

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПОКРЫТИЙ

© 2025 г. Мария Вячеславовна Шипицына^{1*}, А.Е. Тюрнина¹

¹ – Уральский научно-исследовательский институт метрологии — филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 620075 Екатеринбург, ул. Красноармейская, д. 4

* - ShipitsynaMV@uniim.ru

Определение толщины металлических покрытий является неотъемлемой задачей на различных стадиях технологического процесса в аэрокосмической, автомобильной промышленности, в области микроэлектроники и в машиностроительном комплексе [1].

Одним из самых распространенных бесконтактных методов измерений толщины металлических покрытий является метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Данный метод не требует специальной предварительной подготовки образцов, время измерений толщины покрытий является минимальным, локальность измерений до 50 мкм.

РФА является косвенным методом определения толщины покрытий, значение которой определяется с помощью измеренного значения поверхностной плотности покрытия и значения плотности материала нанесенного покрытия, которое до настоящего времени являлось справочным из-за отсутствия методических подходов при измерении плотности материалов покрытий. Суть обсуждаемой проблемы: использование справочного значения плотности материалов покрытий может приводить не только к увеличению неопределенности измерений толщины покрытий методом РФА, но и к искажению результата измерений толщины покрытий в целом. Основными проблемами при нанесении покрытий, особенно покрытий толщиной более 10 мкм, являются неравномерность нанесения покрытий и образование пористости ввиду захвата водорода и защитного газа в процессе нанесения покрытия [2]. Также при разработке технологий нанесения покрытий необходимо знать их параметры, контролируя плотность наносимых покрытий [3].

Цель работы – разработка методики количественного определения плотности покрытий для дальнейшего совершенствования измерений толщины покрытий методом РФА. Предложена физико-математическая модель измерений плотности материалов нанесенных покрытий на основе гидростатического взвешивания [4].

Проведено исследование влияющих факторов предложенной модели измерений как в части конструктивного исполнения установки для гидростатического взвешивания, так и в части оценки внешних факторов при выполнении измерений.

Были рассчитаны неопределенности, связанные с инструментальной составляющей, плотностью окружающего воздуха и плотностью рабочей жидкости.

Основные вклады в неопределённость измерений, связанные с действием сил поверхностного натяжения и дрейфом температуры рабочей жидкости, были минимизированы за счет использования рабочей жидкости с низким поверхностным натяжением, подвеса в виде проволоки диаметром 0,1 мм и отсутствия температурных флуктуаций рабочей жидкости [5].

Для валидации разработанной методики измерений были проведены предварительные экспериментальные исследования плотности материалов моделей покрытий, представляющие собой различные металлические фольги и образцы произвольной формы. Были выбраны модели покрытий, имитирующие толщину покрытий от 1 до 30 мкм. Полученные результаты измерений были сопоставлены с результатами прямых измерений плотности моделей покрытий неправильной геометрической формы методом гидростатического взвешивания, моделей покрытий правильной геометрической формы – гравиметрическим методом.

Проведенные исследования моделей покрытий доказали реализуемость предложенной физико-математической модели измерений плотности металлических покрытий и позволили установить параметры для дальнейшего изготовления стандартных образцов толщины металлических покрытий, необходимых для поверки, калибровки и градуировки средств измерений толщины покрытий, основанных на рентгенофлуоресцентном анализе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Потапов А.И., Сясько В.А.* Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. Научное, методическое и справочное пособие. Санкт-Петербург: Гуманистика, 2009. 904 с.
2. *Подымова Н.Б., Соколовская Ю.Г.* Неразрушающий ультразвуковой контроль пористости алюминиевых покрытий лазерным оптико-акустическим методом // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28. № 1. С. 49–55.
3. *Сильченко О.Б., Силюянова М.В., Хопин П.Н.* Исследование плотности и пористости покрытий из керамополимеров или композиционных материалов с квазикристаллами, полученных газодетонационным методом и методом газодинамического напыления // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 7. С. 4–11.
4. *Шипицына М.В., Тюрина А.Е.* О состоянии и перспективах совершенствования метрологического обеспечения в области измерений толщины покрытий рентгенофлуоресцентным методом // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20. № 4. С. 103–116.
5. *Баковец Н.В., Козадаев К.В.* Стабилизация температурных условий при определении плотности жидкости методом гидростатического взвешивания // Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15. № 4. С. 334–341.