

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

№12

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

2010

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕТОКОВОГО ЧАСТОТНОГО МЕТОДА

В.А. Сясько

Проведен анализ применяемых в промышленности сочетаний “электропроводящее неферромагнитное покрытие — электропроводящее неферромагнитное основание” с разделением их на пять групп в зависимости от соотношения их электропроводностей. Рассмотрены схема, конструкция и принципы функционирования вихретоковых частотных преобразователей, приведены основные зависимости для определения их параметров (рабочая частота, диаметр обмотки, чувствительность к информативному параметру и мешающим факторам и др.). Приведены примеры задач измерения и оптимального применения метода, достигаемые метрологические характеристики для малогабаритных преобразователей.

Ключевые слова: вихретоковый частотный метод, электропроводность, толщина покрытия, неферромагнитное основание, метрологические характеристики.

Металлические покрытия являются наиболее распространенными в машиностроительных производствах. Прежде всего они выполняют функции защиты от коррозии, декоративные покрытия обеспечивают привлекательный вид изделий и удобство обращения с ними, защитно-декоративные покрытия выполняют обе функции. Специальные (технические) покрытия служат для придания поверхностям изделий и деталей определенных свойств — износостойких, антифрикционных, теплозащитных, электропроводящих и др.

Анализ нормативных документов и литературных источников показывает, что для указанных выше назначений в качестве покрытий используют двадцать четыре металла. Некоторые из них имеют самое широкое применение, например, цинк, хром, олово, медь, никель, кадмий. Часть — очень узкое специальное применение. Диапазон толщин наносимых покрытий составляет от нескольких мкм до одного мм. Применяется также не менее тридцати типов сплавов (олово—цинк, цинк—никель, палладий—никель и др.).

Измерение толщины металлических неферромагнитных покрытий на ферромагнитных основаниях и ферромагнитных покрытий на неферромагнитных основаниях с хорошей подготовкой поверхности (шероховатость на уровне $R_a = 0,5—1$ мкм) оптимально проводить с использованием магнитоиндукционных толщиномеров [1, 2]. Вихретоковые фазовые толщиномеры позволяют производить измерение толщины металлических ферро- и неферромагнитных покрытий на ферромагнитных изделиях с шероховатостью поверхности до $R_z = 40$ мкм, а в ряде случаев и больше, а также на малоразмерных деталях [3].

Вместе с тем в условиях современных производств, особенно приборостроительных, широкое распространение имеют изделия из цветных металлов и сплавов с покрытиями из электропроводящих неферромагнитных металлов и сплавов. В таблице приведены основные применяемые в промышленности сочетания “металлическое неферромагнитное покрытие/основание из цветных металлов”.

В качестве оснований выступают металлы и сплавы с электропроводностью σ_0 от ~ 1 МСм/м до ~ 60 МСм/м. Электропроводность покрытий σ_n , в свою очередь, составляет от ~ 5 МСм/м до ~ 60 МСм/м.

**Основные защитные металлические неферромагнитные покрытия
на изделиях из цветных металлов**

Покрытие	Основание
Золото—кобальт Золото—никель Медь Медь через подслои никеля Олово—висмут Олово—свинец Серебро Хром Хром через подслои никеля Цинк	Латуни ЛС-59 и Л63
Медь Медь через подслои никеля Олово—висмут Олово—свинец Серебро Серебро через подслои меди Хром Хром через подслои никеля	Бронзы
Золото Олово (химический способ) Олово (горячий способ) Олово—висмут Олово—свинец Палладий Палладий через подслои никеля Серебро Хром Хром через подслои никеля Цинк	Медь
Алюминий (плакировочный слой) Медь Медь через подслои никеля Никель химический Никель химический с подслоем меди Олово—висмут через подслои никеля химического Цинк	Алюминиевые сплавы (типа АМг и дюралюминия)
Медь гальваническая через подслои никеля Серебро Хром	Титан и сплавы на его основе

Все множество сочетаний покрытие/основание объединим в 5 групп, в зависимости от отношения электропроводностей σ_n/σ_0 :

- 1) $\sigma_n \gg \sigma_0$ (например, серебро на титане, медь на латуни и др., для которых $\sigma_n/\sigma_0 \approx 3$ и более);
- 2) $\sigma_n \geq \sigma_0$ (например, цинк на латуни Л63, для которых $\sigma_n/\sigma_0 \approx 1,6—2$);

- 3) $\sigma_n \approx \sigma_o$ (например, олово на латуни Л63, для которых $\sigma_n/\sigma_o \approx 0,8-1,2$);
- 4) $\sigma_n \leq \sigma_o$ (например, хром на латуни Л63, для которых $\sigma_n/\sigma_o \approx 0,6-0,4$);
- 5) $\sigma_n \ll \sigma_o$ (например, оловянные сплавы на меди, для которых $\sigma_n/\sigma_o \approx 0,2$ и менее).

Представляет интерес использование вихретокового частотного (параметрического) метода для измерения толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий на изделиях из цветных металлов. Возможность измерения вихретоковыми методами поясняется рис. 1, на котором представлено электропроводящее неферромагнитное покрытие толщиной T_n и электропроводностью σ_n , на неферромагнитном электропроводящем основании электропроводностью σ_o в зоне вихревых токов. Вихревые токи, индуцированные в объекте контроля, распространяются как в покрытии, так и в основании. Вихревые токи $J_{вт}$ в каждом слое оказывают свое, отличное друг от друга влияние на результирующее магнитное поле системы преобразователь — объект контроля [3].



Рис. 1. Распространение вихревых токов в электропроводящем неферромагнитном покрытии и электропроводящем неферромагнитном основании.

Можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности σ_n объекта контроля в объеме распространения вихревых токов, изменяющемся в зависимости от толщины покрытия T_n . Так, если толщина покрытия $T_n = 0$, то $\sigma_n = \sigma_o$. При увеличении толщины покрытия от нуля до значения $T_n = \infty$ интегральная электропроводность объекта контроля будет изменяться от σ_o до σ_n .

Рассмотрим работу вихретокового частотного преобразователя на основе автогенераторной схемы (рис. 2).

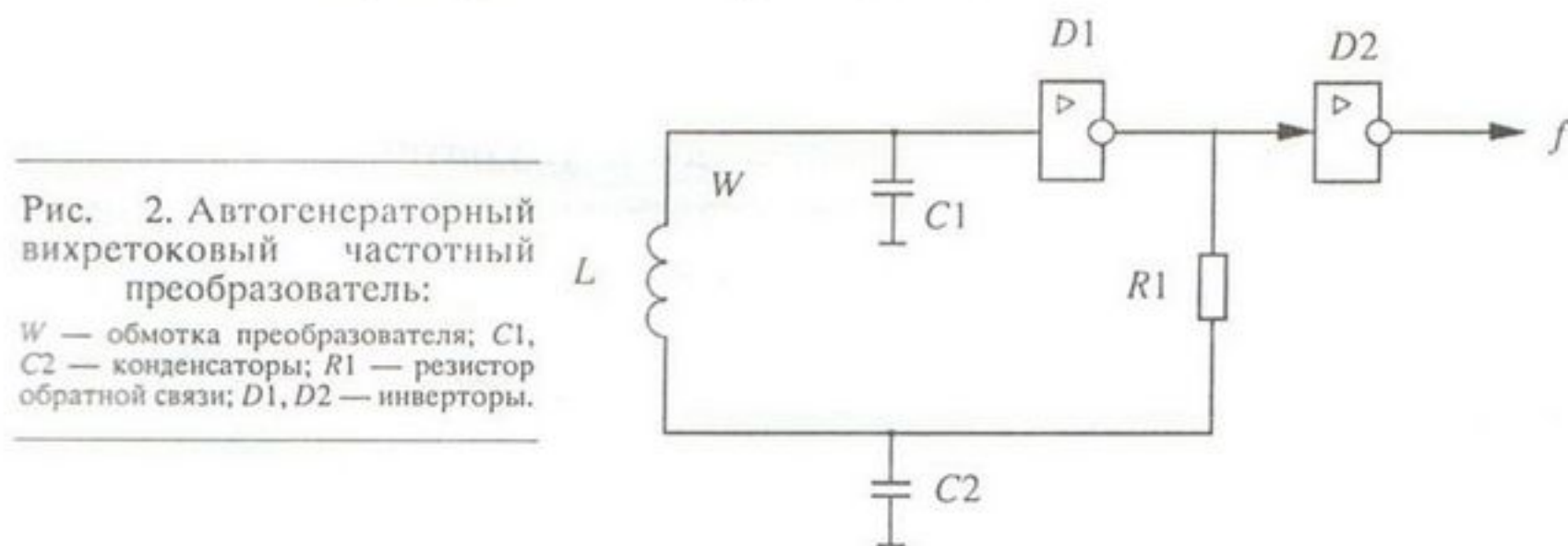


Рис. 2. Автогенераторный вихретоковый частотный преобразователь:
 W — обмотка преобразователя; C1, C2 — конденсаторы; R1 — резистор обратной связи; D1, D2 — инверторы.

Вихретоковый метод измерения основан на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля обмотки W первичного преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в кон-

тролируемом объекте и зависящих от T_n , σ_n , σ_o и геометрических характеристик основания и покрытия (диаметра d , шероховатости R_a и др.), а также величины зазора h между покрытием и контактной поверхностью преобразователя.

Обмотка W , возбуждаемая переменным током $i(t)$, создает переменный магнитный поток $\Phi(t)$, индуцирующий в электропроводящем объекте вихревые токи $J_{вт}(t)$. Магнитный поток $\Phi_{вт}(T_n, t)$, возбужденный вихревыми токами, противодействует магнитному потоку $\Phi(t)$.

Индуктивность катушки $L_{вт}$ с учетом влияния поля вихревого тока будет зависеть от толщины покрытия

$$L_{вт}(T_n) = (\Phi - \Phi_{вт}(T_n))/I,$$

где Φ и $\Phi_{вт}(T_n)$ — действующие значения магнитных потоков, а I — действующее значение тока.

Обозначим как L_∞ собственную индуктивность обмотки W , не взаимодействующей с электропроводящим объектом. Тогда отношение $l(T_n) = L_{вт}(T_n)/L_\infty$ будем называть относительной индуктивностью обмотки W . С увеличением σ_n объекта контроля $J_{вт}(t)$ будет возрастать, а величина $L_{вт}(T_n)$ уменьшаться. Таким образом, $l(T_n)$ обратно пропорциональна σ_n .

Частота колебаний f автогенератора зависит от индуктивности $L_{вт}(T_n)$, а следовательно, от σ_n и T_n :

$$f(T_n) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{вт}(T_n)C_3}},$$

где $C_3 = C_1C_2/(C_1 + C_2)$ — эквивалентная емкость колебательного контура.

В общем случае глубина проникновения вихревых токов δ , определяющая максимальную измеряемую толщины покрытия $T_{n\max}$, составляет [3]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}},$$

где μ_0 — магнитная постоянная; σ — электропроводность объекта контроля.

Для обеспечения приемлемой чувствительности преобразователя $T_{n\max}$ следует выбирать из условия [4]

$$T_{n\max} = (0,6—0,8)\delta.$$

Из двух последних соотношений следует, что оптимальное значение частоты преобразователя $f_{\text{опт}}$ равно

$$f_{\text{опт}} \approx (0,6—0,8)/(\pi \mu_0 \sigma_n T_{n\max}^2).$$

Оптимальное значение эквивалентного радиуса R обмотки W следует выбирать из условия [3]

$$R\sqrt{2\pi f_{\text{опт}}} \approx \frac{\sqrt{\sigma_n \mu_0}}{5}.$$

При анализе характеристик преобразователей следует учесть влияние основных мешающих факторов:

зазора h между преобразователем и покрытием;

диаметра d основания в зоне измерения и его вариации;
 шероховатости R_a поверхности изделия;
 вариации электропроводности основания и покрытия.

Рассмотрим характеристики и возможность применения малогабаритных вихретоковых частотных преобразователей, чувствительные элементы которых представлены на рис. 3 (*a* — с внешним ферритовым экраном, *b* — без экрана). Преобразователи имеют технологически достижимые размеры. Индуктивность обмотки экранированного преобразователя $L_{\infty} = 4,16$ мкГн, неэкранированного преобразователя — $L_{\infty} = 2,75$ мкГн, емкости конденсаторов автогенератора $C_1 = C_2 = 390$ пФ. Проведем анализ основных метрологических характеристик для следующих типовых задач измерения “покрытие/основание”:

медь (серебро)/латунь ЛС59 ($\sigma_n/\sigma_o \sim 59$ МСм/16,5 МСм/м);

олово—висмут/медь ($\sigma_n/\sigma_o \sim 9,7$ МСм/59 МСм/м);

олово/латунь ЛС59 ($\sigma_n/\sigma_o \sim 9,7$ МСм/16,5 МСм/м).

Эквивалентный радиус чувствительного элемента экранированного преобразователя составляет порядка 1,25 мм, неэкранированного — порядка 1 мм. Частота на выходе автогенераторов при удалении преобразователей от электропроводящих изделий соответственно для экранированного $f_{\infty} \approx 5,6$ МГц, для неэкранированного $f_{\infty} \approx 6,8$ МГц.

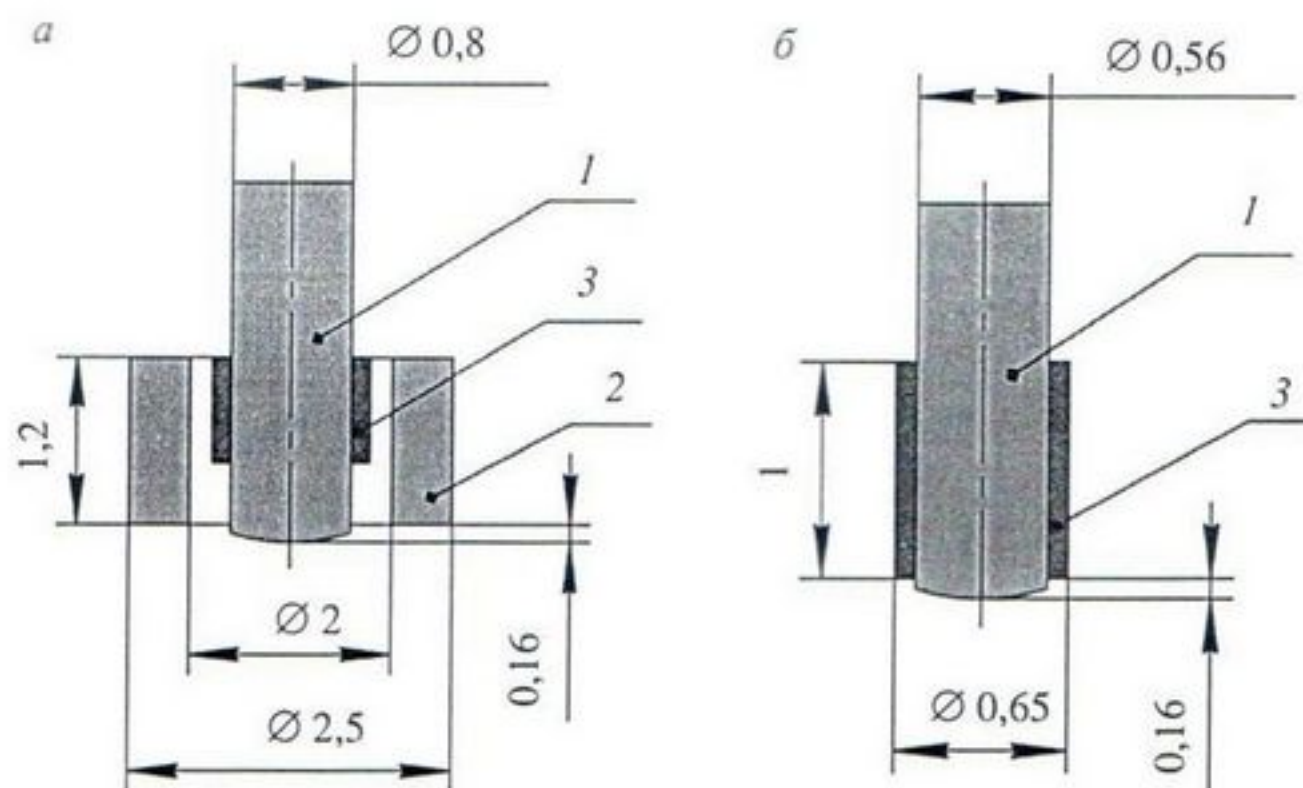


Рис. 3. Чувствительные элементы малогабаритных вихретоковых частотных преобразователей (*a* — с внешним ферритовым экраном, *b* — без экрана):

1 — ферритовый сердечник; 2 — внешний ферритовый экран (кольцо); 3 — обмотка W .

На рис. 4 представлены зависимости относительной индуктивности l от интегральной электропроводности σ_n объекта контроля (при $h = 0$) для малогабаритных преобразователей.

На рис. 5 изображены снятые экспериментально зависимости $l(T_n)$ для трех типовых задач измерений, соответствующих $\sigma_n \gg \sigma_o$ (медь/латунь ЛС59), $\sigma_n \ll \sigma_o$ (олово—висмут/медь), $\sigma_n < \sigma_o$ (олово/латунь ЛС59).

На рис. 6 показаны зависимости относительной индуктивности l от относительного зазора h для медного и латунного оснований. На рис. 7 — зависимости эквивалентного относительного зазора h^* от диаметра основания d .

Из рис. 4 и 5 видно, что наибольшую крутизну имеет начальный участок кривой на интервале изменения интегрального значения эле-

ктропроводности $\sigma_{\text{н}}$ до 15 МСм/м. С увеличением $\sigma_{\text{н}}$ чувствительность снижается, при $\sigma_{\text{н}} > 15$ МСм/м характеристика практически линейна.

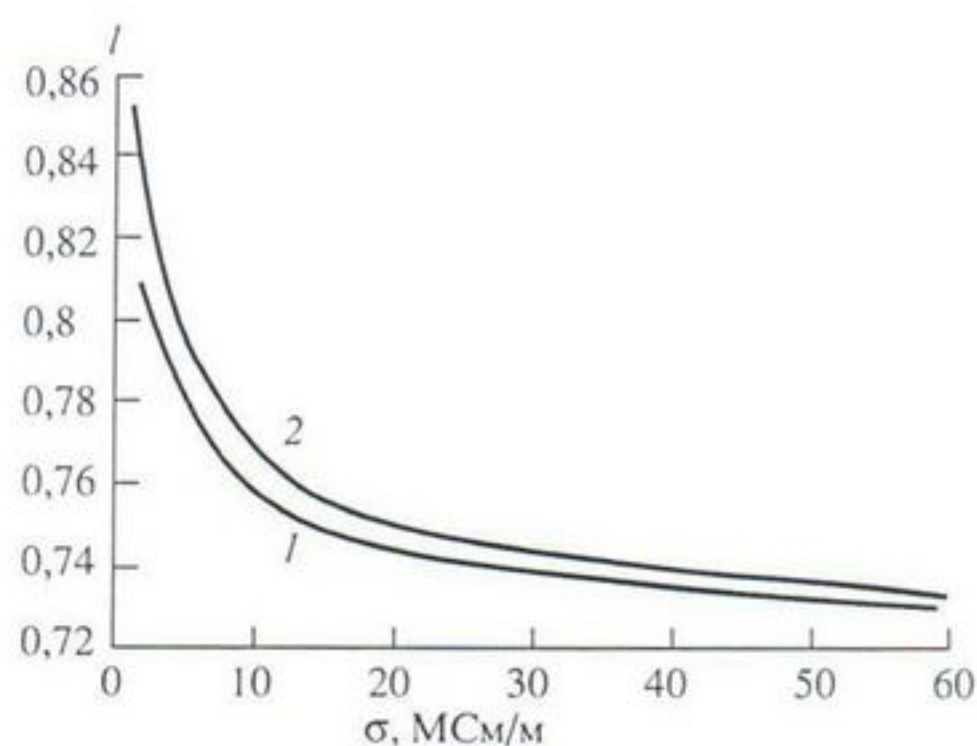


Рис. 4. Зависимости относительной индуктивности l от интегральной электропроводности $\sigma_{\text{н}}$ объекта контроля для экранированного 1 и неэкранированного 2 преобразователей при $h = 0$.

Из рис. 6 следует, что вариация σ_0 несущественно изменяет наклон характеристики $l(h)$, лишь аддитивно смещает ее. Преобразователи весьма чувствительны к изменению зазора h . Наличие зазора при измерении

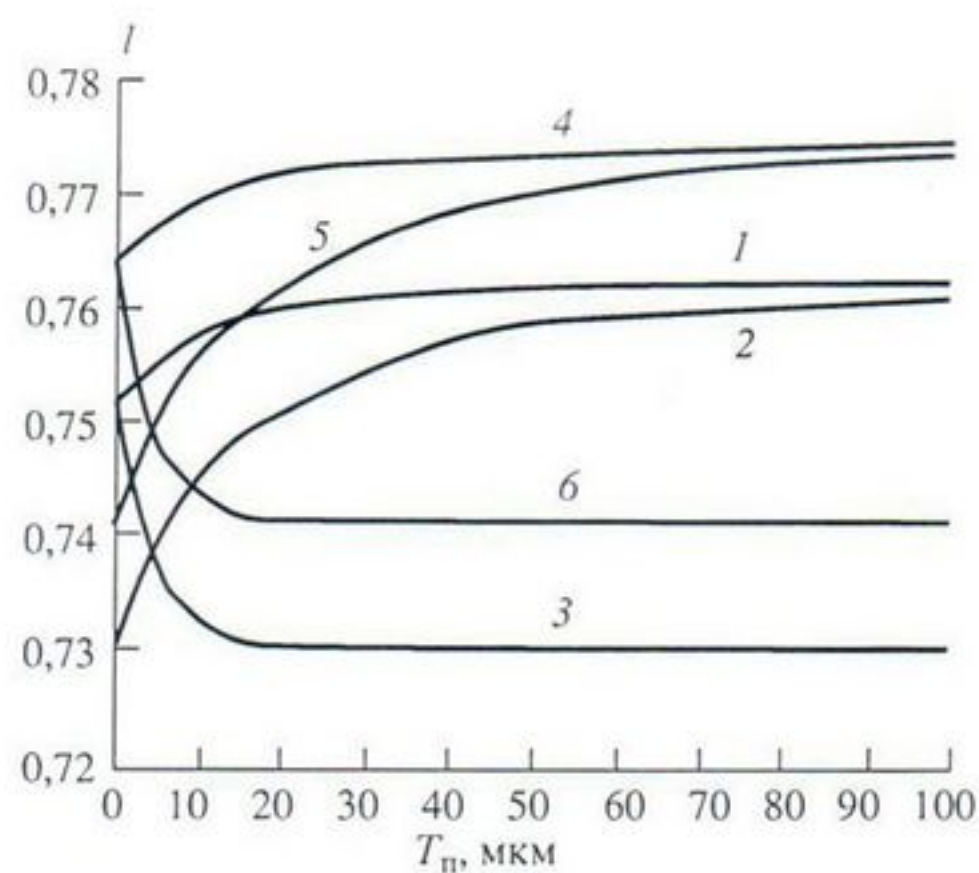


Рис. 5. Зависимости $l(T_n)$ для трех типовых задач измерения толщины неэкранированным преобразователем:

(1 — олово/латунь ЛС59; 2 — олово—висмут/медь; 3 — медь/латунь ЛС59) и экранированным преобразователем (4 — олово/латунь ЛС59; 5 — олово—висмут/медь; 6 — медь/латунь ЛС59).

ях, обусловленного в том числе перекосами при установке преобразователя на изделие и шероховатостью поверхности преобразователя, приведет к дополнительной погрешности измерения, оценка которой будет описана далее. На рис. 7 показано, что изменение диаметра основания эквивалентно изменению зазора h^* , что соответственно также будет при-

водить к возникновению дополнительной погрешности при измерении. Это накладывает определенные ограничения на применение преобразователей для измерения толщины электропроводящих покрытий на изде-

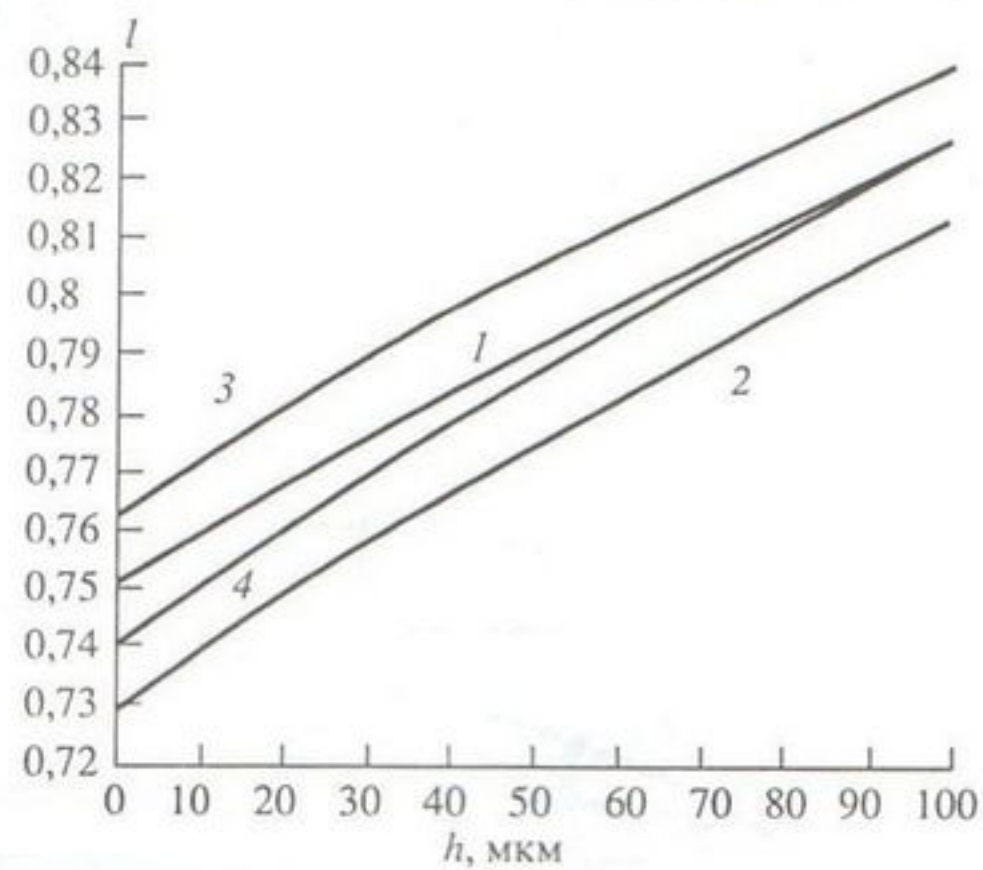


Рис. 6. Зависимость относительной индуктивности $I(h)$ для неэкранированного преобразователя (1 — медного и 2 — латунного оснований) и экранированного преобразователя (3 — медного и 4 — латунного оснований).

лиях с переменными кривизной или радиусом, а также на изделиях с повышенной шероховатостью. Конструкция преобразователей должна обеспечивать их установку нормально к поверхности и исключать перекосы при проведении измерений.

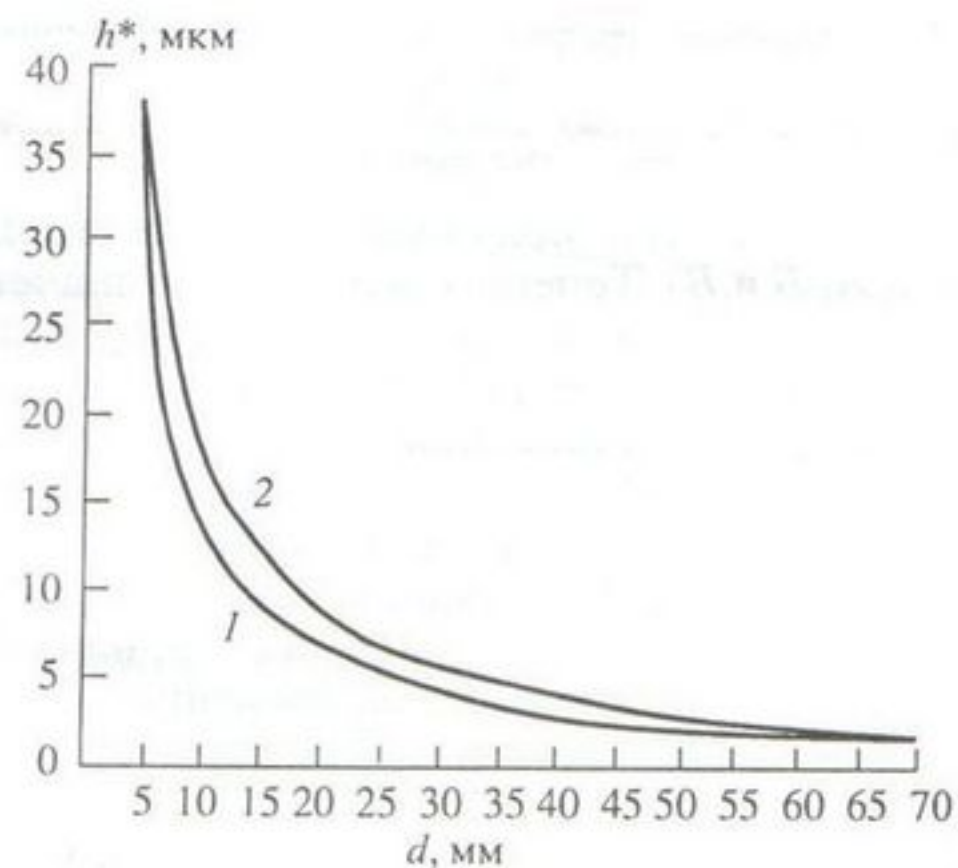


Рис. 7. Зависимость эквивалентного относительного зазора h^* от диаметра d основания для неэкранированного 1 и экранированного 2 преобразователей.

Рассмотрим задачи измерения толщины типовых гальванических покрытий олово/латунь ЛС59, олово—висмут/медь и медь/латунь ЛС59 на примере неэкранированного преобразователя.

Глубина проникновения δ будет изменяться от 26 мкм для меди до 63 мкм для олова и соответственно $T_{\text{пmax}}$ будет порядка 17—20 мкм для меди и 38—50 мкм для олова. Близкие характеристики будут и для экранированного преобразователя. Для исследования влияния геометрических характеристик изделия d , R_a и зазора h на результаты измерения наложим на кривые 1—3 (рис. 5) характеристику $l(h)$, представленную на рис. 6. Результат совмещения характеристик в точке измерения $T_n \approx 10$ мкм представлен на рис. 8.

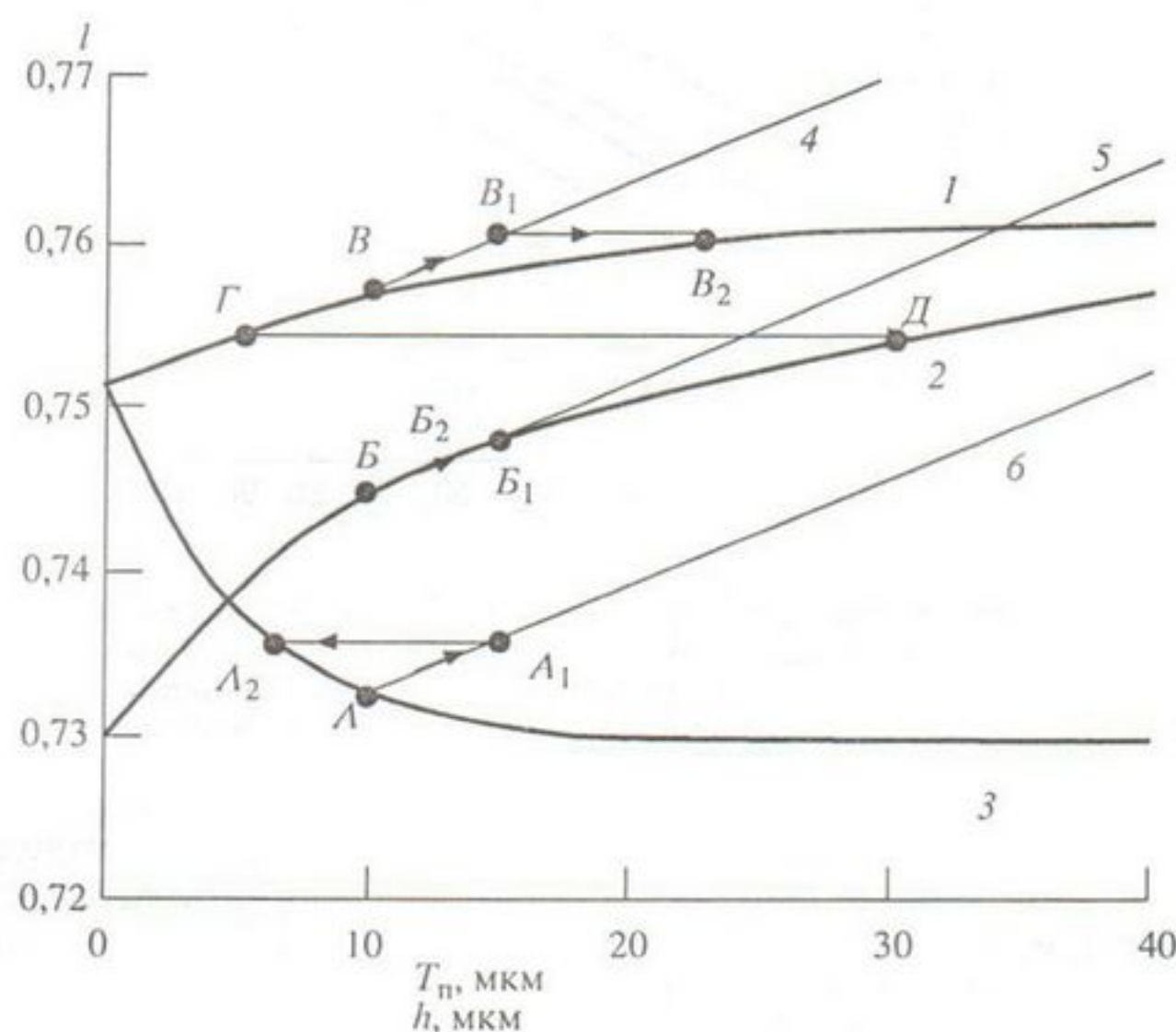


Рис. 8. Совмещенный график зависимостей $l(h)$ (кривые 4—6) и $l(T_n)$:

1 — олово/латунь ЛС59; 2 — олово—висмут/медь; 3 — медь/латунь ЛС59 для неэкранированного преобразователя.

Пусть при измерении мы получили значение толщины покрытия $T_n = 10$ мкм (точки A , B и V). Теперь допустим, что значение зазора h увеличилось от нуля до величины $h = 5$ мкм (точки A_1 , B_1 и B_2), что может быть вызвано переходом от измерения покрытия на плоском изделии к цилиндрическому изделию диаметром 25 мм или на участок изделия с шероховатостью порядка $R_a = 3—5$ мкм. По градуировочной характеристике преобразователя мы получим значения T_n , отличные от реальных (точки A_2 , B_2 и B_1). Следовательно, изменение зазора h на 5 мкм вызовет изменение показаний на величины минус 3, плюс 5 и плюс 13 мкм в зависимости от параметров покрытие/основание (изменение зазора на $\Delta h = 1$ мкм будет приводить к изменению результата измерения на величину порядка $\Delta T_n \approx 0,6—2,5$ мкм). В соответствии с рис. 7 указанную погрешность измерений будет вызывать изменение диаметра d основания с 60 до 50 мм или с 20 до 18 мм, или изменение шероховатости R_a на 1 мкм. Близкие значения изменения результатов измерения будут и для экранированного преобразователя.

Очевидно, что погрешность от изменения зазора h тем меньше, чем более крутая характеристика $l(T_n)$ в диапазоне измерения T_n (чем больше отличаются σ_n и σ_o и чем меньше T_n).

Аналогично девиация электропроводности основания будет тем меньше влиять на результат измерения, чем больше отличаются σ_n и σ_o .

При измерении толщины покрытий изделий с малым отношением σ_n/σ_0 изменение σ_0 вызовет большую погрешность измерения. Так, из графиков 1 и 3 на рис. 8 видно, что в случае измерения толщины $T_n = 30$ мкм (точка Г) по градуировочной характеристике 3 ($\sigma_0 = 59$ МСм/м, медь) изменение σ_0 до величины порядка 16 МСм/м (латунь ЛС59) приведет к существенному изменению показаний (точка Д). Показания станут равными $T_n \approx 5$ мкм, то есть можно утверждать, что изменение электропроводности основания на 1,75 МСм/м будет приводить к изменению показаний на $\Delta T_n \approx 1$ мкм. В соответствии с рис. 4 близкие изменения показаний будут и в других точках диапазона измерения.

С учетом приведенных зависимостей можно оценить допустимые величины девиации зазора, кривизны изделия и шероховатости, а также электропроводностей покрытия и основания, обеспечивающие требуемые значения погрешности измерения.

Конструкция преобразователя ПДО, обеспечивающего необходимые условия проведения измерений, представлена на рис. 9.

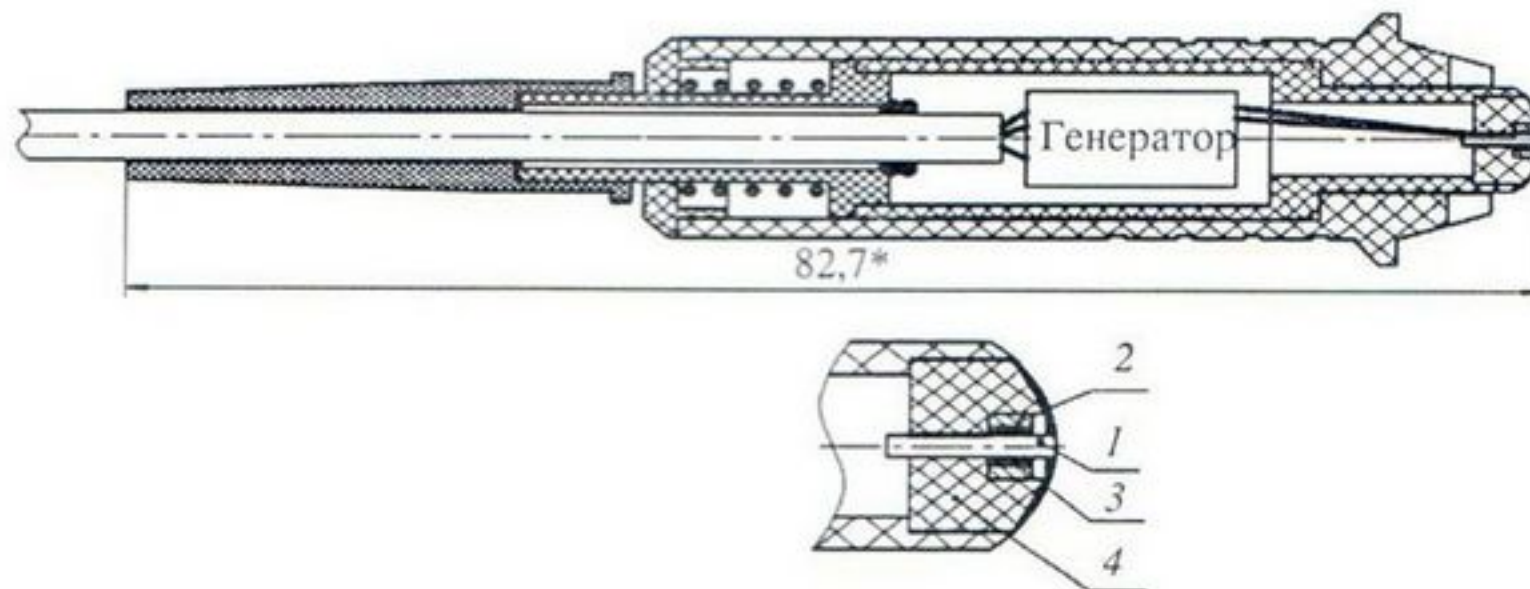


Рис. 9. Конструкция накладного преобразователя ПДО и его чувствительный элемент:

1 — ферритовый сердечник; 2 — экран из ферритового кольца; 3 — обмотка; 4 — корпус для сборки и заливки.

Соприкосновение ферритового магнитопровода непосредственно с поверхностью покрытия значительно повышает чувствительность преобразователя в области малых толщин. Для уменьшения влияния наклона преобразователя относительно поверхности объекта ферритовый стержень точно совмещается с осью преобразователя, а торец преобразователя выполняется квазисферическим на шлифовальном станке. Конструкция деталей внутреннего и наружного (установочного) корпусов обеспечивает точную симметрию всех элементов относительно оси преобразователя и исключает люфты при их взаимном перемещении в момент установки на изделие. Внешний корпус имеет призматическое (V-образное) углубление на торце, что позволяет устанавливать преобразователь перпендикулярно образующей цилиндрических изделий. Преобразователи имеют встроенную энергонезависимую память для хранения нескольких градуировочных характеристик «покрытие/основание».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные малогабаритные вихретоковые частотные преобразователи оптимально применять для измерения электропроводящих неферромагнитных покрытий малой толщины на электропроводящих неферромагнитных изделиях широкой номенклатуры размеров и форм с

шероховатостью до $R_a = 0,8—1,6$ мкм при $\sigma_n \gg \sigma_0$ (например, серебро на титане, медь на латуни и др., для которых $\sigma_n/\sigma_0 \geq 3$).

При $\sigma_n \geq \sigma_0$ приемлемые результаты достигаются на плоских изделиях и изделиях с малым неизменным прогибом и хорошо подготовленной поверхностью ($R_a \leq 0,8$ мкм), а также на образцах-свидетелях.

В случае $\sigma_n \ll \sigma_0$ метод применим при измерении покрытий малой толщины (до 10 мкм) на хорошо подготовленных плоских образцах-свидетелях и при измерении покрытий толщиной более 20—30 мкм на квазиплоских изделиях.

При обеспечении указанных условий проведения измерений толщины возможно достижение абсолютной допустимой погрешности измерения на уровне ± 1 мкм.

Вихретоковые параметрические преобразователи также могут с успехом применяться для измерения толщины анодно-окисных пленок на алюминиевых сплавах.

Особое внимание при снятии градуировочных характеристик и эксплуатации преобразователей следует уделить аттестации эталонных металлических образцов толщины покрытий [1, 5].

Разработанные преобразователи в составе толщиномеров “Константа К6 гальванический” нашли широкое применение в авиа-, ракето-, авто- и приборостроении, а также на предприятиях, изготавливающих электротехническое оборудование.

Северо-Западный государственный
заочный технический университет
Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
20 июля 2010 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаджанов Л.С., Бабаджанова М.Л. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий.— М.: Изд-во стандартов, 2004.— 264 с.
2. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. Под ред. В.В. Клюева. Т. 6. Кн. 1. Магнитные методы контроля.— М.: Машиностроение, 2003, с. 358.
3. Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. Научное, методическое, справочное пособие.— СПб.: Гуманитика, 2009.— 904 с.
4. ISO 21968. Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials — Measurement of coatings thickness — Phase-sensitive eddy-current method.
5. Randall N. Finer particle size allows better coating characterisation with the Calotest.— Application Bulletin N 5. URL: <http://www.csm-instruments.com/en/>