

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

© 2023 г. М.В. Сясько<sup>1</sup>, И.П. Соловьев<sup>1</sup>, П.В. Соломенчук<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский Государственный Университет,  
Россия 199034 Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7-9  
<sup>2</sup>ООО «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  $T_n$  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  $\sigma$  и ее девиация по поверхности основания и/или от изделия к изделию, вносят наибольший вклад в погрешность измерений [2]. При изменении  $\sigma$  возникает мультипликативное искажение результатов измерений, которое может быть компенсировано путем проведения калибровки. Компенсация искажения показаний будет наблюдаться в небольшом диапазоне  $T_n$  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  $\sigma$  имеет существенную девиацию по поверхности основания изделия, обусловленную свойствами материала или температурными градиентами.

В этих случаях необходимо обеспечивать отстройку от влияния  $\sigma$  при проведении измерений.

Для автоматического учета  $\sigma$  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  $\sigma$  и производится построение двухмерной градуировочной характеристики, упрощенная графическая интерпретация которой приведена на рис. 1 в виде голографов на комплексной плоскости.

При проведении измерений с выхода АФВТП принимается сигнал ( $Re$ ,  $Im$ ), пропорциональный вносимому напряжению. Для вычисления  $T_n$  и  $\sigma$  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  $T_n$  с учетом  $\sigma$ . 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 градулируемого АФВТП 5 с заданным шагом, имитирующим самым необходимым количество мер  $T_n$ .

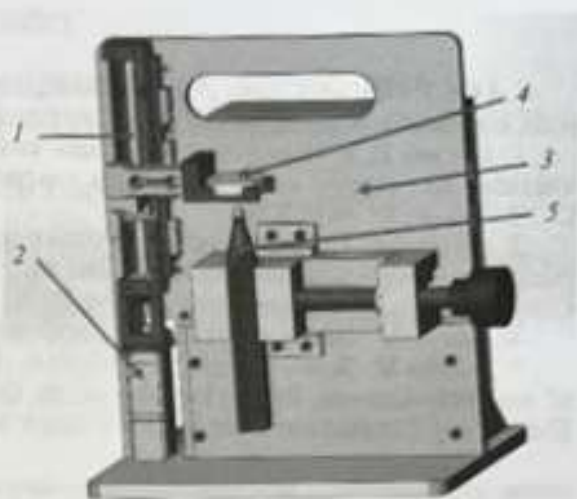
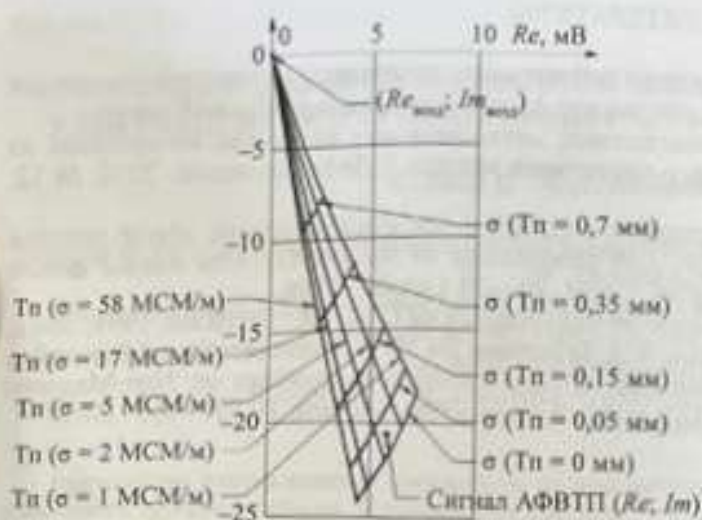


Рис. 1. Графическая интерпретация двумерной градуировочной характеристики.

Рис. 2. Установка-имитатор толщины покрытия.

Линии градуировочной характеристики, полученные на разных образцовых основаниях, сходятся в одной точке — точке «воздуха» с координатами  $(Re_{Air}, Im_{Air})$ . При проведении измерений принимается сигнал, который имеет координаты  $(Re; Im)$ . Задачей алгоритма вычисления значения  $\sigma$  и  $T_p$  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  $\sigma$ , 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.  $T_p$  выбирались в окрестности испытательных значений. На втором этапе испытаний использовалась модель основания с равномерно изменяющимся в логарифмическом масштабе значением  $\sigma$ . Устанавливались следующие испытательные значения  $T_p$ : 0, 10, 100, 1000 мкм. Результаты испытаний в виде зависимости отклонения вычисленного значения  $T_p$  от значения  $\sigma$  в логарифмическом масштабе приведены на рис. 3.

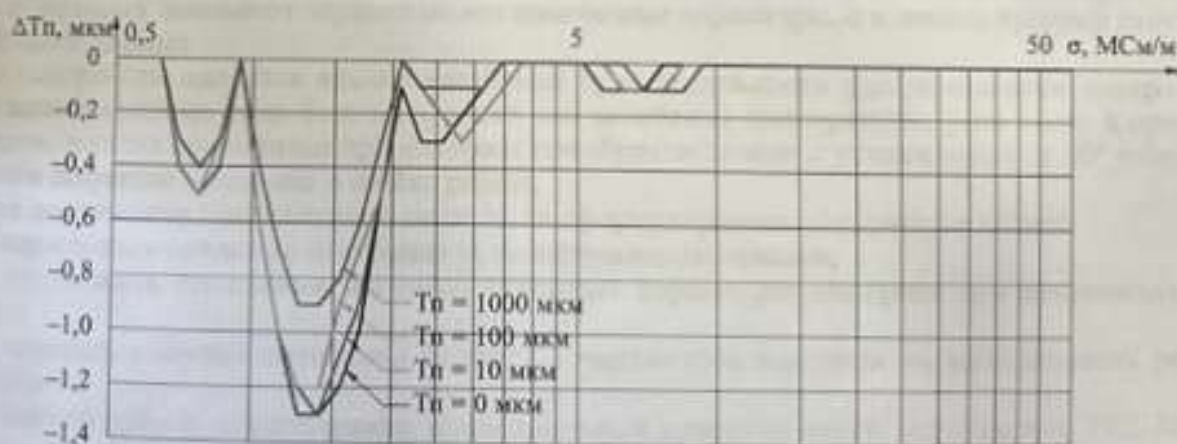


Рис. 3. Зависимость отклонения вычисленного значения  $T_p$  от значения  $\sigma$ .

Проведенные испытания алгоритма подтверждают ожидаемую составляющую часть погрешности измерений, обусловленную изменением  $\sigma$  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 неферромагнитных 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>