

УДК 621.39:004.932

ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗДЕЛИЙ

Ю.С. ЯКОВЛЕВ, Ю.В. БРУТТАН

*Псковский государственный университет, Российская Федерация**Поступила в редакцию 6 марта 2026*

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к проектированию систем контроля качества покрытий, ориентированных на промышленное применение. Основное внимание уделено неконтактным и неразрушающим методам, включая машинное зрение, оптические, вихретоковые, термографические и спектральные средства контроля. Показано, что эффективность таких систем зависит не только от выбранного метода измерения, но и от того, насколько корректно система встроена в производственный процесс.

Ключевые слова: контроль качества покрытий, неразрушающий контроль, неконтактные методы, машинное зрение, оптическая когерентная томография, терагерцовая диагностика, активная термография, мультисенсорные системы.

Введение

Качество покрытия в промышленном изделии определяет не только его внешний вид, но и ресурс, коррозионную стойкость, износостойкость, тепловую стабильность и надежность в эксплуатации. По этой причине контроль покрытий выступает не отдельной завершающей операцией, а важной частью технологического контура производства. Развитие интеллектуального производства приводит к переходу от эпизодической инспекции к непрерывному и автоматизированному контролю, который по возможности встраивается непосредственно в производственную линию и опирается на методы неразрушающего контроля, машинное зрение и анализ данных [1–5]. Для задач, связанных с поверхностными и подповерхностными дефектами, особое значение приобретают бесконтактные методы: они позволяют обследовать изделия сложной формы, работать на высоких скоростях линии, снижать зависимость результата от оператора и уменьшать риск повреждения контролируемой поверхности [1, 4, 6].

При проектировании системы контроля качества покрытия в первую очередь нужно определить, какие свойства слоя и какие типы дефектов подлежат контролю. В зависимости от назначения покрытия и условий эксплуатации контролируемые параметрами выступают сплошность слоя, его толщина и равномерность, наличие трещин, пор, кратеров, непрокрасов, наплывов, включений и загрязнений, состояние интерфейса «покрытие-подложка», а также структурные признаки, косвенно связанные с адгезией, шероховатостью и долговечностью [1, 6–9]. Поэтому систему контроля целесообразно рассматривать не как набор отдельных приборов, а как связку датчиков, алгоритмов обработки и средств встраивания в производственный процесс.

Процессы и свойства, относящиеся к контролю качества покрытий

Качество покрытия обычно оценивают по нескольким группам признаков: геометрии слоя, его физико-химическому состоянию и наличию дефектов на поверхности и в зоне интерфейса. Наиболее универсальной характеристикой остается толщина покрытия. Для металлических, защитных, декоративных и функциональных слоев именно толщина во многом определяет

выполнение целевой функции; поэтому в обзорных работах по измерению толщины покрытий она рассматривается как базовый объект контроля [6, 10]. Вместе с тем одного измерения толщины недостаточно. Даже при формальном соблюдении толщины изделие может иметь локальную неравномерность, пористость, нарушения сплошности, скрытые полости, межслойные дефекты или поверхностные изъяны, сформировавшиеся из-за особенностей подготовки подложки и самого процесса нанесения [1, 7, 9].

Не менее важен контроль морфологии поверхности. Для многих покрытий именно текстура, микрорельеф и равномерность распределения материала определяют адгезионные и трибологические свойства. Исследования, посвященные связи шероховатости, сцепления и коррозионной стойкости, показывают, что контроль поверхностного профиля нельзя сводить к одному интегральному параметру; необходим анализ набора признаков, характеризующих форму поверхности и ее статистическую неоднородность [11, 12]. Это особенно важно для покрытий, нанесенных на предварительно обработанные подложки, где микрогеометрия основы влияет на рост дефектов и поведение интерфейса.

Отдельный класс задач связан с распознаванием собственно дефектов покрытия. Для покрытий, формируемых методами распыления, напыления, осаждения из паровой фазы и других высокопроизводительных технологий, характерны такие дефекты, как кратеры, поры, вздутия, трещины, инородные включения, участки недостаточного покрытия и локальные утолщения [1, 8, 13]. Для покрытий вакуумного напыления и тонких пленок отдельно рассматриваются дефекты роста, возникающие вследствие топографии подложки, частиц загрязнений и особенностей роста пленки [8]. С точки зрения проектирования системы контроля это означает, что часть дефектов проявляется как изменение яркостно-текстурной картины на поверхности, а часть требует анализа внутренней структуры или контраста, связанного с электромагнитными, тепловыми либо спектральными свойствами материала.

С учетом сказанного задачи контроля покрытий можно свести к четырем основным направлениям: визуальный контроль поверхности, измерение толщины и равномерности слоя, выявление подповерхностных и межслойных нарушений, а также оценка признаков, связанных с долговечностью покрытия. [1, 6, 10, 11]. От этого набора задач и следует отталкиваться при выборе методов контроля и построении системы.

Неконтактные методы анализа покрытий

На практике чаще всего используют оптические системы машинного зрения. Это связано с высокой скоростью контроля, сравнительно простой интеграцией в производственную линию и возможностью обнаруживать видимые поверхностные дефекты на больших участках. Обзоры, посвященные автоматическому контролю поверхностных дефектов, показывают, что машинное зрение эффективно при поиске царапин, пятен, вмятин, раковин, загрязнений и других нарушений внешнего слоя, особенно если задача формулируется как обнаружение аномалии, классификация дефекта или сегментация дефектной области [2–5]. Для изделий с покрытием оптические методы особенно полезны на участках после нанесения и после сушки, когда требуется быстрый контроль внешнего вида и сплошности поверхности. Однако они ограничены в работе с подповерхностными дефектами и чувствительны к бликам, вариативности освещения, отражательной способности и низкому контрасту дефектов [2, 4, 5].

Для преодоления этих ограничений все большее значение приобретают томографические и спектральные методы. Оптическая когерентная томография (ОСТ) перспективна для послойного анализа покрытий, особенно в тех случаях, когда необходимо оценить внутреннюю структуру прозрачных или полупрозрачных слоев [13–17]. В публикациях по защитным, морским и автомобильным покрытиям показано, что ОСТ способна выявлять толщину слоев, подповерхностные неоднородности и границы раздела без механического контакта с изделием [13, 14, 16]. Для проектирования системы это особенно важно, когда внешний вид поверхности не отражает реального состояния внутренних слоев. При этом ограничения ОСТ связаны с ограниченной глубиной проникновения, зависимостью от оптических свойств материала и необходимостью более сложной калибровки по сравнению с обычной видеосъемкой.

Терагерцовые методы также ориентированы на бесконтактный анализ многослойных структур и измерение толщины диэлектрических и защитных покрытий. Работы последних лет

показывают применимость THz-подходов к оценке толщины термобарьерных покрытий, контролю состояния покрытых стальных конструкций и измерению параметров слоев в задачах промышленного мониторинга [15, 17, 18]. С инженерной точки зрения терагерцовая диагностика ценна тем, что обеспечивает доступ к подповерхностной информации и пригодна для многослойных систем, где обычная оптика дает только картину внешнего слоя. Ограничениями остаются стоимость аппаратуры, чувствительность к материалу и геометрии объекта, а также необходимость сложной интерпретации временных и спектральных сигналов.

Активная термография занимает промежуточное положение между поверхностной и глубинной диагностикой. В этой группе методов объект возбуждается тепловым импульсом или сканирующим источником, а анализ ведется по динамике температурного отклика. Исследования, посвященные контролю толщины и неравномерности покрытий, показывают, что активная термография подходит для крупноформатного и достаточно быстрого обследования, особенно в случаях, когда дефект влияет на теплообмен или тепловую инерцию слоя [19]. Для производственных условий это важно тем, что тепловизионные системы могут охватывать большую область за один цикл наблюдения. Однако метод требует аккуратного управления возбуждением, зависит от эмиссионных свойств поверхности и чувствителен к внешним тепловым помехам.

Вихретоковые методы широко применяются для неразрушающего контроля толщины непроводящих покрытий на проводящей подложке и для анализа проводящих слоев при подходящем сочетании материалов. Современные исследования демонстрируют как развитие традиционных схем измерения, так и более сложные конструкции датчиков, снижающие влияние отрыва и обеспечивающие более устойчивое определение толщины [20]. С точки зрения проектирования вихретоковые методы привлекательны своей технологической зрелостью и пригодностью к промышленной автоматизации. Вместе с тем они зависят от электромагнитных свойств материала и, как правило, дают ограниченную морфологическую информацию: для распознавания типа дефекта одного такого канала часто недостаточно.

К бесконтактным и близким к бесконтактным физическим методам относятся также рентгенофлуоресцентный анализ и лазерно-спектроскопические подходы. Рентгенофлуоресцентные системы давно применяются для контроля толщины и состава покрытий в поточных линиях, особенно там, где требуется не только оценка геометрии слоя, но и подтверждение его химической природы [21]. Лазерно-индуцированная эмиссионная спектроскопия, в свою очередь, используется для анализа состава и глубинного профилирования слоев, в том числе в режимах, ориентированных на производственный контроль покрытых листовых материалов [22]. Эти методы особенно полезны, когда качество покрытия понимается не только как отсутствие дефектов формы, но и как соответствие состава требуемой технологии. Их ограничение состоит в более сложной аппаратной реализации, требованиях к безопасности и необходимости тщательно согласовывать режим измерения с материалом изделия.

Перспективным направлением выступают мультисенсорные системы. Публикации по комбинированному измерению толщины с использованием, например, хроматического конфокального и вихретокового каналов, а также обзоры по мультисенсорному слиянию данных в умном производстве показывают, что один физический метод редко покрывает весь спектр задач контроля [7]. Визуальный канал хорошо работает с поверхностной морфологией, но хуже – с внутренней структурой; электромагнитный канал чувствителен к толщине и материалу, но почти не интерпретирует форму дефекта; томографический канал информативен, но менее производителен. Поэтому реальная система контроля все чаще проектируется как комбинация взаимодополняющих сенсоров.

Модели и алгоритмы обработки данных

Развитие систем контроля покрытий сопровождалось изменением подходов к обработке данных. В ранних системах машинного зрения чаще всего использовались пороговая обработка, выделение границ, анализ текстур, фильтрация и сравнение с эталоном. Эти методы по-прежнему применяются там, где тип дефекта заранее известен, а условия съемки мало меняются. Их основное достоинство состоит в понятной логике работы и умеренных требованиях к вычислительным ресурсам, что важно для встроенных систем реального времени [3, 4].

По мере усложнения изделий и увеличения разнообразия дефектов всё шире используются методы машинного и глубокого обучения. В таких системах задача контроля обычно сводится к обнаружению дефектов, их классификации, сегментации дефектных областей или поиску аномальных участков [2–5]. Нейросетевые модели хорошо работают в условиях сложного фона и изменчивой геометрии дефектов, однако их внедрение в производство связано с рядом практических трудностей. К ним относятся дисбаланс выборок, высокая стоимость экспертной разметки и ограниченная переносимость обученных моделей между разными типами изделий, покрытий и условиями съемки [5].

По этой причине для проектирования системы важен не только выбор архитектуры нейросети, но и стратегия формирования данных. Актуальны методы *few-shot* и *weakly supervised learning*, а также аномалийный подход, когда модель учится норме, а не каждому классу дефектов по отдельности [1, 4, 5]. Для контроля покрытий это особенно актуально, поскольку многие дефекты редки, а их морфология может сильно варьироваться. Кроме того, для физических методов контроля – например, термографии, терагерцовой или вихретоковой диагностики – алгоритмический уровень включает не только классификатор, но и процедуры реконструкции сигнала, подавления шумов, извлечения информативных признаков, калибровки и слияния каналов [18, 20].

В составе алгоритмического уровня можно выделить несколько функций: реконструкцию измеряемых параметров, интерпретацию полученных данных и формирование производственного решения. На практике они тесно связаны между собой, и качество работы системы зависит от согласованности всех этих этапов. Даже точная модель распознавания не решает задачу, если измерительный процесс нестабилен или, если решение приходит слишком поздно для воздействия на процесс.

В современных системах контроля также важна связь алгоритмического уровня с технологическим контуром производства. Модель должна не только выявлять дефект или оценивать параметр покрытия, но и учитывать контекст измерения: тип изделия, стадию технологического процесса, режим нанесения, историю настройки оборудования и допустимые пределы отклонений. В такой постановке алгоритм становится частью системы поддержки принятия решений, где результат анализа используется для локальной отбраковки, перенастройки режима нанесения, назначения повторного контроля или передачи данных в производственную аналитику.

Архитектурные подходы к проектированию системы

На практике используются несколько схем построения систем контроля покрытий. К ним относятся автономные постконтрольные станции, встроенные средства контроля в линии и мультимодальные системы с иерархическим принятием решения.

Автономная постконтрольная станция размещается после нанесения покрытия и ориентирована на отбраковку или сортировку готовых изделий. Ее сильная сторона – относительная простота интеграции и возможность использовать более сложные сенсоры, поскольку измерение вынесено за пределы критического технологического процесса. Недостаток состоит в том, что система выявляет дефект уже после его возникновения и не всегда позволяет скорректировать процесс в реальном времени [1, 21].

Встроенный контроль предполагает размещение сенсоров непосредственно в линии, а решение принимается синхронно с движением изделия. Такой подход характерен для рулонных, листовых, транспортных и роботизированных процессов нанесения покрытия. Он требует высокой устойчивости к вибрациям, изменению освещенности, загрязнению оптики и ограничениям по времени отклика [1, 6]. Встроенный контроль особенно эффективен тогда, когда результат измерения может использоваться для оперативной коррекции режима распыления, скорости подачи, температуры, расстояния до поверхности или других технологических параметров.

Мультимодальная система с иерархическим принятием решения использует быстрый канал широкого обзора, как правило оптический, для выполнения первичного скрининга, а более дорогие или медленные каналы включаются выборочно для уточняющего анализа подозрительных областей. Подобная архитектура хорошо согласуется с современными

тенденциями интеллектуального производства, где важны и производительность, и глубина анализа [1, 7]. Иерархический подход позволяет уменьшить вычислительную нагрузку и стоимость владения системой, одновременно сохраняя высокую информативность контроля.

По структуре такая система обычно включает сенсорный уровень, средства промышленного сбора данных, вычислительный уровень на периферийных узлах или промышленных ПК и уровень интеграции с остальной производственной системой. При этом данные контроля используются не только для локального решения о годности изделия, но и для анализа причин возникновения дефектов, настройки оборудования и накопления производственной статистики [1].

Ограничения и актуальные направления развития

Основное ограничение носит физический характер: разные типы покрытий и дефектов по-разному взаимодействуют со светом, теплом, электромагнитным полем и различными видами излучения. Поэтому метод, эффективный для прозрачных многослойных покрытий, может оказаться малоинформативным для сильно рассеивающих или проводящих поверхностей [13–20]. Не меньшее значение имеют и производственные условия: загрязнение, вибрации, нестабильная геометрия изделия, высокая скорость линии и изменчивость партий снижают устойчивость решений, которые в лаборатории показывают хорошие результаты.

Отдельные трудности связаны с данными и алгоритмами. Для покрытий характерны редкие дефекты, выраженный дисбаланс классов и ограниченные возможности разметки, поэтому обучение полностью контролируемых моделей оказывается затруднительным [2, 5]. Кроме того, производству требуются не только точность, но и объяснимость: оператору и технологу важно понимать, почему участок признан дефектным и с каким физическим фактором это может быть связано. По этой причине всё больший интерес представляют гибридные подходы, в которых физическая модель сигнала сочетается с методами машинного обучения. Кроме того, возрастает роль мультимодальных систем, объединяющих визуальные данные с информацией о толщине, составе и подповерхностной структуре покрытия [1, 7, 18].

В последние годы развитие в этой области связано прежде всего с мультисенсорными решениями, методами работы на малых выборках и включением контроля в общий контур управления производством [1, 2, 5]. В результате система контроля всё чаще используется не только для отбраковки изделий, но и для анализа причин дефектов и корректировки технологического процесса.

Заключение

Проектирование системы контроля качества покрытий изделий требует совместного учета физических принципов измерения, особенностей дефектов, методов обработки данных и ограничений производственной среды. Контроль покрытий включает не только поиск видимых поверхностных нарушений, но и оценку толщины, равномерности слоя, его внутренней структуры и признаков, связанных с эксплуатационной надежностью [6, 13–22]. Поэтому для таких задач особенно востребованы неконтактные и неразрушающие методы анализа.

На практике оптическое машинное зрение остаётся основным средством быстрого контроля внешних дефектов. В то же время методы ОКТ, терагерцовой, термографической, вихреговой, рентгенофлуоресцентной и лазерно-спектроскопической диагностики позволяют получать данные о толщине, структуре и составе покрытия. С учетом этого наиболее рациональным для промышленности является использование комбинированных систем, в которых разные методы дополняют друг друга и работают в общем производственном контуре. В таком подходе контроль служит не только для выявления брака, но и как инструмент повышения устойчивости самого технологического процесса.

APPROACHES TO DESIGNING A QUALITY CONTROL SYSTEM FOR COATING PRODUCTS

IU. S. IAKOVLEV, IU. V. BRUTTAN

Abstract. The article discusses approaches to the design of coating quality control systems for industrial applications. The focus is on non-contact and non-destructive methods, including machine vision, optical, eddy-current, thermographic, and spectral control tools. It is shown that the effectiveness of such systems depends not only on the chosen measurement method, but also on how well the system is integrated into the production process.

Keywords: coating quality control, nondestructive testing, non-contact methods, machine vision, optical coherence tomography, terahertz inspection, active thermography, multi-sensor systems.

Список литературы

1. Tang K., Li Y., Feng K., Liu Y. et al. Coating defect detection in intelligent manufacturing: Advances, challenges, and future trends // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2025. Vol. 94. Art. 103079.
2. Ma Y., Yin J., Huang F., Li Q. Surface defect inspection of industrial products with object detection deep networks: a systematic review // *Artificial Intelligence Review*. 2024. Vol. 57. Art. 333.
3. Ren Z., Fang F., Yan N., Wu Y. State of the art in defect detection based on machine vision // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2022. Vol. 9. P. 661-691.
4. Chen Y., Ding Y., Zhao F., Zhang E., Wu Z., Shao L. Surface defect detection methods for industrial products: a review // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 16. Art. 7657.
5. Bai D. et al. Surface defect detection methods for industrial products with imbalanced samples: a review of progress in the 2020s // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 130. Art. 107697.
6. Giurlani W., Berretti E., Innocenti M., Lavacchi A. Measuring the thickness of metal coatings: a review of the methods // *Coatings*. 2020. Vol. 10. No. 12. Art. 1211.
7. Liu J., Zhang Y., Li H. et al. Non-contact measurement of insulating bearing coating thickness based on multi-sensor combination // *Measurement*. 2023. Vol. 207. Art. 112369.
8. Panjan P., Drnovšek A., Gselman P., Čekada M., Panjan M. Review of growth defects in thin films prepared by PVD techniques // *Coatings*. 2020. Vol. 10. No. 5. Art. 447.
9. Kurc-Lisiecka A., Lisiecki A. Quality assessment and analysis of the causes of coating defects in the powder coating process // *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. 2025. Vol. 17. No. 1. P. 7-16.
10. Zhang J., Cho Y., Kim J. et al. Non-destructive evaluation of coating thickness using water immersion ultrasonic testing // *Coatings*. 2021. Vol. 11. No. 11. Art. 1421.
11. Nguyen T., Hubbard J., Pommersheim J. Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: a review // *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 148. Art. 105847.
12. Terek P., Kovačević L., Terek V. et al. Surface roughness and its effect on adhesion and tribological performance of magnetron sputtered nitride coatings // *Coatings*. 2024. Vol. 14. No. 8. Art. 1010.
13. Petersen C.R., Rajagopalan N. et al. Non-destructive subsurface inspection of marine and protective coatings using near- and mid-infrared optical coherence tomography // *Coatings*. 2021. Vol. 11. No. 8. Art. 877.
14. Lawman S., Williams B.M. et al. Scan-less line field optical coherence tomography, with automatic image segmentation, as a measurement tool for automotive coatings // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. No. 4. Art. 351.
15. Isern L., Waddie A.J., Chalk C. et al. Non-destructive thickness measurement of thermal barrier coatings using terahertz radiation // *Emergent Materials*. 2021. Vol. 4. P. 1547-1557.
16. Lenz M., Mazzon C., Dillmann C. et al. Spectral domain optical coherence tomography for non-destructive testing of protection coatings on metal substrates // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. No. 4. Art. 364.
17. Hansen R.E., Bæk T. et al. Non-contact paper thickness and quality monitoring based on mid-infrared optical coherence tomography and THz time domain spectroscopy // *Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 4. Art. 1549.
18. Zhang X., Wang Z., Wu S. et al. Nondestructive testing of corrosion thickness in coated steel structures with THz-TDS // *Measurement*. 2023. Vol. 217. Art. 113088.
19. Meinschmidt P., Ahlers F., Lang W. Laser scanning thermography for coating thickness inspection // *Engineering Proceedings*. 2021. Vol. 8. No. 1. Art. 17.
20. Meng X., Lu M., Yin W., Bennecer A., Kirk K.J. Evaluation of coating thickness using lift-off insensitivity of eddy current sensor // *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 2. Art. 419.
21. Shanfield Z., Bertin M. An X-ray fluorescence coating gauge for paint thickness // *Advances in X-Ray Analysis*. 2019. Vol. 21. P. 95-102.
22. Basler C. et al. Comparison of laser pulse duration for the spatially resolved measurement of coating thickness with laser-induced breakdown spectroscopy // *Sensors*. 2019. Vol. 19. No. 19. Art. 4133.