

Измерение толщины металлических покрытий: состояние и перспективы развития

П.А. Шкитун

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

Аннотация: Рассматриваются перспективы применения импульсного возбуждения вихревых токов для измерения толщины металлических покрытий. Анализируются преимущества и недостатки методов контроля толщины металлических покрытий по сравнению с импульсными вихретоковыми методами.

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 нашли применение металлические, металлоксидные, лакокрасочные, битумные, неметаллические, органические, пластмассовые покрытия, а также покрытия на основе композитных материалов. Наиболее распространены на данный момент металлические покрытия, поскольку обладают рядом требуемых свойств и технологии их нанесения наиболее доступны.

Свойства покрытий зависят от различных механических, геометрических, физических и многих других параметров. Для обеспечения тех или иных свойств требуется обеспечивать контроль некоторых параметров в процессе нанесения, влияющих на погрешность получаемых результатов. Они классифицируются в зависимости от их происхождения на:

- связанные с методом измерения, включающие в себя как геометрические параметры, так и физико-механические;
- связанные с конструктивными особенностями измерительных приборов;
- связанные с характеристиками условий измерений.

Для измерений требуется определить информативный параметр, а влияние остальных параметров должно быть исключено или нормировано. Параметры, влияние которых невозможно исключить, и они не стандартизированы, необходимо изучить и разработать сопроводительную документацию, содержащую требования к качеству объектов измерения и числовые значения этих параметров.

Существует ГОСТ 9.302 [2], в котором приведена классификация параметров, характеризующих покрытия. Среди приведенных в стандарте основным информативным параметром является толщина, которая варьируется от долей микрона до нескольких миллиметров. Для случая металлических покрытий толщина влияет на износостойкость при истирании и электропроводность, а взаимозависимость данных свойств, в свою очередь, предоставляет возможность установить толщину изделий и покрытий различными методами контроля.

Все это позволяет уменьшить расширенную неопределенность измерений информативного параметра, в данном рассмотрении толщины, повысив тем самым достоверность измерений и качество выпускаемой продукции.

Для контроля толщины металлических покрытий и изделий разработаны целые классы методов на основе возбуждения и детектирования вихревых токов и магнитного поля. Данные методы нашли широкое применение в авиастроении, ядерной и термоядерной энергетике и других областях промышленности, постоянно востребованы, а это значит, что они имеют перспективы для дальнейшего усовершенствования.

Магнитные методы базируются на свойстве ферромагнитных покрытий приобретать намагниченность под действием электрического поля и притягиваться к источнику постоянного магнитного поля. На основе этих свойств разработаны следующие методы:

- Магнитоиндукционный (измеряется магнетосопротивление образца)[3],
- Магнитный отрывной, также известный как пондеромоторный (измеряется сила необходимая для отрыва постоянного магнита от

поверхности)[4].

Преимуществами данных методов является независимость результатов измерения от электропроводности материала, нечувствительность к изменению влажности, давления и к загрязнению газовой среды. К недостаткам относится зависимость результата измерения от магнитных свойств основания, радиуса и шероховатости поверхности образца.

На базе возбуждения и анализа изменения вихревых токов различных частот в образце также разработаны методы, которые нашли широкое применение в автоматизированном производстве:

- Частотный (измерение толщины осуществляется путем измерения частоты сигнала параметрического вихретокового преобразователя в колебательном контуре),
- Амплитудный (измерение толщины осуществляется путем измерения амплитуды выходного сигнала относительно сигнала возбуждения),
- Фазовый (измерение толщины осуществляется путем измерения разности фаз между сигналом возбуждения и выходным сигналом),
- Амплитудно-фазовый (метод представляет собой комбинацию двух вышеупомянутых).

Вихретоковые методы находят применение для контроля толщины как проводящих (контролю могут быть подвергнуты не только металлы, но и полуметаллы), так и диэлектрических покрытий на проводящем основании в широких диапазонах толщин. Они так же не подвержены влиянию влажности, давления, и загрязненности газовой среды и 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 зависимость показаний от электропроводности покрытий, изделий и их сочетаний, однако это является предметом для дальнейших исследований.

Вихревые токи в образцах наводятся под действием переменного магнитного поля, а различие методик контроля заключается в способе возбуждения и детектирования.

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:

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

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

магнитная проницаемость, ω – круговая частота.

Разброс обобщенного параметра не позволяет однозначно установить электропроводность образца и его относительную магнитную проницаемость, а значит и глубину проникновения вихревых токов.

Фазовый и амплитудно-фазовый методы используют преобразователи трансформаторного типа и работают на фиксированной частоте, что снижает разброс обобщенного параметра и ограничивает диапазон толщин работы преобразователя. Амплитудный метод предоставляет возможность оценить толщину диэлектрического покрытия на образце (зазор), фазовый измеряет электропроводящее покрытие.

На базе данных методов предложены двух- и многочастотные методы измерения толщины [5]. 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, проведение измерений на множестве частот так же позволяет получить оценки значений σ и μ методом последовательного приближения [6] и таким образом уменьшить погрешность измерения.

В последнее время ведется работа по разработке импульсных вихретоковых методов контроля толщины. Особенностью данных методов является возможность анализа выходного сигнала не только по амплитуде и фазе, но и по времени, а именно анализируются переходные процессы затухания исходного сигнала [7]. Главной особенностью импульсного вихретокового сигнала (ИВС) является одновременная и независимая работа на множестве частот.

В дальнейшей работе потребуется разработать импульсный вихретоковый преобразователь, способный работать в широком диапазоне толщин металлических покрытий, а так же разработать методику обработки сигнала с детектора, способную оценивать изучаемый образец по множеству параметров, обеспечивая, таким образом, минимальную погрешность.

Список используемой литературы:

1. А.И. Потапов, В.А. Сясько, П.В. Соломенчук, А.Е. Ивкин, Д.Н. Чертов. 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 9.302-88 (ИСО 1463-82, ИСО 2064-80, ИСО 2106-82) Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля.
3. В. А. Сясько. Геометрически подобные преобразователи для толщиномеров защитных покрытий, Изв. Вузов. Приборостроение. 2011. Т.

54. №9. Стр. 64-70

4. ГОСТ Р 56097-2014. Системы космические. Контроль неразрушающий. Магнитный пьезоэлектрический метод контроля толщины гальванических никелевых и никель-хромовых покрытий.

5. Javier García -Martín, Jaime Gómez -Gil and Ernesto Vázquez – Sánchez: Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing / Sensors 2011, 11,page 2525-2565

6. А.В. Егоров, В.В. Поляков, С.В. Иваков. Измерительно-вычислительный комплекс для определения удельной электропроводности и магнитной проницаемости методом вихревых токов , Ползуновский вестник №2 2010 стр 129 – 132

7. ISO 20669:2017 Non-destructive testing - Pulsed eddy current testing of ferromagnetic metallic components