитатора	$X\delta$, мкм	r , мм	\bar{X} , мкм	Δ_s , мкм	Δ_o , мкм	Δ , мкм	δ , %
1	12,0	5	9,5	-2,5	0,6	-3,1	-25,8
		3	8,7	-3,3	0,8	-4,1	-34,2
2	12,4	5	8,8	-3,6	0,7	-4,3	-34,7
		3	8,1	-4,3	0,9	-5,2	-41,9
3	13,1	5	11,8	-1,3	0,4	-1,7	-13,0
		3	11,2	-1,9	1,0	-2,9	-22,1
4	21,2	5	17,5	-3,7	1,2	-4,9	-23,1
		3	17,3	-3,9	1,0	-4,9	-23,1
5	44,2	5	29,3	-14,9	4,2	-19,1	-43,2
		3	23,1	-21,1	3,6	-24,7	-55,9
6	46,8	5	42,5	-4,3	0,9	-5,2	-11,1
		3	41,9	-4,9	0,8	-5,7	-12,2
7	48,3	5	43,9	-4,4	1,2	-5,6	-11,6
		3	43,3	-5,0	1,8	-6,8	-14,1
8	48,5	5	28,7	-19,8	2,1	-21,9	-45,2
		3	23,4	-25,1	2,5	-27,6	-56,9
9	80,9	5	75,3	-5,6	0,9	-6,5	-8,1
		3	73,9	-7,0	1,7	-8,7	-10,8
10	103,9	5	97,1	-6,8	1,4	-8,2	-7,9
		3	96,3	-7,6	1,1	-8,7	-8,4
11	104,3	5	92,5	-11,8	1,9	-13,7	-13,1
		3	86,3	-18,0	3,2	-21,2	-20,3
12	175,3	5	162,0	-13,3	2,8	-16,1	-9,2
		3	157,2	-18,1	4,2	-22,3	-12,7
13	186,4	5	178,7	-7,7	1,0	-8,7	-4,7
		3	177,7	-8,7	1,3	-10,0	-5,4
14	211,4	5	202,7	-8,7	1,3	-10,0	-4,7
		3	200,1	-11,3	2,4	-13,7	-6,5
15	323,6	5	305,6	-18,0	1,8	-19,8	-6,1
		3	299,3	-24,3	4,6	-28,9	-8,9
16	500,7	5	500,3	-0,4	0,5	-0,9	-0,2
		3	500,5	-0,2	0,6	-0,8	-0,2

Основной вклад в общую погрешность вносит ее систематическая составляющая Δ_s , обусловленная продавливанием поверхности имитатора полусферическим окончанием насадки. Видно также, что модуль этой составляющей увеличивается по мере уменьшения радиуса r полусферы (т. е. при сокращении площади поверхности наконечника, контактирующей с поверхностью имитатора). Единственным исключением из этого правила является имитатор из керамики, имеющей столь высокую твердость, что различие значений Δ_s уже не обусловлено разными значениями r , а имеет чисто случайный характер и является пренебрежимо малым по сравнению с толщиной X_d .

На случайную составляющую Δ_o мягкость материалов имитаторов тоже оказывает некоторое влияние: у керамического имитатора значения этой составляющей по модулю в разы меньше, чем, например, у обоих фторопластовых и полипропиленового имитаторов. Однако для очень малой толщины X_d составляющая Δ_o может оказаться слишком большой, что не позволит включить имитатор с такими характеристиками в состав формируемого набора.

Практические рекомендации при выборе имитаторов сводятся к тому, что их следует изготавливать из керамики, стекла или аналогичного по твердости неферромагнитного материала. Ввиду того, что такие материалы непригодны для изготовления тонких имитаторов, их можно изготавливать из ПЭТ либо одного из таких полимеров, из которых сделаны имитаторы 6, 7 и 9. Возможность использования конкретного имитатора необходимо определять экспериментально на основе измерений его толщины, обработки результатов по формулам (1)–(3) и сравнения полученного значения абсолютной погрешности Δ_i с допускаемыми пределами Δ_{lim} .

В целом приведенные результаты показывают, что при разработке толщиномеров покрытий и изготовлении наборов мер толщины покрытий для градуировки и испытаний этих приборов необходимо учитывать все факторы, связанные с геометрией рабочих окончаний преобразователей приборов и прижимными усилиями, механическими характеристиками используемых материалов. При этом значения реально возникающих погрешностей могут оказаться существенными и должны исследоваться и учитываться в установленном порядке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. О перечне категорий средств измерений [Электронный ресурс]: постановление Гос. комитета по стандартизации Респ. Беларусь, 20 апр. 2021 г., № 39 // Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений. – Режим доступа: <https://www.oei.by/section?id=117>. – Дата доступа: 11.07.2022.
2. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Толщиномеры покрытий магнитные цифровые МТЦ-3. Методика поверки: МРБ МП.1416–2022. – Взамен МРБ МП.1416–2004. – Минск: Ин-т прикл. физики НАН Беларуси, 2022. – 16 с.

E-mail: lab1@iaph.bas-net.by.