

**ВИХРЕТОКОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ:
ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ**

Шкитун П.А.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-
Петербург, Российская Федерация

e-mail: shkitun-pavel@yandex.ru

Рассмотрены задачи контроля качества защитных и функциональных металлических покрытий, а также выполнен анализ вихретоковых методов измерения их толщины, при использовании гармонических магнитных полей. Рассмотрены информативные и мешающие параметры, на основании которых сформулированы основные принципы применения импульсных принципов формирования вихревых токов и многочастотной обработки сигналов измерительных преобразователей для подавления влияния мешающих параметров и уменьшения неопределенности результатов измерения толщины.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, металлические покрытия, толщина покрытий, вихретоковый контроль, импульсное возбуждение.

В настоящее время значительно растут требования по качеству промышленной продукции ряда отраслей промышленности, и особенно авиастроения, ядерной и термоядерной энергетики, судостроения и оборонной промышленности. Для улучшения выпускаемой продукции предложен целый ряд технологий, повышающих качество выпускаемых изделий в плане надежности и износостойкости. Предложены методики нанесения защитных покрытий, обеспечивающих коррозионную и механическую стойкость в условиях агрессивных сред и более экстремальных условий работы, однако данные методики не лишены недостатков ввиду возникновения расслоения покрытий и неравномерности их нанесения в ходе технологического процесса [1].

К поверхности изделий могут предъявляться требования по механической и химической стойкости, электропроводности, а также требования по ряду оптических свойств. Для выполнения данных требований находят применение защитные и функциональные покрытия, наиболее распространенными из которых на данный момент являются металлические покрытия, поскольку обладают рядом требуемых свойств и технологии их нанесения наиболее доступны. Основной ролью защитных металлических покрытий является предотвращение коррозии изделий и придание им привлекательного внешнего вида, а функциональные покрытия предназначены для обеспечения износостойкости, антифрикционных, теплозащитных, электропроводящих и других свойств.

В [2] приведена классификация свойств, характеризующих покрытия. Для металлических покрытий выделяются свойства, которые определяют возможности их применения. К этим свойствам относятся:

- адгезия;
- сплошность;
- прочность;
- пластичность;
- коррозионная стойкость;
- величина напряженности материала;
- шероховатость;
- твердость (микротвердость);
- толщина.

Для обеспечения требуемых свойств необходимо обеспечивать контроль параметров в процессе нанесения. Чем больше параметров контролируется, тем с лучшей точностью возможно обеспечение требуемых свойств. Приведённая классификация свойств металлических покрытий позволяет выделить следующие параметры:

- толщина слоев для многослойных покрытий;

- относительная магнитная проницаемость μ ;
- удельная электропроводность σ ;
- твердость H_c или микротвердость H_v ;
- плотность ρ ;
- шероховатость R_z ;
- химический состав;
- температура t и ее градиент;

Для оценки свойств покрытий требуется определить группу измеряемых информативных параметров, а влияние остальных параметров должно быть исключено или нормировано.

Среди приведенных в упомянутом выше стандарте основным свойством покрытия является толщина. Для металлических покрытий толщина влияет на износостойкость изделий при истирании и их электропроводность. В дальнейшем рассматриваются вихретоковые методы контроля толщины покрытий, поскольку применимы в широких диапазонах толщин, не подвержены влиянию влажности, давления и загрязнения поверхности изучаемого покрытия. Высокая скорость измерения и отсутствие необходимости прямого контакта с изучаемым образцом дает возможность применения вихретокового контроля на поточном производстве. На данный момент в недостатки методов относят отсутствие учета параметров электропроводности и магнитной проницаемости, однако возможность применения данных параметров в качестве информативных является объектом дальнейших исследований.

Для контроля толщины металлических покрытий и изделий разработан ряд методов вихретокового контроля, различие которых заключается в выборе информативных и мешающих параметров. Параметры, которые могут быть информативными, объединены в обобщенный параметр:

$$\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0\mu_r}$$

где R – эквивалентный радиус обмотки, σ – удельная электропроводность объекта контроля, μ_0 – магнитная постоянная, μ_r – относительная магнитная

проницаемость, ω – круговая частота.

Наиболее распространенными методиками контроля толщины на данный момент являются:

- Частотный,
- Амплитудный,
- Фазовый,
- Амплитудно-фазовый.

Частотный метод заключается в измерении частоты колебательного контура, вычислении отношения частоты основного сигнала к опорному и прямом сопоставлении толщины полученному значению. Метод является наиболее простым с точки зрения реализации, но обладает большим разбросом обобщенного параметра преобразователей, поскольку применяется всего один информативный параметр, а остальные параметры нормируются.

Описываемые далее методы контролируют уже два информативных параметра, одним из которых является частота, поскольку это дает оценку глубины проникновения вихревых токов в образец, что повышает точность измерений.

Амплитудный метод позволяет контролировать толщину непроводящих покрытий на металле. Метод заключается в измерении амплитуды выходного сигнала относительно входного.

Фазовый метод позволяет контролировать толщину проводящих покрытий на металле и не зависит от амплитуды сигнала возбуждения, поскольку информативным параметром является сдвиг фазы выходного сигнала относительно входного.

Амплитудный и фазовый методы способны функционировать одновременно и независимо, поскольку измерительная система обеспечивает стабилизацию частоты, а амплитуда и фаза выходного сигнала не коррелируют друг с другом. Таким образом, обеспечивается контроль толщины диэлектрического покрытия и проводящего покрытия под ним.

На базе данных методов предложены также двухчастотные методы

измерения толщины [3]. В данных методах измерения проводятся амплитудно-фазовым методом на нескольких частотах, что позволяет преобразователю работать в более широком диапазоне. В частности работая независимо на различных диапазонах, существует возможность измерить толщину изделия и толщину покрытия на нем. Кроме того, работа в двухчастотном режиме позволяет получить информацию о проводимости покрытия. То есть на высокой частоте измеряется удельная проводимость покрытия, а на низкой частоте амплитудно-фазовый метод дает оценку толщины с учетом ранее измеренной проводимости. Таким образом, двухчастотный метод способен дать оценку толщины покрытия уже по четырем параметрам.

Последующее развитие вихретоковых методов контроля является объектом дальнейших исследований. В частности в [4] авторы предположили гипотетическую возможность учета пятого параметра – относительной магнитной проницаемости μ_r . Для измерения магнитной проницаемости требуется проведение измерений на множестве частот. Реализация данного метода на базе преобразователей с гармоническим возбуждением, во-первых, является непростой схемотехнической задачей, а во-вторых, теряется главное преимущество вихретоковых методов – значительно снижается скорость измерений.

Импульсное возбуждение вихревых токов лишено данных недостатков, поскольку изначально предполагает одновременное возбуждение гармонических сигналов широкого спектра в зависимости от формы импульса без потери скорости измерений.

В дальнейшей работе предполагается разработка импульсного вихретокового преобразователя, способного работать в широком диапазоне толщин металлических покрытий, а так же разработать методику обработки сигналов, способную осуществлять оценку толщины покрытий по пяти информативным параметрам (частота, амплитуда, фаза, удельная проводимость, относительная магнитная проницаемость), обеспечив, таким образом, минимальную погрешность.

Список используемой литературы:

1. Потапов А.И., Сясько В.А., Соломенчук П.В., Ивкин А.Е., Чертов Д.Н. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий: I том. Электромагнитные и магнитные методы контроля толщины покрытий и стенок. – СПб.: Нестор-История, 2014. – 480 с.
2. ГОСТ 9.302-1988 (ИСО 1463-1982, ИСО 2064-1980, ИСО 2106-1982) Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля.
3. Javier García -Martín, Jaime Gómez -Gil and Ernesto Vázquez –Sánchez. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // Sensors. – 2011. – № 11. – С. 2525-2565.
4. Егоров А.В., Поляков В.В., Иваков С.В. Измерительно-вычислительный комплекс для определения удельной электропроводности и магнитной проницаемости методом вихревых токов // Ползуновский вестник. – 2010. – №2. – С. 129 – 132.