

Вихретоковая толщинометрия

неферромагнитных металлических покрытий на изделиях из цветных металлов

Металлические покрытия, т.е. покрытия, состоящие из металла или сплава [1], являются наиболее распространёнными в машиностроительных производствах. На практике используются 8 методов нанесения таких покрытий и большое число материалов. По функциям покрытия делятся на защитные, декоративные, защитно-декоративные и специальные.

Первые выполняют прежде всего функцию защиты от коррозии, вторые обеспечивают привлекательный вид и эргономичность изделий, третьи совмещают обе функции. Последние – специальные (технические) покрытия – служат для придания поверхностям изделий и деталей определённых свойств – износостойкостных, антифрикционных, теплозащитных, электропроводящих и др.

Анализ нормативных документов и литературных источников показывает, что для изготовления покрытий используют в общей сложности 24 металла. Покрытия из некоторых металлов (например, цинка, хрома, олова, меди, никеля, кадмия) имеют самое широкое применение. Часть – очень узкое специальное применение. Диапазон толщин наносимых покрытий составляет от нескольких микронов до одного миллиметра. Применяется также не менее 34 типов сплавов в диапазоне толщин от долей до десятков микронов (олово–цинк, цинк–никель, палладий–никель и др.).

Измерение толщины металлических ферромагнитных покрытий на ферромагнитных основаниях и ферромагнитных покрытий на

В.А. Сясько, кандидат технических наук

А.Е. Ивкин

ЗАО “Константа”, Санкт-Петербург

неферромагнитных основаниях с хорошей подготовкой поверхности (шероховатость на уровне $Ra^* = 0,5 \dots 1,6$ мкм) оптимально производить с использованием магнитоиндукционных толщиномеров [2]. Вихретоковые фазовые толщиномеры позволяют производить измерение толщины металлических ферро- и ферромагнитных покрытий на ферромагнитных изделиях с шероховатостью поверхности до 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 ферромагнитных металлов и сплавов. В таблице приведены наиболее часто применяемые сочетания “металлическое ферромагнитное покрытие – основание из цветных металлов”, применяемые в промышленности.

В качестве оснований могут выступать металлы и сплавы с электропроводностью σ_0 в диапазоне $\sim 1 \dots \sim 60$ МСм/м. Электропроводность покрытий σ_n , в свою очередь, может составлять $\sim 5 \dots \sim 60$ МСм/м. Всё множество сочетаний “покрытие – основание” можно объединить в 5 групп в зависимости от соотношения 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, сочетание “цинк на латуни Л63”, для которого $\sigma_n/\sigma_0 \approx 1,6 \dots 2$);

3) $\sigma_n \approx \sigma_0$ (например, сочетание “олово на латуни Л63”, для которого $\sigma_n/\sigma_0 \approx 0,8 \dots 1,2$);

Основные защитные металлические ферромагнитные покрытия на изделиях из цветных металлов

Основание	Покрытие
Латунь марок ЛС59 и Л63	Золото–кобальт
	Золото–никель
	Медь
	Медь через подслои никеля
	Олово–висмут
	Олово–свинец
	Серебро
	Хром
	Хром через подслои никеля
	Цинк
Бронза	Медь
	Медь через подслои никеля
	Олово–висмут
	Олово–свинец
	Серебро
	Серебро через подслои меди
	Хром
Хром через подслои никеля	
Медь	Золото
	Олово (химический способ)
	Олово (горячий способ)
	Олово–висмут
	Олово–свинец
	Палладий
	Палладий через подслои никеля
	Серебро
	Хром
	Хром через подслои никеля
Цинк	
Алюминиевые сплавы (типа АМг и дюралюминия)	Алюминий (плакировочный слой)
	Медь
	Медь через подслои никеля
	Никель химический
	Никель химический с подслоем меди
	Олово–висмут через подслои никеля химического
	Цинк
Титан и сплавы на его основе	Медь гальваническая через подслои никеля
	Серебро
	Хром

4) $\sigma_n \leq \sigma_0$ (например, сочетание “хром на латуни Л63”, для которого $\sigma_n/\sigma_0 \approx 0,6 \dots 0,4$);

5) $\sigma_n \ll \sigma_0$ (например, оловянные сплавы на меди, для которых $\sigma_n/\sigma_0 \approx 0,2$ и менее).

Для измерения толщины ферромагнитных электропроводящих

покрытий на изделиях из цветных металлов часто используется вихретоковый частотный (параметрический) метод.

Возможность измерения толщины покрытий вихретоковыми методами поясняется рис. 1, на котором представлено электропрово-

* Среднее арифметическое отклонение профиля.



ВИХРЕТОКОВАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ



дующее ферромагнитное покрытие толщиной T_n и электропроводностью σ_n на ферромагнитном электропроводящем основании электропроводностью σ_o в зоне вихревых токов. Вихревые токи $J_{вт}$, индуцированные в объекте контроля, распространяются как в покрытии, так и в основании. В каждом слое вихревые токи оказывают своё, отличное друг от друга, влияние на результирующее магнитное поле системы “преобразователь – объект контроля” [3].

Можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности σ_n объекта контроля в объёме распространения вихревых токов, изменяющемся в зависимости от толщины покрытия T_n . Так, если толщина покрытия $T_n = 0$, то интегральная электропроводность объекта контроля в зоне вихревых токов будет равна σ_o . При увеличении толщины покрытия от нуля до ∞ интегральная электропроводность объекта контроля будет изменяться от σ_o до σ_n .

Вихретоковый метод измерения основан на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля обмотки первичного преобразователя (рис. 2) с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объек-

те и зависящих от T_n , σ_n , σ_o и геометрических характеристик основания и покрытия.

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

Индуктивность катушки с учётом влияния поля вихревого тока $L_{вт}$ 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 $l(T) = L_{вт}(T_n) / L_\infty$ будем называть относительной индуктивностью обмотки W . С увеличением электропроводности объекта контроля σ_n величина $J_{вт}(t)$ будет возрастать, а величина $L_{вт}(T_n)$ уменьшаться, следовательно, $l(T)$ 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 $C_3 = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ – эквивалентная ёмкость колебательного контура (см. рис. 2).

Глубина проникновения вихревых токов δ , определяющая максимальную измеряемую толщину покрытия $T_{n \text{ макс}}$, равна:

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

где μ_0 – магнитная постоянная, σ – электропроводность объекта контроля.

Для обеспечения приемлемой чувствительности $T_{n \text{ макс}}$ следует выбирать из условия:

$$T_{n \text{ макс}} = (0,6 \dots 0,8) \delta.$$

Из двух последних соотношений следует, что оптимальное значение частоты преобразователя $f_{\text{опт}}$, соответствующее установке преобразователя на бесконечно толстое покрытие, равно:

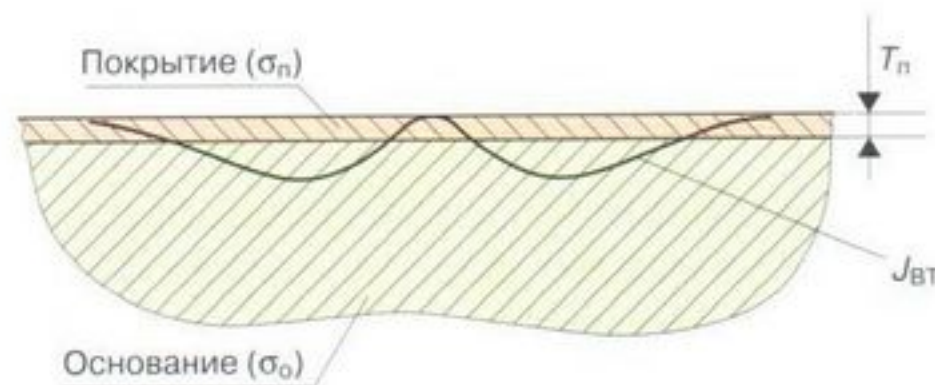


Рис. 1
Распространение вихревых токов в электропроводящем ферромагнитном покрытии и электропроводящем ферромагнитном основании

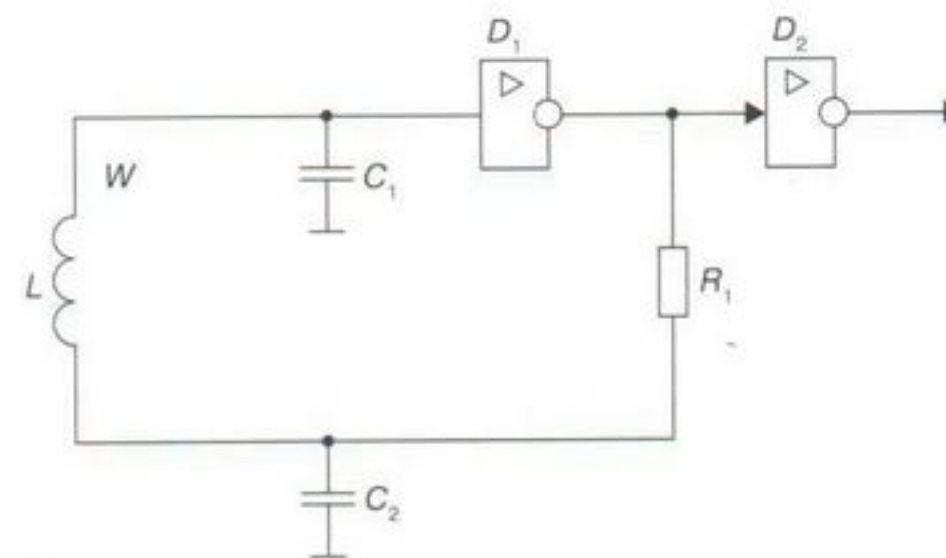


Рис. 2
Электрическая схема автогенераторного вихретокового частотного преобразователя: D_1, D_2 – инверторы; C_1, C_2 – ёмкости конденсаторов автогенератора; R_1 – резистор обратной связи; W – обмотка с индуктивностью L

Вихретоковый метод измерения основан на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля обмотки первичного преобразователя

$$f_{\text{опт}} = \frac{[T_{\text{п макс}}]^2}{[(0,6...0,8)\pi \mu_0 \sigma_{\text{п}}]^2}$$

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

$$R\sqrt{2\pi f_{\text{опт}}} \approx \frac{\sqrt{\sigma_{\text{п}} \mu_0}}{5}$$

При расчёте характеристик преобразователей необходимо учитывать влияние основных мешающих факторов:

- зазора h между преобразователем и покрытием;
- диаметра D основания в зоне измерения и его вариации;
- вариации электропроводности основания и покрытия.

Примером могут служить характеристики и описание возможностей малогабаритного вихретокового частотного преобразователя, чувствительный элемент которого представлен на рис. 3. Индуктивность обмотки $L_{\infty} = 4,16$ мГн, ёмкости конденсаторов автогенератора $C_1 = C_2 = 390$ пФ. Анализ основных метрологических характеристик [4] проведён для следующих типовых значений отношения "покрытие/основание":

- 1) $\sigma_{\text{п}} \gg \sigma_0$ [$\sigma_{\text{п}}/\sigma_0$ для сочетания "медь (серебро)/латунь ЛС59" ~ 3,58];
- 2) $\sigma_{\text{п}} \ll \sigma_0$ [$\sigma_{\text{п}}/\sigma_0$ для сочетания "олово (олово-висмут)/медь" ~ 0,16];
- 3) $\sigma_{\text{п}} < \sigma_0$ [$\sigma_{\text{п}}/\sigma_0$ для сочетания "олово (олово-висмут)/латунь ЛС59" ~ 0,59].

Эквивалентный радиус чувствительного элемента $R \approx 1$ мм. Частота на выходе автогенератора при удалении его от электропроводящих изделий $f_{\infty} \approx 5,5$ МГц.

Рис. 4 иллюстрирует зависимость относительной индуктивности l от интегральной электропроводности $\sigma_{\text{п}}$ (при $h = 0$), на рис. 5

приведены графики $l(T_{\text{п}})$ для трёх указанных ранее типовых задач измерения.

Из рис. 4 и 5 видно, что наибольшую крутизну имеет начальный участок кривой l на интервале изменения интегрального значения электропроводности $\sigma_{\text{п}}$ до 15 МСм/м. С увеличением $\sigma_{\text{п}}$ чувствительность снижается, при $\sigma_{\text{п}} > 15$ МСм/м характеристика практически линейна.

Графики зависимости относительной индуктивности l от относительного зазора $h' = h/R$ (где R – эквивалентный радиус обмотки) для медного и латунного оснований изображены на рис. 6, а зависимость эквивалентного относитель-

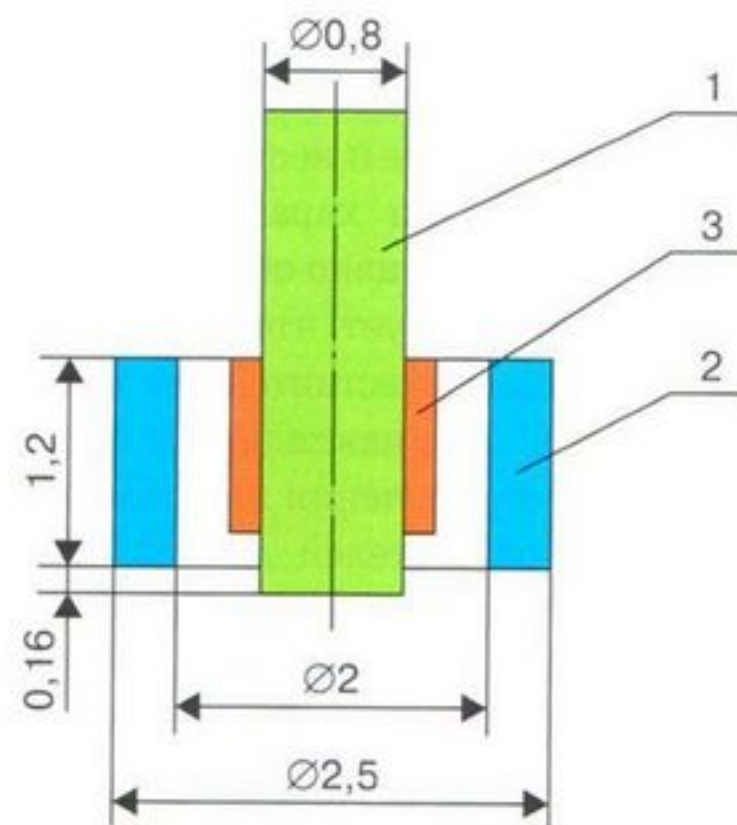


Рис. 3 Чувствительный элемент малогабаритного вихретокового частотного преобразователя: 1 – ферритовый сердечник; 2 – внешний ферритовый экран (кольцо); 3 – обмотка W

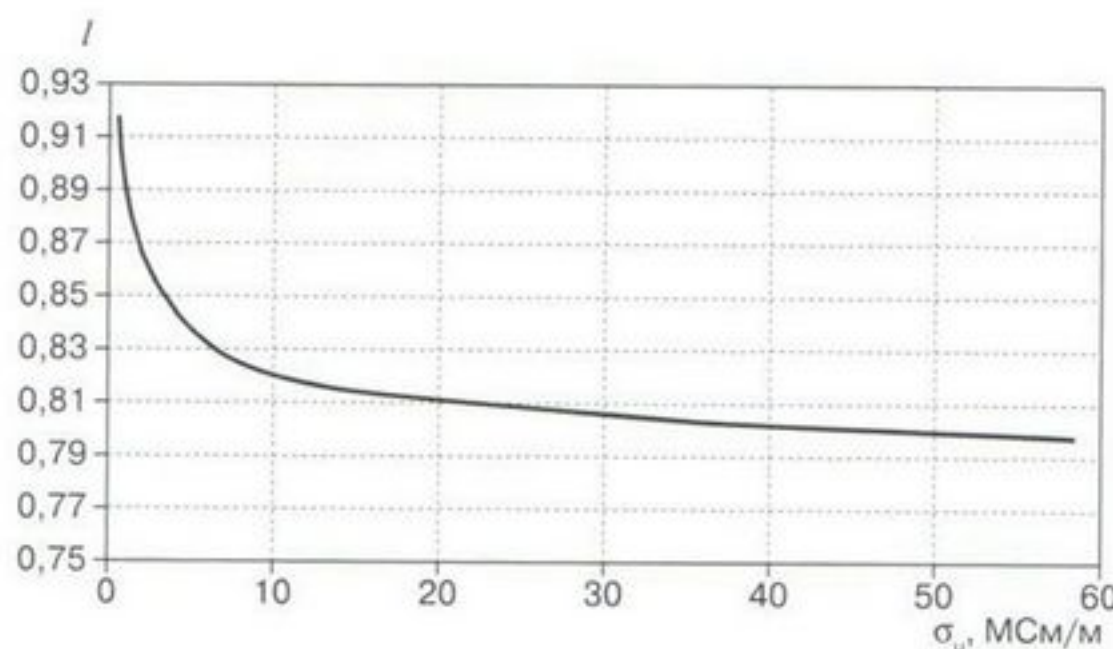


Рис. 4 Зависимость относительной индуктивности l от интегральной электропроводности $\sigma_{\text{п}}$ (при $h = 0$)

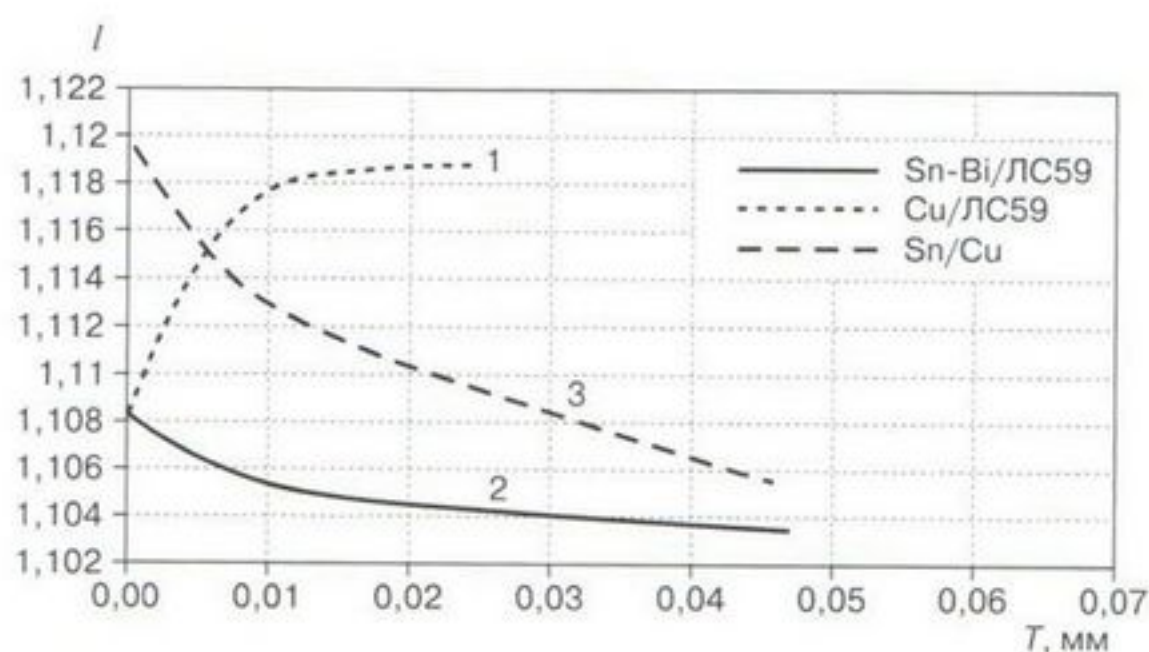


Рис. 5 Зависимость $l(T_{\text{п}})$ для трёх типовых задач измерения: кривая 1 – "медь/латунь ЛС59"; кривая 2 – "олово-висмут/медь"; кривая 3 – "олово/латунь ЛС59"



ВИХРЕТОВАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ



ного зазора h' от относительного диаметра основания $D' = D/R$ – на рис. 7. Изменение σ несущественно изменяет наклон характеристики $l(h')$, лишь аддитивно смещая её.

Из рис. 6 следует, что преобразователи весьма чувствительны к изменению h' . Это накладывает определённые ограничения на применение преобразователей для измерения толщины электропроводящих покрытий на изделиях с переменными кривизной или радиусом, а также на изделиях с повышенной шероховатостью. Изменение диаметра основания эквивалентно изменению зазора (см. рис. 7), что, соответственно, будет приводить к возникновению дополнительной погрешности при его изменении.

В качестве примера можно рассмотреть измерение предельной толщины слоя гальванического серебра или меди на латуни ЛС59 (см. рис. 5, кривую 1): при $f = 6,6$ МГц глубина проникновения $\delta \approx 26$ мкм, т.е. $T_{\text{п макс}} \approx 17...20$ мкм.

Существует ряд факторов, которые вносят в измерения толщины слоя покрытия определённую погрешность. Механизм их действия становится понятен, если совместить (рис. 8) градуировочную характеристику преобразователя с графиком функции относительной индуктивности медного основания $l(h')$ (см. рис. 6). На графике (см. рис. 8) по горизонтальной оси отложена безразмерная величина l , по левой вертикальной оси – толщина медного покрытия T_{Cu} в мкм, по правой вертикальной оси – величина относительного зазора h' .

Допустим, при измерении толщины покрытия получено значение $l = 1,1148$. По градуировочной характеристике преобразователя значение измеряемой толщины покрытия T_{Cu} в этой точке (точка А) равно 6 мкм. Теперь, если значение

относительного зазора h' увеличилось от нуля до величины 0,005 (точка В), что может быть вызвано переходом от измерения плоских изделий к измерению цилиндрического изделия диаметром 38 мм или соответствующей криволинейности, значение относительной индуктивности l изменится. По градуировочной характеристике преобразователя значение $T_{\text{Cu}} = 4$ мкм (точка С). Следовательно, изменение относительного зазора h' на 0,005 вызовет уменьшение результата измерения толщины покрытия на 2 мкм.

Аналогично измеряется толщина слоя олова или оловянных сплавов на меди. Кривая 2 на рис. 5 изо-

бражает зависимость $l(T_{\text{Sn}})$. При $f = 6,5$ МГц глубина проникновения $\delta \approx 63$ мкм, т.е. $T_{\text{п макс}} \approx 38...50$ мкм.

На рис. 9 изображён совмещённый график градуировочной характеристики $l(T_{\text{Sn}})$ и характеристики $l(h')$. По горизонтальной оси отложена величина l , по левой вертикальной оси – T_{Sn} в мкм, по правой вертикальной оси – величина относительного зазора h' .

В точке А результат измерения $T_{\text{Sn}} = 10$ мкм. В отличие от первого случая увеличение относительного зазора h' будет приводить к увеличению результата измерения. Увеличение h' на 0,005 эквивалентно переходу от измерения плоских изделий к измерению цилиндричес-

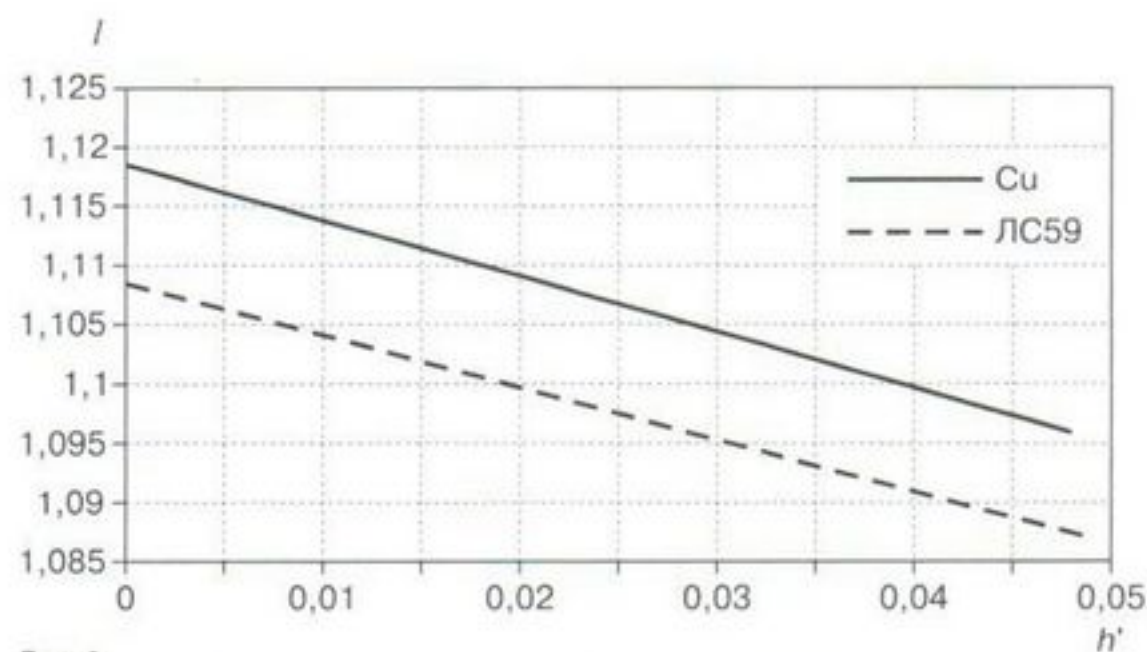


Рис. 6
Зависимость относительной индуктивности $l(h')$ для медного и латунного оснований

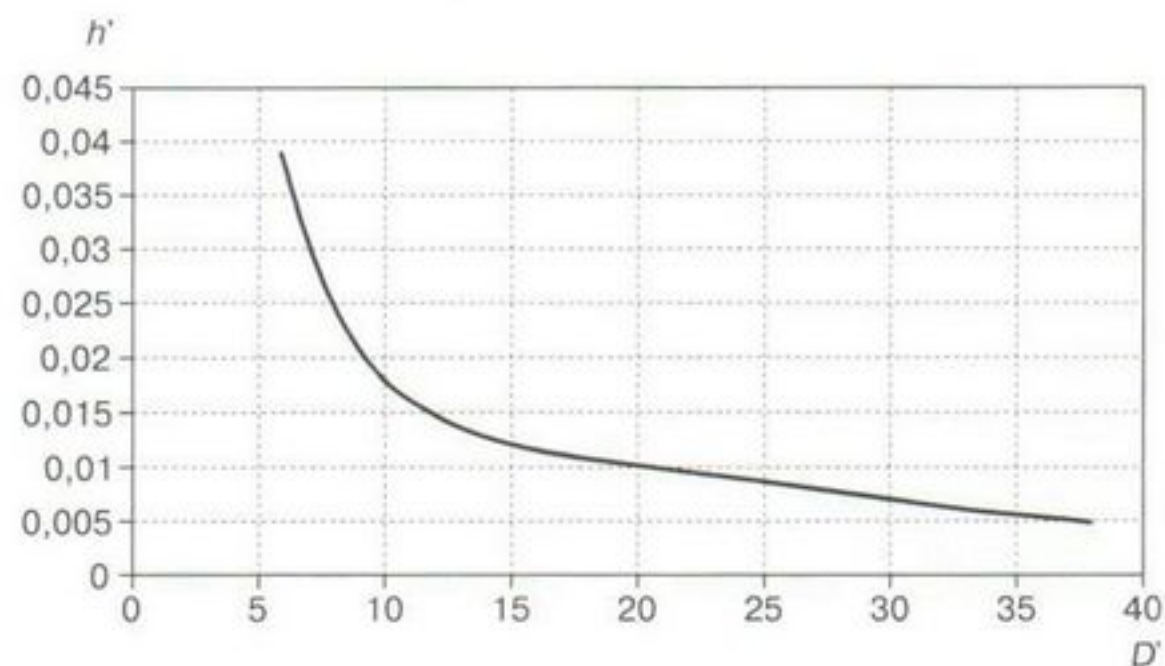


Рис. 7
Зависимость величины эквивалентного относительного зазора h' от относительного диаметра основания D'

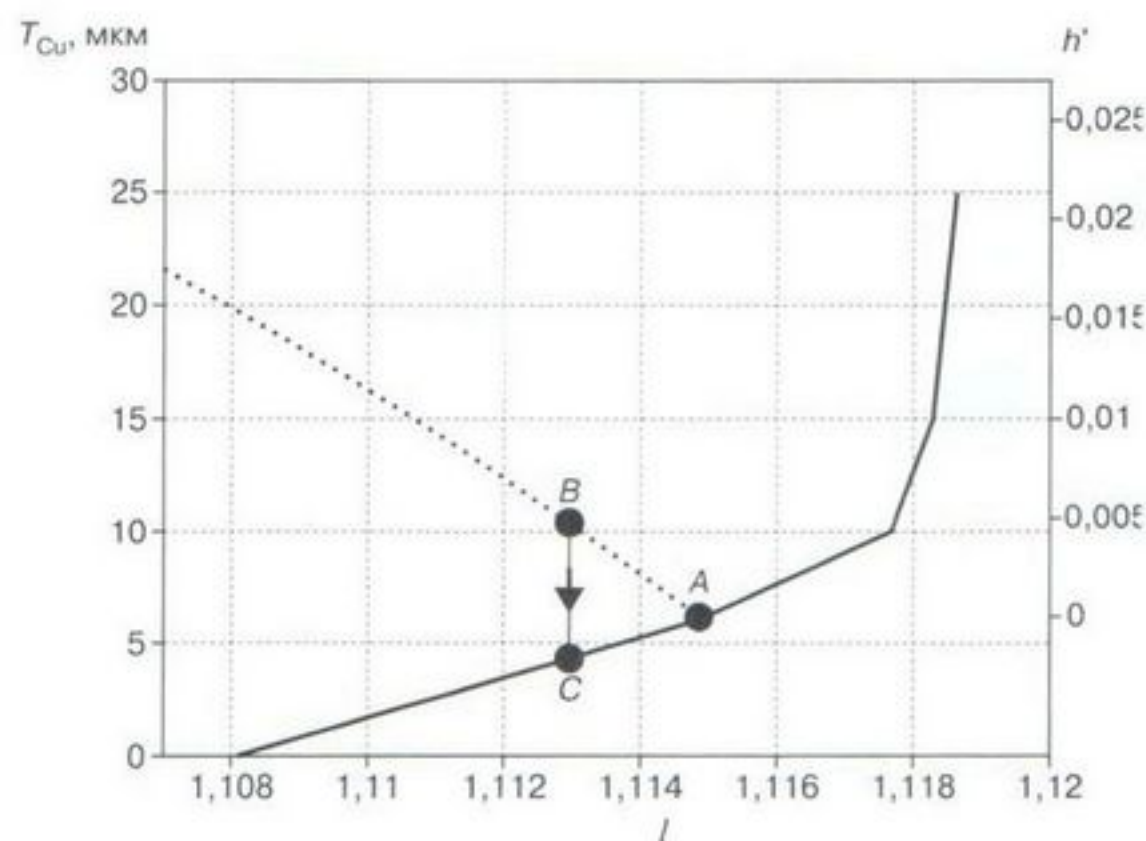


Рис. 8 Совмещённый график зависимостей $l(T_{Cu})$ и $l(h')$ для случая "медь-латунь ЛС59"

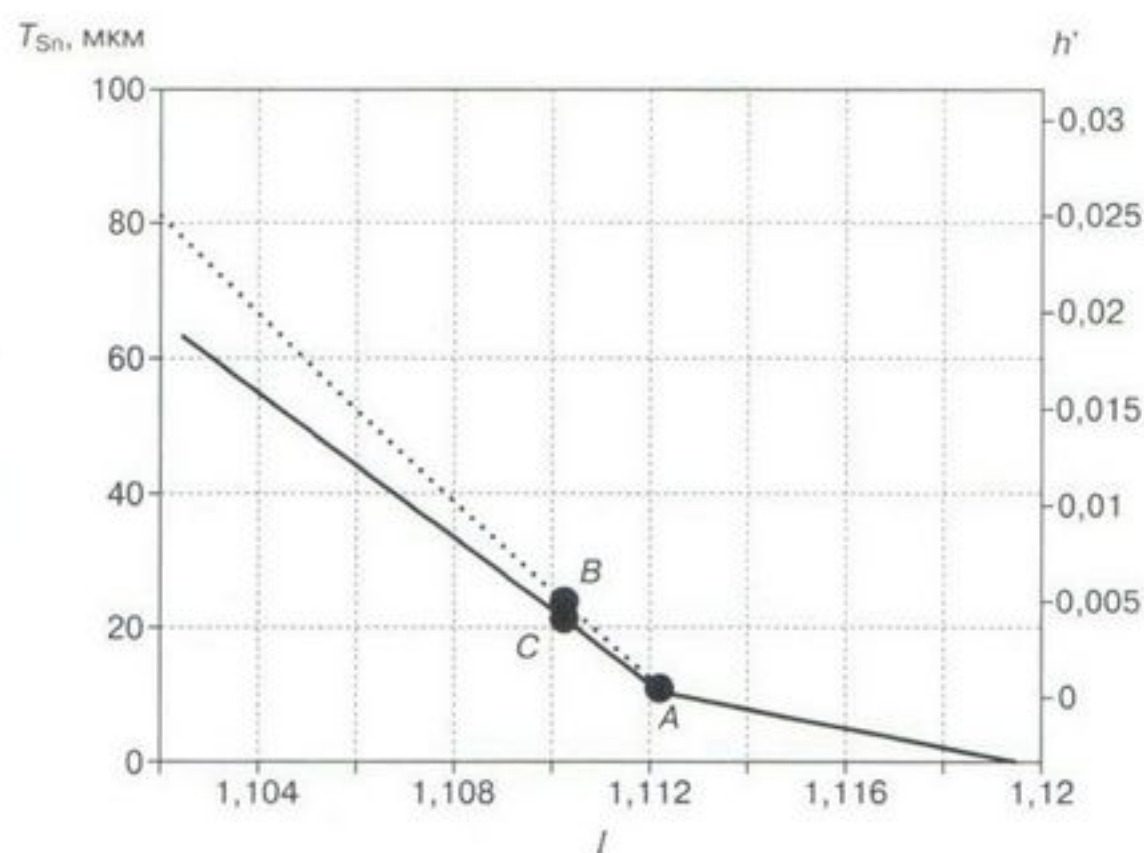


Рис. 9 Совмещённый график зависимостей $l(T_{Sn})$ и $l(h')$ для случая "олово-медь"

кого изделия диаметром порядка 38 мм или соответствующей криволинейности. Значение l при этом изменится. По градуировочной характеристике преобразователя $T_{Sn} = 20$ мкм (точка C). Следовательно, изменение относительного зазора h' на 0,005 вызовет увеличение результата измерения на 10 мкм (в два раза).

Очевидно, что погрешность в результате изменения относительного зазора h' тем меньше, чем более полого характеристика $l(T_n)$ в диапазоне измерения T_n .

Влияние шероховатости аналогично вариации зазора, для учёта её влияния можно воспользоваться рассмотренными методиками оценки.

Аналогично девиация электропроводности основания тем меньше влияет на результат измерения, чем больше соотношение σ_n/σ_o . При измерении толщины покрытий изделий с низким соотношением σ_n/σ_o изменение σ_o вызовет большую погрешность измерения. Так, из кривых 2 и 3 на рис. 5 видно, что в случае измерения толщины $T_{sn} = 30$ мкм по градуировочной характеристике 2 ($\sigma_o = 59$ МСм/м, медь),

изменение σ_o до величины порядка 16 МСм/м (латунь ЛС59) приведёт к изменению показаний. Показания станут равными $T_{Sn} \approx 0$ мкм, т.е. изменение электропроводности основания на 1 МСм/м приведёт к изменению показаний на $\Delta T_{Sn} \approx 0,68$ мкм. Близкие изменения показаний будут и в других точках диапазона измерения.

Вихрековый частотный метод оптимально применять для измерения электропроводящих неферромагнитных покрытий малой толщины на электропроводящих неферромагнитных изделиях широкой номенклатуры размеров и форм с шероховатостью до $Ra = 3,2$ мкм при $\sigma_n \gg \sigma_o$ (например,

серебро на титане, медь на латуни и др., для которых $\sigma_n/\sigma_o \approx 3$ и более).

При $\sigma_n \geq \sigma_o$ метод даст хорошие результаты на плоских изделиях и изделиях с малой погибью с хорошо подготовленной поверхностью.

В случае $\sigma_n \ll \sigma_o$ метод применим на хорошо подготовленных плоских образцах-свидетелях при измерении малых толщин (до 10 мкм) или на квазиплоских изделиях при измерении толщин более 20...30 мкм.

Вихрековые параметрические преобразователи могут с успехом применяться для измерения толщины анодно-окисных плёнок, серебряных и медных покрытий на изделиях из латуни и бронзы, оловянных покрытий на изделиях из меди и др.

Литература

1. ГОСТ 9.008-82 ЕС ЗКС. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Термины и определения.
2. Магнитные методы контроля: Кн. 1 // Неразрушающий контроль: Справ. в 7 т. Т. 6 / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003.
3. Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий: Научно-методич. справ. пос. – СПб.: Гуманистика, 2009.
4. Бабаджанов Л.С., Бабаджанова М.Л. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий. – М.: Изд-во стандартов, 2004.

КОНСТАНТА®

Россия, 198095, Санкт-Петербург, а/я 42
тел. (812) 372-2903, (812) 372-2904
e-mail: office@constanta.ru
www.constanta.ru



ЗАО Константа разрабатывает и производит приборы неразрушающего контроля по направлениям:

- толщинометры защитных покрытий всех типов серии «КОНСТАНТА»;
- ультразвуковые толщинометры металлических и неметаллических изделий серии «БУЛАТ»;
- электронные динамические и ультразвуковые твердомеры металлов серии «Константа Т» и принадлежности к ним;
- электроискровые дефектоскопы серии «Корона»;
- вихретоковые дефектоскопы серии «Константа ВД»;
- приборы комплексного контроля качества защитных покрытий;
- приборы для входного контроля лакокрасочных материалов.

УЗ-Константа

Россия, 198095, Санкт-Петербург, а/я 42
тел. (812) 336-4047, (812) 336-4048
e-mail: mail@constanta-us.com
www.constanta-us.com



ЗАО УЗ-Константа (структурное подразделение ЗАО Константа) разрабатывает и производит следующую продукцию:

- ультразвуковые преобразователи для толщинометрии и дефектоскопии металлических и неметаллических изделий в составе отечественных и импортных приборов (номенклатура преобразователей более 300 позиций);
 - стандартные образцы для толщинометрии и дефектоскопии;
 - стандартные образцы предприятия;
 - принадлежности для у/з толщинометрии и дефектоскопии,
- а также осуществляет продажу и обслуживание дефектоскопов серии УД2-140 в Северо-Западном регионе.

