

## МАГНИТНЫЕ ТОЛЩИНОМЕРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

### *Magnetic thickness gauges of new generation*

Лухвич А.А.  
*Lukhvich A.A.*

Приведено обоснование преимуществ нового магнитодинамического метода толщинометрии покрытий по сравнению с известными. Они обусловлены тем, что принцип измерения автоматически исключает из информативного сигнала составляющую, обусловленную первичным намагничивающим полем. Показано, что одним преобразователем обеспечивается контроль при разных сочетаниях физических свойств покрытий и оснований; приведены данные по функциональным возможностям приборов типа МТЦ и их метрологические характеристики.

*The substantiation of advantages of a new magneto-dynamic method of coatings thickness measurement over the known methods is given. The advantages are caused by the measuring principle that automatically excludes from an informative signal the component, which is conditioned by the primary magnetizing field. It is shown that one transducer provides testing for different combinations of physical properties of coatings and bases; functional capabilities of gauges MTG and their metrological performance are given.*

Нанесение покрытий является широко распространенным элементом технологии практически во всех областях промышленного производства. Контроль толщины и равномерности покрытий на изделиях в настоящее время обеспечивается приборами неразрушающего контроля, основанными на разных принципах измерения, выбор которых определяется сочетанием физических свойств материалов самих покрытий и оснований с учетом величины диапазона контролируемой толщины. В основном практическая потребность сводится к контролю, когда материал основания является магнитным (малоуглеродистые, инструментальные, нержавеющие магнитные и слабомагнитные стали и др.), а покрытия – диэлектрические и электропроводящие немагнитные (лаки, краски, медные, хромовые, цинковые) и слабомагнитные (например, никель). Во всех этих случаях (магнитное

основание – немагнитное покрытие, никелевое покрытие на магнитном или немагнитном основании) оптимальным вариантом является магнитный метод толщинометрии, при этом на погрешность контроля не влияют физические свойства любых металлических и неметаллических немагнитных покрытий, кроме магнитных. Влияние же магнитных свойств исключается или минимизируется за счет использования сильных первичных намагничивающих полей, когда первичный преобразователь толщиномера обеспечивает намагниченность информативной зоны, близкую к намагниченности насыщения. При этом исключается влияние на погрешность контроля структурных свойств покрытий.

До сравнительно недавнего времени в практике неразрушающего контроля использовались три типа толщиномеров, а именно приборы пондеромоторного принципа действия, магнитостатические и индукционные. Приборы пондеромоторного принципа действия по существу представляют собой пружинный динамометр для измерения силы отрыва постоянного магнита от поверхности изделия и определения толщины покрытия по величине этой силы по предварительно установленной на эталонных мерах градуировочной зависимости. Сила притяжения в случае измерения немагнитного покрытия на ферромагнитном основании обратно пропорциональна квадрату величины магнитной индукции в зазоре между постоянным магнитом и основанием. Нелинейный характер зависимости показаний приборов от толщины покрытий резко снижает разрешающую способность и диапазон измерений. На практике, чтобы обеспечить приемлемые метрологические характеристики выбором сочетаний характеристик постоянных магнитов и пружин, создаются модификации приборов на определенные диапазоны измерений; например, фирма ElectroPhysik выпускает около десяти модификаций приборов пондеромоторного принципа действия.

Принцип действия индукционных толщиномеров основан на

измерении магнитного сопротивления в цепи ферромагнитное основание – немагнитное покрытие – измерительный преобразователь. Преобразователь представляет собой ферромагнитный стержень, в средней части которого размещена катушка, возбуждающая переменное электромагнитное поле, а по краям – две измерительные катушки, включенные встречно. В отсутствие контролируемого изделия измерительные сигналы в катушках компенсируют друг друга, и на выходе ЭДС равна нулю. При установке преобразователя на изделие магнитная симметрия нарушается, и выходное напряжение возрастает, причем его рост в определенном диапазоне пропорционален толщине покрытия. Частота возбуждающего тока в преобразователе выбирается из условия исключения или минимизации погрешности (несколько сотен Гц), обусловленной вихревыми токами, и таким образом обеспечивается единая градуировка независимо от электросопротивления покрытий. Индукционные толщиномеры с набором первичных преобразователей на разные диапазоны измерений широко используются на практике; из-за небольшой величины первичного намагничивающего поля они не обеспечивают отстройку от влияния на погрешность контроля структурных свойств магнитных покрытий.

Принцип действия магнитостатических толщиномеров основан на измерении магнитной индукции в цепи стержневой или П-образный магнит – покрытие – ферромагнитное основание. О толщине покрытия судят по величине индукции, для измерения которой могут использоваться феррозонды, датчики Холла, магнитная стрелка и др. По метрологическим характеристикам (погрешность, диапазон измерений) приборы магнитостатического принципа действия уступают другим типам толщиномеров и в настоящее время практически не используются.

При реализации магнитных методов неразрушающего контроля, в том числе применительно к толщинометрии, характер (постоянное, переменное, импульсное и др.) и напряженность первичного намагни-

чивающего поля в информативной зоне определяют зависимость вторичного магнитного поля от контролируемого параметра. Вторичное поле является информативным параметром, первичное (намагничивающее) в некоторой степени является мешающим фактором. Известные типы магнитных толщиномеров (пондеромоторные и магнито-статические) обладают тем недостатком, что измеряемые сигналы содержат как информативную составляющую, по которой можно судить о толщине покрытия, так и неинформативную, обусловленную первичным полем. По абсолютной величине она может многократно превышать информативную составляющую. Это приводит к снижению разрешающей способности, сужению диапазона измерений, необходимости создания большого количества узкодиапазонных приборов. Применяются различные способы компенсации неинформативной составляющей, однако исключить ее полностью не представляется возможным.

В ИПФ НАН Беларуси применительно к магнитной толщинометрии предложен динамический принцип измерения, исключающий вклад первичного намагничивающего поля в информативный параметр [1-10]. В простейшем варианте первичный преобразователь для реализации этого принципа представляет собой постоянный магнит, окруженный неподвижной по отношению к нему многовитковой измерительной катушкой. При установке или поднятии такого преобразователя относительно контролируемого изделия в измерительной катушке генерируется импульс ЭДС, величина которого определяется намагниченностью основания (покрытия, основания и покрытия) и толщиной покрытия. Намагниченность основания зависит от поля магнита, но само оно не регистрируется катушкой из-за ее статического положения по отношению к магниту. Схема первичного магнитодинамического преобразователя показана на рисунке 1а, вид информативного сигнала при подъеме преобразователя над контролируемым изделием – на рисунке 1б.

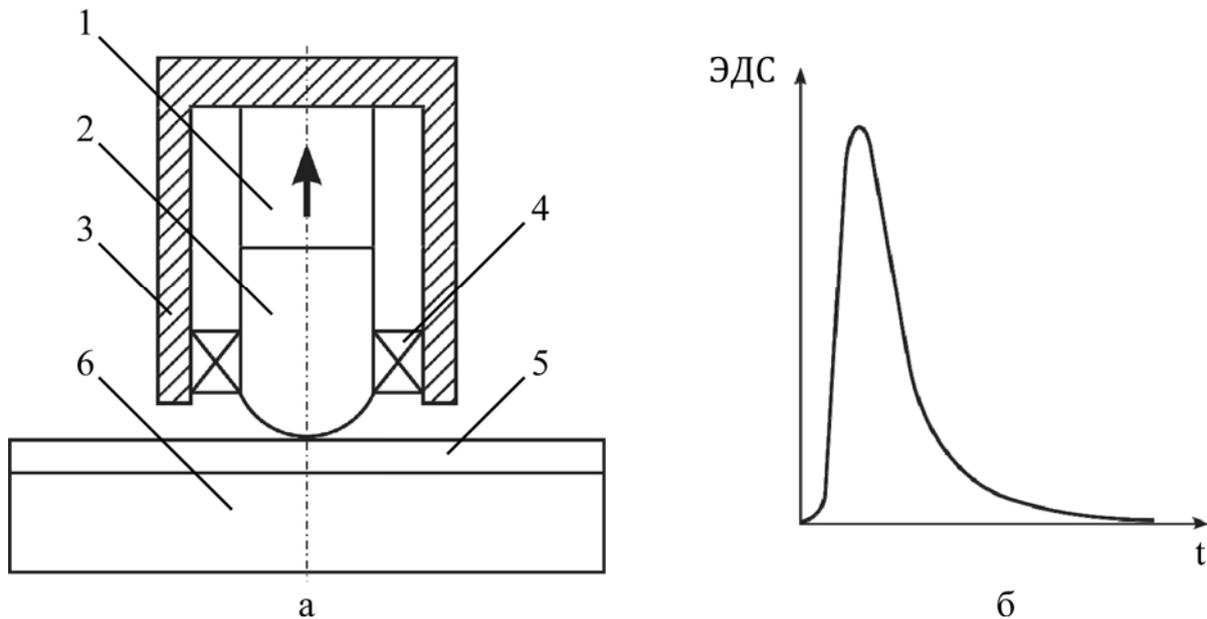


Рис. 1а – схема первичного магнитодинамического преобразователя, установленного на контролируемое изделие (стрелка указывает направление намагниченности),  
 1б – вид информативного сигнала (зависимость ЭДС от времени  $t$ )

Первичный магнитодинамический преобразователь обладает цилиндрической симметрией и состоит из постоянного высококоэрцитивного магнита 1 (стержень из неодим-железо-бора), сопряженно с ним магнитомягкого полюсного наконечника 2 и закрепленной на нем измерительной многовитковой катушки 3, которые помещены в ферромагнитный экран 4. В общем случае нормальная составляющая индукции вторичного магнитного поля (информативный параметр) определяется толщиной покрытия 5, магнитными свойствами основания 6 (покрытия, основания и покрытия), а также геометрией и сочетанием свойств конструктивных элементов преобразователя.

Задача создания магнитодинамического толщиномера состоит в выборе и оптимизации параметров первичного преобразователя применительно к конкретным задачам толщинометрии (диапазон измеряемых толщин, физические свойства покрытия и основания), а также

в разработке элементов электронного блока и программного обеспечения для регистрации и обработки поступающих от преобразователя сигналов.

Информативным параметром при магнитодинамическом методе измерений является поток магнитной индукции через витки измерительной катушки, который регистрируется при ее подъеме над контролируемым изделием. Величина измеряемого потока определяется полем, создаваемым намагниченным участком изделия (т. е. вторичным магнитным полем), и изменением намагниченности элементов преобразователя, изготовленных из магнитомягких материалов (наконечник, экран), за счет вторичного поля. Изменение же намагниченности постоянного магнита из магнито жесткого материала из-за небольшой величины вторичного поля несущественно, и его можно не учитывать. При формировании оптимальной величины первичного намагничивающего поля применительно к конкретным задачам толщинометрии важное значение имеют геометрия постоянного магнита и свойства его материала. Таким образом, величина сигнала первичного преобразователя и его зависимость от толщины покрытий определяются вторичным магнитным полем намагниченной области контролируемого изделия, при этом сигнал не содержит неинформативной составляющей, обусловленной непосредственно первичным намагничивающим полем (поток, обусловленный постоянным магнитом, не регистрируется). В этом состоит принципиальное отличие и преимущество магнитодинамического метода по сравнению с другими, и это определяет значительно более широкие функциональные возможности магнитодинамических толщиномеров как по ширине диапазона измерений, так и по разрешающей способности. Компьютерное моделирование конструкции первичного преобразователя, схема которого представлена на рисунке 1а, и численные расчеты методом конечных элементов, выполняемые, например, в программе FEMM, позволяют путем решения прямых задач (зависимость величин

ны потока от вариации геометрии, магнитных свойств материалов элементов преобразователя) выбрать и оптимизировать параметры преобразователя. Так, для заданных диапазона измерений, магнитных свойств основания (покрытия, основания и покрытия) рассчитывается зависимость величины потока от толщины покрытий (градуировочная зависимость) и на основе этого выбираются оптимальные характеристики преобразователя, к которым относятся высота, радиус и материал стержневого магнита, геометрия полюсного наконечника, радиус экрана и т. д.

Далее приведем некоторые результаты численных расчетов и экспериментальных исследований применительно к созданию многофункционального толщиномера МТЦ-3. Задача заключалась в создании прибора, который обеспечивает измерение одним первичным преобразователем толщины немагнитных покрытий на сталях в диапазоне до 10 мм, никелевых на сталях и немагнитных основаниях в диапазоне до 150 мкм. Расчёты выполнены методом конечных элементов. Модель расчета: объект контроля – немагнитное покрытие толщиной (0 – 10) мм на ферромагнитном основании из низкоуглеродистой стали с однородными свойствами, никелевое покрытие толщиной (0 – 150) мкм на неферромагнитном (ферромагнитном) основании; источник первичного намагничивающего поля – цилиндрический постоянный магнит из неодим-железо-бора с полюсным наконечником из низкоуглеродистой стали в виде стержня с полусферическим основанием, помещенные в цилиндрический экран из такого же магнитомягкого материала.

По результатам расчетов и экспериментальных исследований можно сформулировать общие закономерности. Изменяя соотношение высот постоянного магнита и полюсного наконечника, можно в несколько раз изменить разрешающую способность; использование магнита без наконечника нецелесообразно; оптимальное соотношение их линейных размеров равно единице. Уменьшение диаметра эк-

рана приводит к увеличению разрешающей способности, сужению диапазона измерений и снижению степени влияния размеров изделия на результаты контроля. Независимо от отношения высоты магнита к высоте наконечника толщина основания влияет на точность контроля примерно на порядок меньше, чем диаметр магнита, т. е. при отношении толщины основания к диаметру магнита 0,1 дополнительная погрешность отсутствует. На рисунках 2-4 представлены градуировочные зависимости толщиномера МТЦ-3 с одним первичным преобразователем, обеспечивающим контроль покрытий разных типов на различных основаниях: немагнитных на сталях, никелевых на сталях и немагнитных материалах. Скачок сигнала на рисунке 2 обусловлен автоматическим переключением усиления для обеспечения необходимой разрешающей способности на немагнитных покрытиях толщиной более 1000 мкм.

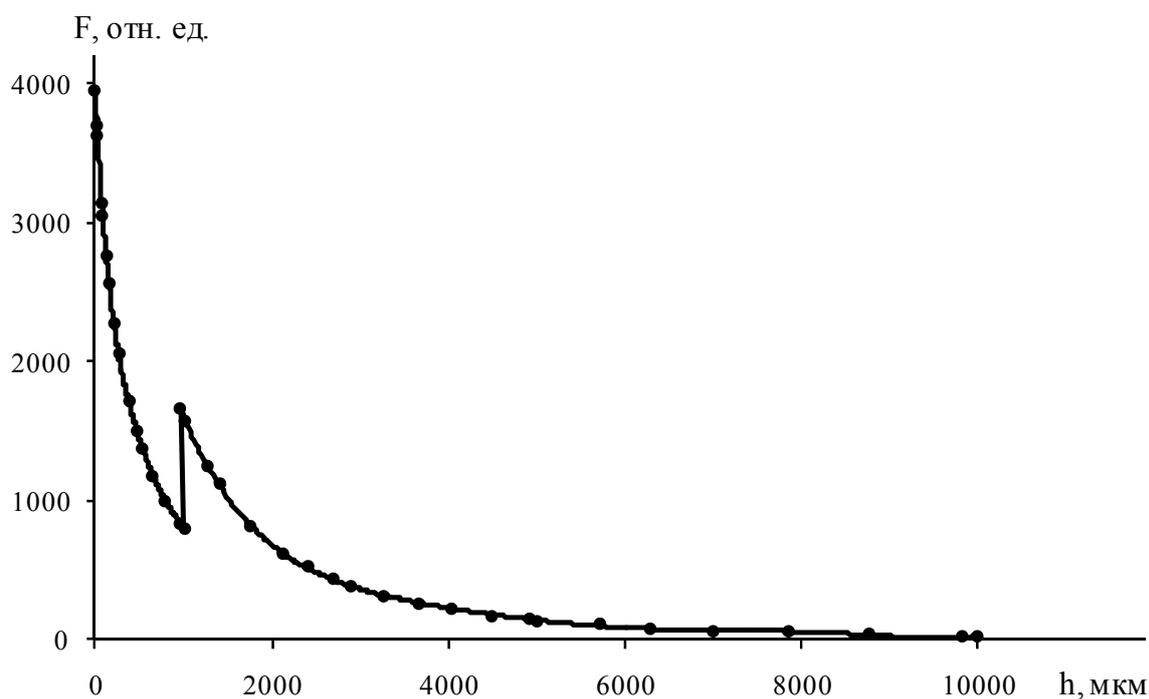


Рис. 2. Зависимость сигнала F от толщины h немагнитных покрытий на стали

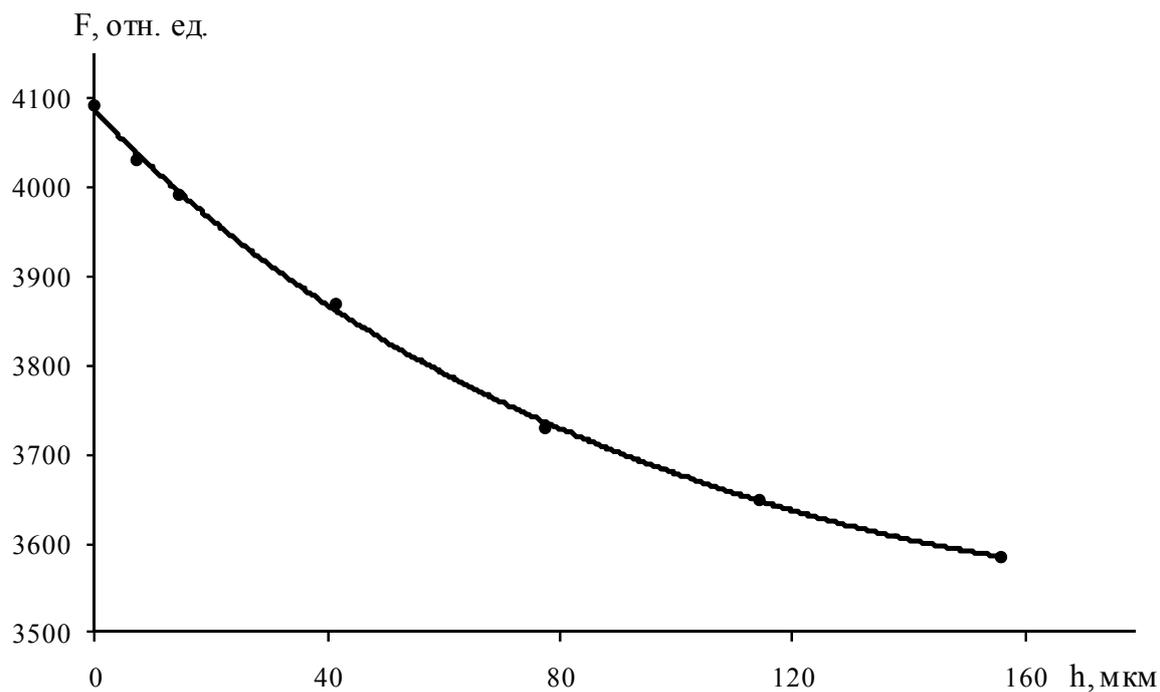


Рис. 3. Зависимость сигнала F от толщины h никелевых покрытий на стали

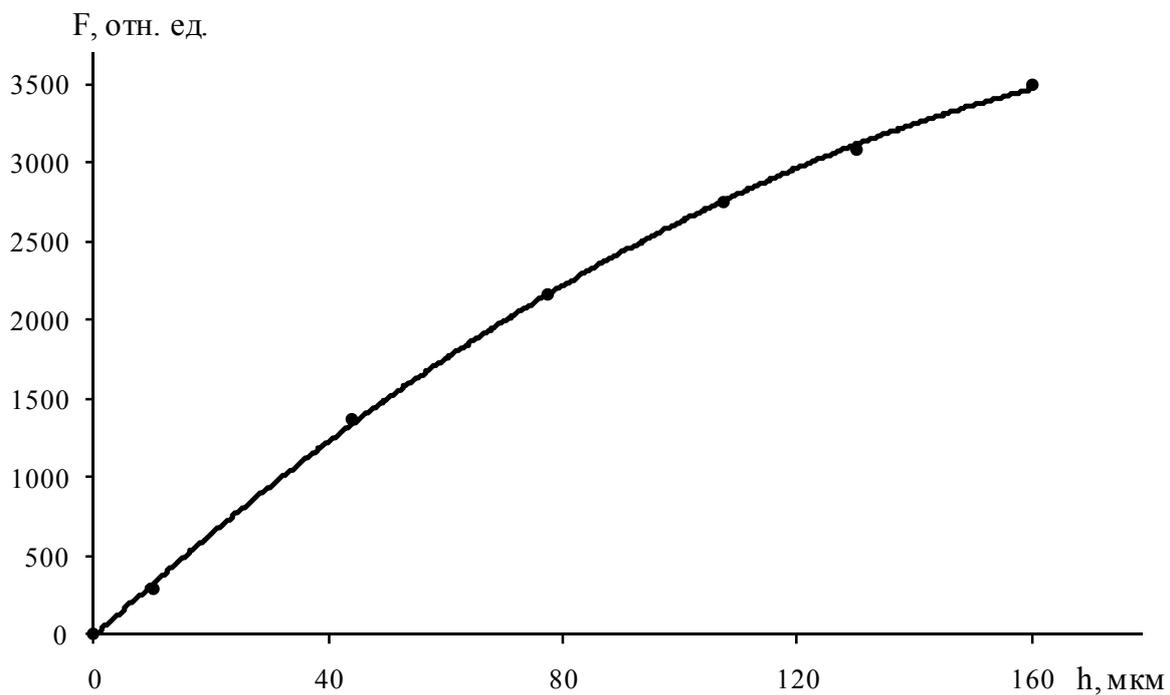


Рис. 4. Зависимость сигнала F от толщины h никелевых покрытий на немагнитном основании

Более наглядно функциональные возможности прибора представлены в таблице 1, где показан уровень разрешающей способности, полученной экспериментально на аттестованных мерах толщины покрытий.

Табл. 1. Разрешающая способность толщиномера МТЦ-3

Типы покрытия и основания	Немагнитное на стали			Никель на стали				Никель на немагнитном основании			
	10	100	300	5	50	100	150	5	50	100	150
Толщина покрытия, мкм											
Разрешающая способность, мкм	0,08	0,12	0,28	0,22	0,34	0,36	0,41	0,039	0,043	0,047	0,059

Столь высокая разрешающая способность позволяет использовать эти приборы не только в практике обычной толщинометрии, но и для проведения научно-исследовательских работ при создании сверхтонких покрытий, в том числе многослойных, при отработке технологии их нанесения. В настоящее время на основе магнитодинамического метода во многом решены задачи контроля толстослойных (толщиной до 1000 мкм) никелевых покрытий на немагнитных основаниях (свидетельство № 40481 об утверждении типа толщиномеров никелевых покрытий магнитных МТНП-1, зарегистрированных в Государственном реестре средств измерений Российской Федерации под № 44898-10), ингредиентов двухслойных (немагнитное покрытие на слабомагнитном, например, хром на никеле), слабомагнитных покрытий с максимальной магнитной проницаемостью в несколько единиц, наносимых на немагнитные и магнитные основания. Одновременно с разработкой методик и приборов контроля названных покрытий созданы средства их метрологического обеспечения (свидетельство № 40588 об утверждении типа мер толщины покрытий МТОНП, МТНП, МТДХПН, зарегистрированных в Государственном реестре средств измерений Российской Федерации под № 44899-10).

Функциональные возможности магнитодинамического метода толщинометрии обеспечиваются соответствующим выбором характе-

ристик первичных преобразователей. Контроль толщины немагнитных покрытий на стали, никелевых на магнитных и немагнитных основаниях одним первичным преобразователем обеспечивает базовая модель толщиномера МТЦ-3; внешний вид прибора показан на рисунке 5. Прибор обеспечивает измерения с одной и той же погрешностью ( $1,5 \text{ мкм} + 2 \%$  от измеряемой толщины) для названных сочетаний физических свойств покрытий и оснований. Однако при практическом использовании наряду с функциональными возможностями возникает вопрос стоимости прибора, включая его метрологическое обеспечение. С целью минимизации затрат и, в некоторой степени, оптимизации характеристик приборов в институте создано десять модификаций магнитодинамических толщиномеров; их характеристики приведены в таблице 2. В приборах типа МТЦ-2М не предусмотрена статистическая обработка результатов измерений.



Рис. 5. Толщиномер МТЦ-3

Табл. 2. Магнитодинамические толщиномеры покрытий, разработанные в ИПФ НАН Беларуси

Наименование толщиномера, обозначение его модели (модификации)	Типы контролируемых покрытий, оснований под покрытиями	Диапазон измерений, мкм	Пределы допускаемой основной погрешности, мкм
Толщиномер МТЦ-2М-1	Неферромагнитные покрытия на ферромагнитных основаниях	0 – 5000	±(1,5 + 2 % от измеряемой толщины покрытия)
Толщиномер МТЦ-2М-2	Никелевые покрытия на ферромагнитных основаниях	0 – 100	
Толщиномер МТЦ-2М-3	Никелевые покрытия на ферромагнитных основаниях	0 – 100	
Толщиномер МТЦ-2М-4	Неферромагнитные покрытия на ферромагнитных основаниях	0 – 500	
Толщиномер МТЦ-3	Неферромагнитные покрытия на ферромагнитных основаниях	0 – 6000	
	Никелевые покрытия на ферромагнитных и ферромагнитных основаниях	0 – 150	
Толщиномер МТЦ-3-1	Неферромагнитные покрытия на ферромагнитных основаниях	0 – 1000	
Толщиномер МТЦ-3-2		0 – 5000	
Толщиномер МТЦ-3-3		0 – 10000	
Толщиномер МТЦ-3-4	Никелевые покрытия на ферромагнитных основаниях	0 – 50	
Толщиномер МТЦ-3-5	Никелевые покрытия на ферромагнитных основаниях	0 – 100	
<p><i>Примечание:</i> все перечисленные толщиномеры внесены в Государственные реестры средств измерений Республики Беларусь и Российской Федерации (толщиномеры типа МТЦ-2М: сертификат РБ № 2174, сертификат РФ № 15804/1; толщиномеры типа МТЦ-3: сертификат РБ № 2944, сертификат РФ № 20712)</p>			

Высокие метрологические характеристики, надежность, простота в эксплуатации, функциональные возможности приборов типа МТЦ

обеспечивают достаточно широкое их применение в разных отраслях промышленности Республики Беларусь и стран СНГ.

Примерно за шесть лет с момента создания в промышленную эксплуатацию передано около пятисот приборов. По нашим оценкам, предприятия Республики Беларусь практически не производят закупки импортных толщиномеров.

### Литература

1. Кременькова Н.В., Лукьянов А.Л., Лухвич А.А., Шарандо В.И., Шукевич А.К. Расчет вторичных магнитных полей применительно к толщиномерии немагнитных покрытий // Дефектоскопия, 2001, № 9. – С. 13-19.
2. Патент на полезную модель № 1030 РБ, МКИ G 01R 33/00. Устройство для неразрушающего контроля с посадочными магнитами (А.А. Лухвич, А.Л. Лукьянов) // Бюл. изобр., 2003, № 3, ч. 2. – С. 309.
3. Lukhvich A.A., Lukyanov A.L. Gauge for measuring thickness with bar magnets // NDT in Progress. Proceedings of II-nd International Workshop of NDT Experts. – Prague, October 06-08, 2003. – P. 151-156.
4. Шукевич А.К., Лухвич А.А., Кременькова Н.В., Лукьянов А.Л., Шарандо В.И. Особенности магнитной толщиномерии гальванических никелевых покрытий // Дефектоскопия, 2004, № 11. – С. 62-68.
5. Лухвич А.А., Лукьянов А.Л. Динамическая магнитная толщиномерия, новые возможности и перспективы // Неразрушающий контроль и диагностика. Тез. докл. XVII Российской научно-технической конференции. – Екатеринбург, 5-11 сентября 2005 г. – С. 38.
6. Лухвич А.А., Лукьянов А.Л., Шарандо В.И., Полоневич А.А. Первичные преобразователи динамических магнитных толщиномеров, расчёт и экспериментальные исследования. – Там же, с. 39.
7. Lukhvich A.A., Lukyanov A.L. New Magnetic Thickness Gauge Based on a Dynamic Method of Measurement of Secondary Magnetic Fields // 9-th European Conference on NDT. DGZfP-Proceedings BB 103-CD. – Berlin, September 25-29, 2006. – Poster 90.
8. Лухвич А.А., Лукьянов А.Л., Шукевич А.К. Оценка влияния мешающих факторов при магнитной толщиномерии // Дефектоскопия, 2007, № 12. – С. 43-52.
9. Лухвич А.А., Булатов О.В. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины двухслойных покрытий // Дефектоскопия, 2008, № 10. – С. 26-34.
10. Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами (эксперимент) // Дефектоскопия, 2009, № 11. – С. 46-53.