

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ НЕЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА НЕМАГНИТНОМ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕМ ОСНОВАНИИ С АВТОМАТИЧЕСКИМ УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОСНОВАНИЯ

© 2023 г. М.В. Сясько¹, И.П. Соловьев¹, П.В. Соломенчук^{2,*}

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет,
Россия 199034 Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9
²ООО «Константа», Россия 198098 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21
E-mail: *pavel257@mail.ru

Поступила в редакцию 22.05.2023; после доработки 26.05.2023

Принята к публикации 26.05.2023

На результаты измерений толщины неэлектропроводящего покрытия на электропроводящем немагнитном основании с применением существующего амплитудного метода вихретокового неразрушающего контроля оказывает сильное влияние удельная электропроводность основания. Для устранения этой проблемы предлагается использование вихретокового преобразователя с амплитудно-фазовой обработкой сигналов. Его градуировку проводить с использованием нескольких оснований с разной удельной электропроводностью с применением установки-имитатора толщины покрытия, количество градуировочных точек сопоставимо с разрешением толщиномера. Для вычисления толщины покрытия с учетом удельной электропроводности основания используется алгоритм определения причастности точки многоугольнику.

Ключевые слова: вихретоковый, толщиномер покрытий, амплитудно-фазовый алгоритм, двухмерная градуировка.

DOI: 10.31857/S0130308223070060, **EDN:** DWTPBN

Для измерения толщины T_p неэлектропроводящего покрытия на немагнитном электропроводящем металлическом основании регламентирован амплитудный вихретоковый метод неразрушающего контроля, описанный в [1] с указанием мешающих параметров, влияющих на погрешность измерения. Практика показывает, что электромагнитные мешающие параметры, в частности удельная электропроводность σ и ее девиация по поверхности основания и/или от изделия к изделию, вносят наибольший вклад в погрешность измерений [2]. При изменении σ возникает мультипликативное искажение результатов измерений, которое может быть компенсировано путем проведения калибровки. Компенсация искажения показаний будет наблюдаться в небольшом диапазоне T_p возле точки калибровки. Однако часто встречаются ситуации, в которых такой возможности нет, например:

- измерение толщины покрытия на полностью окрашенном изделии, на котором нет возможности снять покрытие с какого-нибудь участка поверхности для проведения калибровки;
- значение σ имеет существенную девиацию по поверхности основания изделия, обусловленную свойствами материала или температурными градиентами.

В этих случаях необходимо обеспечивать отстройку от влияния σ при проведении измерений.

Для автоматического учета σ при проведении измерений предлагается использовать амплитудно-фазовый вихретоковый преобразователь (АФВТП) [3] и алгоритм обработки двухмерной измерительной информации.

Для градуировки АФВТП используется набор из нескольких оснований с разным значением σ и производится построение двухмерной градуировочной характеристики, упрощенная графическая интерпретация которой приведена на рис. 1 в виде годографов на комплексной плоскости.

При проведении измерений с выхода АФВТП принимается сигнал (Re ; Im), пропорциональный вносимому напряжению. Для вычисления T_p и σ используется алгоритм определения причастности точки многоугольнику [4, с. 142—146], позволяющий определить ближайшие 4 точки, которыми образован четырехугольник, которому соответствует точка полученного с АФВТП сигнала. В случае, если градуировочная характеристика построена с шагом, соизмеримым с разрешающей способностью толщиномера, полученные результаты могут быть приняты как результат измерения T_p с учетом σ . Для обеспечения практической возможности такой градуировки предлагается использовать установку-имитатор толщины покрытия (рис. 2), которая в процессе градуировки с помощью линейной направляющей 1 и сервомотора 2, закрепленных на станине 3, перемещает градуировочное основание 4 относительно градуируемого АФВТП 5 с заданным шагом, имитируя тем самым необходимое количество мер T_p .

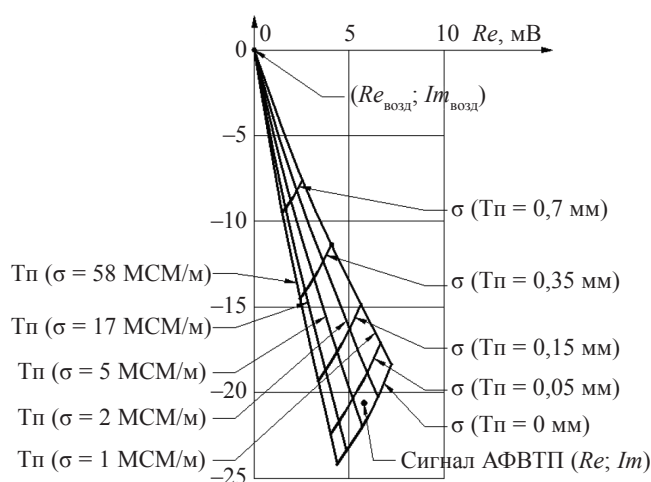


Рис. 1. Графическая интерпретация двухмерной градуировочной характеристики.

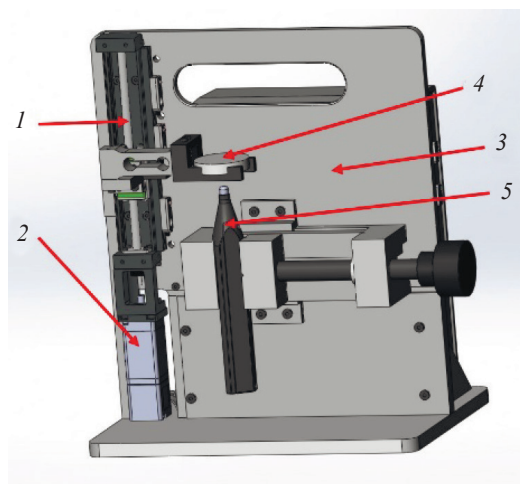


Рис. 2. Установка-имитатор толщины покрытия.

Линии градуировочной характеристики, полученные на разных образцовых основаниях, сходятся в одной точке — точке «воздуха» с координатами $(Re_{\text{Air}}, Im_{\text{Air}})$. При проведении измерений принимается сигнал, который имеет координаты $(Re; Im)$. Задачей алгоритма вычисления значения σ и $T_{\text{п}}$ является определения причастности сигнала к соответствующему участку, ограниченному четырьмя линиями сетки. Подробное описание алгоритма приведено в [5].

Испытания описанного алгоритма проведены с использованием конечно-элементной модели. На первом этапе испытаний проведена градуировка модели АФВТП. Использовались значения σ , соответствующие реальным основаниям, применяемых для градуировки АФВТП: 0,6; 0,9; 2,1; 3,8; 5,3; 9,8; 14; 17; 26; 35; 41; 51 и 59 МСМ/м. $T_{\text{п}}$ выбирались в окрестности испытательных значений. На втором этапе испытаний использовалась модель основания с равномерно изменяющимся в логарифмическом масштабе значением σ . Устанавливались следующие испытательные значения $T_{\text{п}}$: 0, 10, 100, 1000 мкм. Результаты испытаний в виде зависимости отклонения вычисленного значения $T_{\text{п}}$ от значения σ в логарифмическом масштабе приведены на рис. 3.

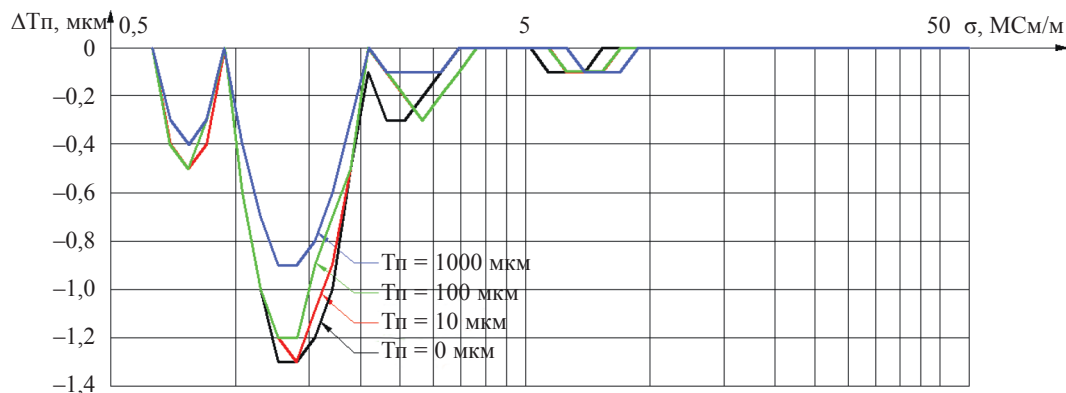


Рис. 3. Зависимость отклонения вычисленного значения $T_{\text{п}}$ от значения σ .

Проведенные испытания алгоритма подтверждают ожидаемую составляющую часть погрешности измерений, обусловленную изменением σ при использовании описываемого алгоритма. Достигаемые значения погрешности соответствуют современным требованиям задач измерения толщины диэлектрических покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 2360—2021 Неэлектропроводящие покрытия на немагнитных электропроводящих металлических основаниях. Измерение толщины покрытия. Амплитудный вихретоковый метод.
 2. Сясько В.А. Измерение толщины ферромагнитных металлических покрытий на изделиях из цветных металлов с использованием вихретокового частотного метода // Дефектоскопия. 2010. № 12. С. 39—48. EDN NQVXWJ.
 3. Syasko V. Optimization of structure and operation algorithms for electromagnetic plated coatings thickness meters with the use of digital technologies / In proceedings of the BINDT/45th Annual British Conference on Non-Destructive Testing 2006, Shanghai, China, 25—28 October 2008.
 4. Ласло М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++. М.: БИНОМ, 1997. 304 с.
 5. Syasko M., Solomenchuk P., Soloviev I., Ampilova N.A. Technique for Multi-Parameter Signal Processing of an Eddy-Current Probe for Measuring the Thickness of Non-Conductive Coatings on Non-Magnetic Electrically Conductive Base Metals // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 5144. <https://doi.org/10.3390/app13085144>
-