

Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта

Часть 13. Развитие автоматизированных систем оптической инспекции качества покрытия поверхностей изделий

Дарья ДОРМИДОШИНА,
заместитель генерального директора,
АО «ЦКБ «Дейтон»

Юрий ЕВСТИФЕЕВ,
к.т.н., старший научный сотрудник,
профессор, АО «ЦКБ «Дейтон»,
medved55@mail.ru

Валерий КЛЮЧНИКОВ,
генеральный директор,
АО «Завод «Марс»,

Евгений КЛЮЧНИКОВ,
заместитель главного конструктора,
АО «ЦКБ «Дейтон»

Юрий РУБЦОВ,
генеральный директор,
главный конструктор,
АО «ЦКБ «Дейтон»

Юрий ЮДАХИН, д.и.н.,
директор по научно-техническому развитию,
АО «ЦКБ «Дейтон»

В ЭК2–12 2025 г. описаны методы и способы настройки изображений для видимого диапазона обнаружения дефектов, методы измерения, классификации и формирования БД дефектов с помощью АПАК, поиска дефектов ИЭТ, описано обнаружение дефектов полупроводниковых пластин в поляризованном свете, рассмотрена проверка качества порошковых материалов и микроструктур поверхностей, описан поиск дефектов микросварки с помощью электромагнитных устройств, и предложен новый эффективный комбинированный метод поиска дефектов, описаны новая технология поиска дефектов на основе многокурсной структуры и поиск дефектов методом гомографии. Описано внедрение АПАК для обнаружения дефектов на металлокерамических корпусах типа 4. Рассмотрены тенденции 2025 г. по обнаружению дефектов ИЭТ оптическим способом, перспективы машинного обучения и глубокого машинного обучения, трехмерного компьютерного зрения, синтеза данных о дефектах. В ЭК1 2026 г. рассмотрены и обобщены тенденции 2025 г. в исследованиях и результатах применения оптического обнаружения дефектов ИЭТ с помощью технологий освещения. В этой части статьи описаны тенденции в развитии автоматизированных систем оптической инспекции для анализа качества покрытия поверхностей изделий.

Введение

За последние два десятилетия промышленное обеспечение качества изделий претерпело значительную трансформацию, эволюционировав от методов ручной инспекции к высокоавтоматизированным и интеллектуальным системам. В концепции Индустрии 4.0 умные производства полагаются на потоки данных в реальном времени и автономное принятие решений. При этом обнаружение дефектов стало краеугольным камнем операционной надежности и экономической эффективности производства. Традиционные методы проверки дефектов, главным об-

разом основанные на человеческом зрении или базовой пороговой обработке сигналов, оказались недостаточными в ситуациях, требующих высокой скорости, точности и адаптивности. По мере того как производственные системы все чаще применяют средства автоматизации, датчики и сетевую вычислительную инфраструктуру, возможность использовать мультимодальные данные для распознавания дефектов становится реальной. Использование компьютерного зрения, источников излучений и мониторинга отражений представляет собой комплексный способ для фиксации как поверхностных, так и скрытых аномалий в изделиях. Тем не ме-

нее интеграция этих методов при своей эффективности остается технической задачей. Визуальные сигналы богаты пространственной информацией, но не имеют глубины проникновения. Акустические сигналы позволяют обнаруживать временные внутренние дефекты, например распространение трещин или усталость материала, но подвержены окружающему шуму. Вибрационные сигналы, часто зафиксированные с помощью акселерометров, предоставляют важную информацию о механической нестабильности, но обычно их трудно интерпретировать. Интеграция этих разнородных потоков данных в единую интеллектуальную систему

принятия решений является центральной мотивацией нашего исследования. Сложность современных промышленных сред требует более сложных систем, способных обнаруживать дефекты, начиная с поверхностных царапин и микротрещин и заканчивая внутренними структурными несоответствиями, часто возникающими одновременно. Перспективно мультимодальное обнаружение поверхностных и внутренних дефектов путем синтеза RGB- и 3D-моделей. Схема синтеза представлена на рис. 1.

В последние годы достижения в области искусственного интеллекта (ИИ) значительно преобразили разные отрасли, и электроника не стала исключением. Среди множества применений технологии ИИ ее интеграция в процесс покрытия тонким слоем (слоями) из разных материалов изделий электронной техники (ИЭТ) и их элементов является ярким примером того, как интеллектуальная автоматизация позволяет улучшить традиционные методы производства. Покрытия, важная технология нанесения тонкого слоя металла или других материалов на поверхность ИЭТ, играет решающую роль в электронике, обеспечивая качество изделий и соответствие нормативным требованиям.

На поверхности ИЭТ могут наноситься драгоценные и цветные металлы в целях повышения проводимости и защиты от коррозии. Помимо металлов в качестве покрытий ИЭТ могут использоваться материалы: акриловые, полиуретановые и эпоксидные; силиконовые, париленовые (тончайшие, конформные, равномерные), полимерные пленки, наносимые методом газовой полимеризации для защиты ИЭТ от внешних воздействий, что достигается благодаря их уникальной способности проникать в мельчайшие детали и создавать беспористый барьер.

По мере того как ИЭТ становятся функциональнее и сложнее, растет потребность в технологиях для нанесения покрытий, способных к сверхтонкому осаждению и точному нанесению. При этом используются достижения в таких технологиях, как атомное

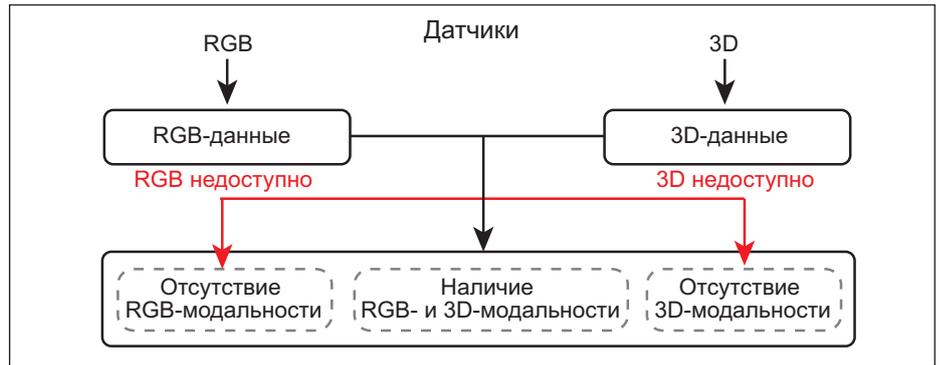


Рис. 1. Схема синтеза RGB- и 3D-моделей

осаждение, позволяющие наносить покрытия с субмикронной точностью.

Таким образом, несмотря на то, что спрос на ИЭТ растет, производители рассматривают покрытия как первостепенную задачу при разработке новых изделий. Они учитывают плотность, толщину и вес покрытия, чтобы гарантировать, что защита не будет противоречить другим техническим характеристикам ИЭТ [1].

Поскольку требования к точности, экономичности и экологичности продолжают расти, установленные методы покрытия ИЭТ переосмысливаются и совершенствуются.

Технологии ИИ, больших данных, машинное обучение (МО), позволяют производителям оптимизировать процессы покрытия поверхностей ИЭТ. Эти инновации обеспечивают точный контроль над условиями покрытия, включая температуру, время и концентрацию химических веществ, что приводит к более высокому качеству покрытия и сокращению отходов. Более того, автоматизированные программно-аппаратные комплексы (АПАК) с ИИ могут анализировать большие массивы данных для прогнозирования и предотвращения дефектов в процессе покрытия, помогая производителям добиваться стабильных результатов [2]. Помимо повышения качества, ИИ оптимизирует операционную эффективность, позволяя

предприятиям заблаговременно реагировать на колебания рыночного спроса и стоимость материалов с помощью методов, представленных на рис. 2.

По мере дальнейшего изучения преобразующего влияния ИИ на процесс покрытия становится очевидным, что эти передовые технологии являются не просто инструментами для улучшения, а катализаторами инноваций. Благодаря индивидуализации и автоматизации, ИИ открывает путь к новой эре нанесения покрытия, где приоритет отдается как экономической целесообразности, так и экологической устойчивости. С учетом дальнейшего развития электроники понимание взаимодействия ИИ и покрытия будет иметь жизненно важное значение для производителей ИЭТ, стремящихся оставаться конкурентоспособными в быстро меняющемся мире. В настоящей статье представлены конкретные перспективы АПАК с ИИ, их преимущества для изготовления ИЭТ с покрытиями.

Автоматизация процессов нанесения покрытий

В мировой практике процессы нанесения покрытий ИЭТ претерпели значительные изменения благодаря внедрению ИИ. Автоматизация процессов является ключом



Рис. 2. Методы ИИ в задачах оптимизации операционной эффективности

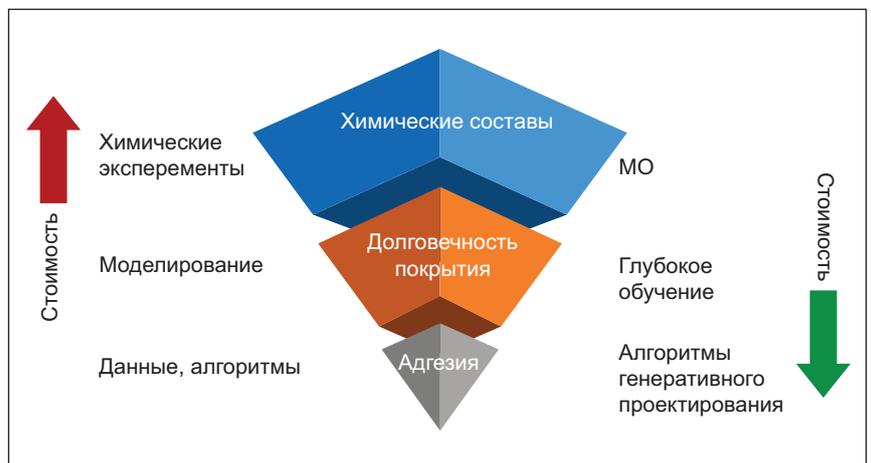


Рис. 3. Интеграция ИИ в автоматизацию процессов нанесения покрытий

чевым аспектом этих изменений, внедряя передовые технологии, которые оптимизируют и улучшают процедуры нанесения. Традиционно эти процессы были трудоемкими, требуя квалифицированных специалистов, вручную контролирующих каждый этап. Благодаря автоматизации на основе ИИ весь рабочий процесс может быть оптимизирован, что приводит к повышению эффективности и стабильности.

Такие технологии ИИ, как МО и робототехника, могут выполнять задачи, начиная с подготовки поверхности и заканчивая самим процессом нанесения и контроля качества. Используя обширные массивы данных, системы ИИ определяют наиболее эффективные параметры покрытия – температуру, плотность и состав раствора – уменьшая дефекты поверхности ИЭТ. Автоматизированные системы также отслеживают производительность в режиме реального времени, предоставляя обратную связь, которая позволяет немедленно вносить корректировки [3] в процессы. Такой уровень автоматизации не только обеспечивает высокое качество покрытий, но и минимизирует вероятность дефектов или сбоев в процессах, что является критической проблемой в таких отраслях, как электроника.

Более того, внедрение ИИ в покрытия способствует масштабированию производства. Производители в состоянии удовлетворять более высокие требования заказчиков и потребителей ИЭТ без ущерба для качества. Автоматизированные процессы могут работать круглосуточно, увеличивая производительность и снижая объем человеческих ошибок. Этот сдвиг напрямую влияет на сроки выполнения заказов, позволяя предприятиям оперативнее реагировать на потребности рынка. Стабильность, обеспечиваемая автоматизацией, гарантирует поддержание высоких стандартов качества продукции, укрепляя репутацию предприятия.

В дополнение к этим операционным преимуществам, автоматизация процессов с использованием ИИ способствует инновациям в производстве ИЭТ. Используя ИИ, производители могут разрабатывать новые методики и рецептуры, улучшающие процесс покрытия. Например, ИИ участвует в оптимизации химического состава и открытии новых методов, обеспечивающих лучшую адгезию и более долговечное покрытие как показано на рис. 3. Такие разработки способствуют увеличению надежности ИЭТ, удовлетворяя требования заказчиков к долговечности на всегда конкурентном рынке.

В целом, интеграция ИИ в автоматизацию процессов покрытия меняет ландшафт производства, что, в конечном итоге, приводит к повышению качества, увеличению эффективности и росту инноваций в электронной промышленности.

Контроль над качеством нанесения покрытий

Высококачественные покрытия не только придают материалам желаемые свойства, такие как коррозионная стойкость, термостойкость, но и значительно повышают их надежность и безопасность. Под влиянием окружающей среды и производственных процессов покрытия подвержены неизбежным дефектам, которые ухудшают защитные свойства ИЭТ, приводя к отказам. Следовательно, обеспечение стабильности и надежности производства требует высокоточной проверки качества покрытий.

В этом контексте ИИ совершает революцию в традиционных подходах к поддержанию стандартов качества и обеспечению соответствия ИЭТ требованиям. ИИ в процессе контроля качества позволяет анализировать огромные объемы данных, обеспечивая мониторинг в реальном времени и корректировки, которые прежде осуществлялись вручную.

Традиционно контроль качества покрытия ИЭТ включает в себя многочисленные контрольные мероприятия, представленные на рис. 4. Их осуществляет специалист по выявлению дефектов или несоответствий в процессе покрытия. Однако этот метод трудоемкий, субъективный и подвержен ошибкам из-за усталости человека или невнимательности [4].

Для контроля покрытия могут применяться неразрушающие методы, основанные на физических свойствах материалов, контактные и бесконтактные, включая ультразвуковой, электромагнитный, вихрековый контроль и активную инфракрасную термографию. Эти методы обнаруживают дефекты путем анализа физических свойств исследуемой поверхности ИЭТ, используя такие механизмы, как распространение звуковых волн, электромагнитная индукция и теплопроводность. Однако их эффективность значительно зависит от свойств материала и условий окружающей среды, в то время как

точность и чувствительность обнаружения в значительной степени зависят от характера дефекта.

Рынок систем обнаружения дефектов покрытий, в основном, развивается за счет оптических технологий контроля, которые доминируют благодаря высокому разрешению, скорости и бесконтактному характеру. На оптические системы в 2025 г. пришлось около 60% мирового рынка контроля дефектов покрытий [1]; при этом Северная Америка и Европа лидируют по внедрению благодаря развитой производственной инфраструктуре и строгим стандартам качества. Ультразвуковые системы набирают популярность в секторах, требующих обнаружения дефектов под поверхностью, особенно в ИЭТ, применяемых в авиакосмической и автомобильной промышленности, с прогнозируемым среднегодовым темпом роста около 8% в течение следующих пяти лет. Рентгеновские системы контроля, хотя и более дорогостоящие, имеют решающее значение для обнаружения внутренних дефектов в сложных ИЭТ, в основном также применяемых в таких высокотехнологичных секторах, как оборонная и авиакосмическая промышленности. Производство ИЭТ и проверка качества покрытия становятся быстро растущими нишами, чему способствуют миниатюризация и спрос на бездефектные покрытия.

Лазерные сканирующие системы становятся перспективным подsegmentом, обеспечивая высокую точность для сложных геометрических форм, с ожидаемым быстрым ростом в Азиатско-Тихоокеанском регионе, обусловленным расширением центров производства электроники.

Доминирующим подsegmentом остается оптический контроль, но ультразвуковые и лазерные системы также ожидают ускоренный рост, обусловленный технологическими инновациями и повышением стандартов качества. Стратегическое внимание уделяется интеграции мультимодальных возможностей обнаружения для повышения точности идентификации дефектов и операционной



Рис. 4. Операции контроля покрытий

эффективности. Ученые и исследователи проводят работы по полному объединению данных с датчиков, часто с неполными наборами данных или без функций интерпретируемости. Обзор и анализ таких работ представлен в [5–8].

С помощью ИИ производители могут использовать передовые алгоритмы, которые анализируют данные на разных этапах процессов покрытия. Эти алгоритмы способны обнаружить мельчайшие несоответствия в толщине, адгезии и общем качестве покрытия, которые могут остаться незамеченными человеческим глазом. Методы МО позволяют АПАК учиться на основе прошлых событий, улучшая прогностические возможности, и минимизировать вероятность дефектов в следующих партиях ИЭТ.

Кроме того, АПАК на основе ИИ способны более активному контролю качества. Вместо простой оценки готовой продукции интеллектуальные системы могут непрерывно собирать данные в течение всего процесса покрытия, включая мониторинг таких переменных, как химический состав раствора, температура и время процесса, что позволяет немедленно его скорректировать, если какие-либо параметры отклонились от оптимальных условий. В результате производители имеют возможность снизить риск изготовления некачественной продукции и повысить общее количество годных.

Использование ИИ в контроле качества также распространяется на документацию и соответствие требованиям. АПАК могут генерировать подробные отчеты, которые отслеживают показатели качества с течением времени, предоставляя информацию о стабильности и надежности процесса. Это особенно важно в радиоэлектронной промышленности, где соблюдение нормативных требований имеет решающее значение. ИИ помогает оптимизировать эти процессы, облегчая производителям соблюдать требования норм, правил и стандартов.

В целом, интеграция ИИ в методы контроля качества трансформирует процесс покрытия, повышая точность, снижая количество человеческих ошибок и способствуя проактивному управлению качеством. По мере дальнейшего развития технологий можно ожидать дальнейших усовершенствований, которые не только улучшат качество продукции, но и повысят общую эффективность и надежность производственного процесса. Этот переход к принятию решений на основе данных позволяет предприятиям удовлетворять растущие требования к качеству на современном конкурентном рынке.

Снижение затрат и повышение эффективности

Процесс покрытия особенно драгоценными металлами, традиционно считавшийся дорогостоящим и трудоемким, претерпел



Рис. 5. Направления снижения затрат и повышения эффективности с использованием ИИ

значительные изменения с внедрением ИИ. В основе этих изменений лежат снижение затрат и повышение эффективности, поскольку технологии ИИ оптимизируют операции, минимизируют отходы и распределяют ресурсы по направлениям, представленным на рис. 5. Анализируя огромные массивы данных, системы ИИ определяют наиболее эффективные методы покрытия, что приводит к увеличению производительности при одновременном снижении общих затрат.

Одной из основных областей, где ИИ способствует снижению затрат, является автоматизация процесса покрытия. АПАК, оснащенные возможностями ИИ, могут точно контролировать такие параметры, как температура, время покрытия и концентрация химических реагентов. Такой уровень контроля не только повышает качество готового изделия, но и снижает потребность в ручном труде и вероятность человеческих ошибок, исправление которых может оказаться дорогостоящим и трудоемким процессом. Более того, с помощью ИИ можно прогнозировать потребности в техническом обслуживании оборудования, анализируя оперативные данные, что позволяет планировать техобслуживание и предотвращать дорогостоящие поломки и простои.

Анализ на основе ИИ также позволяет принимать более взвешенные решения в управлении цепочками поставок. Прогнозируя спрос и оптимизируя уровни запасов, предприятия могут минимизировать излишние затраты на материалы и избежать дефицита, задерживающего производство. Эта способность распространяется и на прогнозирование тенденций на самом рынке материалов и растворов для покрытия, позволяя предприятиям принимать обоснованные решения о том, когда закупать применяемое сырье, и извлечь выгоду из благоприятных рыночных условий.

В результате организации, внедряющие ИИ в процессы покрытия, не только получают значительную экономию затрат, но и становятся передовыми за счет эффективности

операций. Снижение накладных расходов и оптимизация процессов позволяют предлагать конкурентоспособные цены, привлекать потребителей и, в конечном итоге, увеличить долю выпускаемой продукции на рынке. Таким образом, ИИ не просто меняет способ покрытия – он революционизирует экономический ландшафт отрасли, позволяя предприятиям быть более гибкими, оперативными и экономически эффективными.

Устойчивое развитие и воздействие на окружающую среду

В последние годы вопросам устойчивого развития и воздействия на окружающую среду в разных отраслях промышленности, включая такие процессы, как покрытие ИЭТ, уделяется значительное внимание. Поскольку потребителям все чаще необходимы экологически чистые методы, предприятия изучают, как ИИ может преобразовать традиционные операции покрытий в более устойчивые модели. Одна из активно используемых в технологиях покрытия представлена на рис. 6.

С помощью технологий ИИ предприятия могут значительно сократить свой экологический след, оптимизировать использование ресурсов и минимизировать отходы, что приводит к общему улучшению качества производственного процесса.

Одним из способов, с помощью которого ИИ способствует устойчивому развитию в процессах покрытия, является оптимизация процесса. Используя МО, предприятия могут точно настраивать параметры процессов. Это не только обеспечивает более эффективное нанесение металла с меньшим использованием ресурсов, но и помогает контролировать толщину и качество слоя. Точность, обеспечиваемая системами ИИ, снижает вероятность чрезмерного использования металлов или появления дефектов, требующих повторной обработки. Это, в свою очередь, приводит к снижению материальных затрат и уменьшению воздействия на окружающую среду.

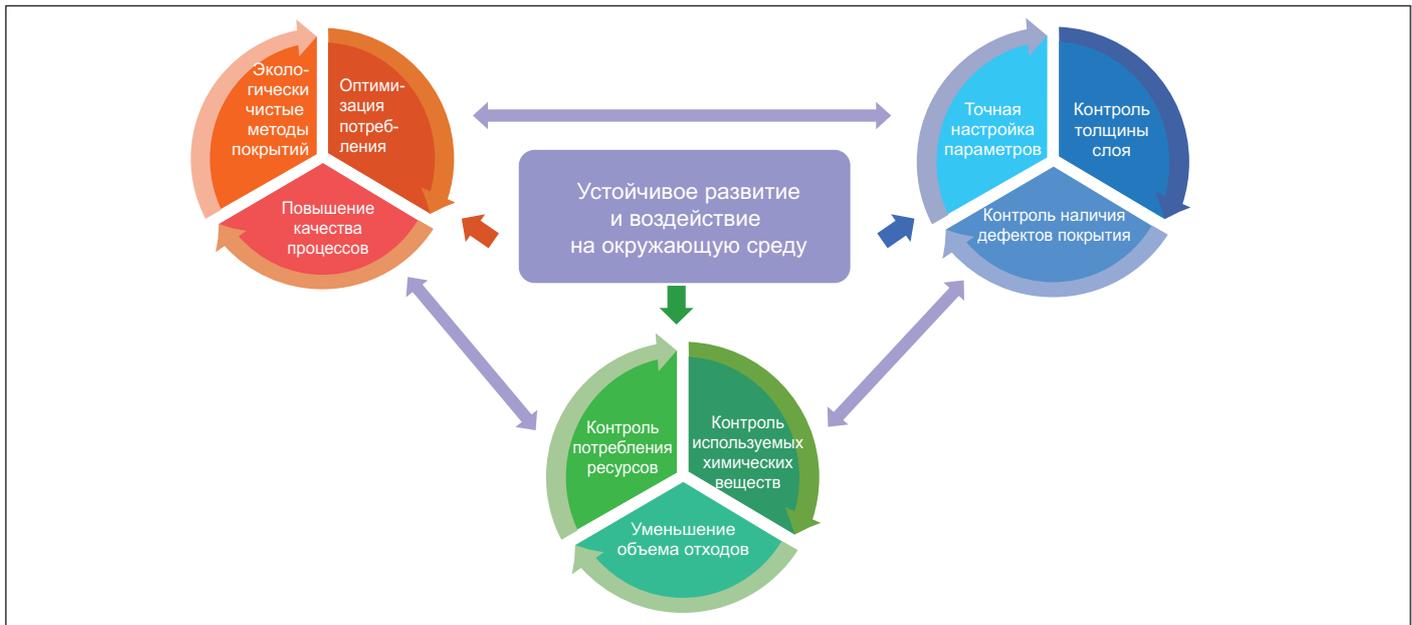


Рис. 6. Оптический двухпроходный модуль для получения изображения

Кроме того, ИИ может улучшить возможности мониторинга и отчетности, позволяя компаниям тщательно отслеживать потребление ресурсов. Благодаря анализу данных в реальном времени предприятия могут измерять потребление энергии, количество используемых химических веществ и образование отходов, связанных с операциями покрытия. Эти данные позволяют выявлять неэффективность и предоставлять полезные рекомендации для повышения устойчивости деятельности предприятия. Например, если система ИИ выявляет чрезмерное потребление энергии на определенном этапе покрытия, руководство может вмешаться и внедрить энергосберегающие меры или альтернативные методы, соответствующие более экологичным стандартам.

Кроме того, роль ИИ распространяется и на сферу соблюдения экологических норм. Во многих странах действуют строгие законы, регулирующие производственные процессы, особенно в отношении использования опасных материалов и утилизации отходов. ИИ позволяет предприятиям ориентироваться в этих сложных правилах, предоставляя автоматические обновления и обеспечивая соблюдение передовых методов, помогая не только поддерживать соответствие нормативным требованиям, но и повышению репутации трудового коллектива как ответственного, экологически сознательного предприятия.

Малосерийность и инновации в конструкции и покрытии ИЭТ драгоценными и цветными металлами

Процесс покрытия устойчиво представлял собой стандартную процедуру, в значитель-

ной степени определяемую конкретными размерами, материалами и методами. Однако достижения в области ИИ значительно меняют подход к инновациям в этой отрасли. Технологии ИИ позволяют производителям повышать качество изделий за счет покрытий, предлагая потребителям беспрецедентные возможности, отвечающие конкретным требованиям к функциональным характеристикам, параметрам и показателям качества. С помощью алгоритмов МО конструкторы и технологи получают возможность анализировать огромные массивы данных для выявления тенденций, отказов и дефектов, способствуя созданию более востребованных и при необходимости мелкосерийных ИЭТ.

ИИ помогает на этапе проектирования, облегчая быстрое прототипирование, итерации и моделирование. Используя алгоритмы генеративного проектирования, инженеры могут создавать более сложные конструкции и инновационные покрытия, которые были бы невозможны при использовании ручных методов. Эти алгоритмы моделируют функционирование решений при разных составах растворов, толщине покрытия и материалах, позволяя осуществлять коррекцию в режиме реального времени для обеспечения требуемых функциональных характеристик и уровня качества. Эта адаптивность не только помогает в индивидуализации ИЭТ, позволяя создавать новые типонаименования малыми сериями, но и сокращает время, обычно затрачиваемое на доработку конструкции, ускоряя весь процесс разработки ИЭТ.

Кроме того, ИИ помогает прогнозировать результаты на основе исторических данных, что позволяет инженерам принимать обоснованные решения относительно конструкции изделий и процессов покрытия их поверхностей. Эта способность прогно-

зирования особенно важна в электронике, где требования потребителей могут быстро меняться. Используя аналитические данные, полученные с помощью ИИ, производители получают возможность лучше согласовывать свои предложения с текущими тенденциями, что, в конечном итоге, приводит к созданию ИЭТ, которые с большей вероятностью будут востребованы на рынке.

Индивидуализация процесса покрытия также повышает потенциал ИЭТ, поскольку уникальные, особо стабильные и малосерийные изделия часто обладают более высокой воспринимаемой ценностью (для космической или атомной отрасли). Благодаря ИИ становится проще удовлетворять потребности нишевых рынков, предлагая продукцию на заказ в необходимых масштабах и партиях без потери операционной эффективности. Сочетание инноваций в конструкции и персонализации с помощью ИИ не только расширяет возможности производителей, но и обогащает опыт потребителей, а также отвечает требованиям к ИЭТ. По мере дальнейшего развития этих технологий будущее открывает еще более захватывающие возможности для покрытия ИЭТ драгоценными, цветными металлами и другими материалами.

Выводы

Интеграция ИИ в процесс покрытия создает кардинальные изменения в сторону более устойчивых и экологически чистых методов. Оптимизируя использование ресурсов, расширяя возможности мониторинга и помогая соблюдать нормативные требования, ИИ прокладывает путь к более экологичному будущему производству. По мере того как отрасль продолжает внедрять инновации,

взаимосвязь между технологиями и экологичными методами может установить золотой стандарт устойчивого производства.

По мере развития ИИ, компьютерного зрения, методы обработки изображений [9–10] нашли широкое применение в обнаружении дефектов покрытий. По сравнению с методами, основанными на физических свойствах, новые технологии обеспечивают более высокую точность обнаружения, эффективность и автоматизацию.

Несмотря на эти достижения, подходы, основанные на применении ИИ, по-прежнему сталкиваются с рядом проблем. Большинство существующих методов основано на контролируемом обучении, которое требует больших объемов высококачественных размеченных наборов данных. Однако дефицит стандартизованных наборов данных о дефектах покрытий ограничивает обобщающую способность моделей. Кроме того, разнообразный, сложный и непредсказуемый характер дефектов покрытий создает значительные проблемы для обучения с малым количеством примеров, затрудняя обучение моделей с ограниченным количеством размеченных данных. Большинство существующих исследований в основном сосредоточено на конкретных промышленных приложениях; при этом исследования в области неконтролируемого обучения, мультимодального слияния и проектирования облегченных моделей ограничены. Эти ограничения препятствуют широкому внедрению методов обнаружения дефектов покрытий. Таким образом, дальнейший всесторонний обзор и обсуждение будущих перспектив покрытий, развитие ИИ имеют важное значение для продвижения исследований в этой области

и предоставления ценных идей для дальнейших разработок ИЭТ.

В следующей части статьи мы продолжим всесторонний обзор и обсуждение перспектив нанесения и контроля качества покрытий изделий ИЭТ.

Литература

1. Coating Defect Detection System Navigating Dynamics Comprehensive Analysis and Forecasts 2026–2033. Dec 16, 2025 // <https://www.datainsightsmarket.com/reports/coating-machines-1532924?tab=methodology>.
2. Bin Zi, Kai Tang, Yuan Li, Kai Feng, Yongkui Liu, Lihui Wang. Coating Defect Detection in Intelligent Manufacturing: Advances, Challenges, and Future Trends. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University. Xi'an, Shanxi, China June. 2025 // <https://www.sciencedirect.com>.
3. Дормидошина Д. А. Компьютерное зрение в системах контроля качества продукции и связь с TQM и MES // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2025. №1.
4. Дормидошина Д. А., Рубцов Ю. В. Искусственный интеллект в визуальной проверке качества изделий: технологические и экономические аспекты // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2025. №2.
5. Milad Rahmati. A Multimodal Deep Learning Framework for Real-Time Defect Recognition in Industrial Components Using Visual, Acoustic and Vibration Signals. Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment. Vol. 6 No. 3. // <https://doi.org/10.1108/JIMSE-07-2025-0015>.
6. Shuai Jiang, Yunfeng Ma, Jingyu Zhou, Yuan Bian, Yaonan Wang, Min Liu. Resilient Multimodal Industrial Surface Defect Detection with Uncertain Sensors Availability. School of Artificial Intelligence and Robotics and the National Engineering Research Center for Robot Visual Perception and Control Technology. Hunan University. Changsha, Hunan China. Sep 2025 // <https://arxiv.org/html/2509.02962v1>.
7. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Вячеслав Малышев, Артем Назаренко, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 7. Новая технология поиска дефектов на основе многокурсной структуры // Электронные компоненты. №8. 2025.
8. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Вячеслав Малышев, Артем Назаренко, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 6. Поиск дефектов изделий на основе особых точек ORB // Электронные компоненты. №7. 2025.
9. Дормидошина Д. А., Рубцов Ю. В. Обзор и анализ методов извлечения изображений дефектов в автоматическом оптическом контроле качества изделий электронной техники // Флагман науки. №10. 2025.
10. Дормидошина Д. А., Рубцов Ю. В. Обзор и анализ методов пороговой обработки изображений в автоматическом оптическом контроле качества изделий электронной техники // Флагман науки. №9. 2025.