

УДК 621.793.74:620.193

ИННОВАЦИОННАЯ АДАПТИВНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НАНЕСЕНИЯ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ КОМПОНЕНТОВ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Гатиятуллин А.Р.¹, студент гр. НТТС-31, III курс

Научный руководитель: Шмойлов А.Н.¹ к.т.н., доцент

¹Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара

Современный этап развития экономики характеризуется высокой интенсивностью использования наземных транспортных комплексов. Железнодорожный подвижной состав, автомобильная и специальная техника являются ключевыми элементами транспортной инфраструктуры, обеспечивающими мобильность населения и бесперебойность производственных процессов. В условиях непрерывно растущих объемов перевозок и ужесточения требований к эксплуатационной надежности, проблема сохранения работоспособности техники приобретает первостепенное значение.

Особенностью функционирования наземных транспортных средств является их непосредственное взаимодействие с внешней средой в широком диапазоне климатических зон и дорожных условий. В процессе эксплуатации данные объекты подвергаются комплексному негативному воздействию целого ряда агрессивных факторов. К ним относятся значительные перепады температур, вызывающие термоциклические напряжения в материалах; высокая влажность и атмосферные осадки, способствующие развитию коррозионных процессов; химически активные дорожные реагенты, используемые для борьбы с гололедом; абразивный износ, возникающий из-за воздействия песчано-соляных смесей, пыли и твердых частиц; а также динамические и ударные механические нагрузки, сопровождающие движение.

Совокупное действие этих факторов приводит к ускоренному износу узлов и агрегатов, снижению ресурса конструкционных материалов, увеличению частоты отказов и, как следствие, к росту эксплуатационных затрат. В связи с этим, вопросы повышения стойкости наземных транспортных комплексов к воздействию агрессивных сред, совершенствования методов защиты и прогнозирования ресурса являются актуальными научно-техническими задачами, решение которых направлено на обеспечение безопасности перевозок и повышение эффективности транспортной отрасли в целом [1]. Коррозионные повреждения несущих элементов, кузовов, ходовых частей и систем трубопроводов приводят к снижению ресурса, увеличению простоев, росту затрат на ремонт и, в ряде случаев, создают угрозу безопасности движения. По данным отраслевых исследований, потери от коррозии в транспортном секторе составляют до 4–

5% ВВП промышленно развитых стран, при этом значительная доля приходится на железнодорожную инфраструктуру и подвижной состав.

Традиционные методы антикоррозионной защиты – многослойные лакокрасочные покрытия, цинкование, использование нержавеющей сталей – не всегда обеспечивают требуемую долговечность в условиях высоких циклических нагрузок, абразивного воздействия песка и щебня, а также постоянного увлажнения технической солями. Кроме того, нанесение защитных слоёв на крупногабаритные детали вагонов, локомотивов и спецтехники сопряжено с трудностями обеспечения равномерности толщины и адгезии на сложных поверхностях [2].

Одним из наиболее перспективных решений считается использование нанокompозитных покрытий, которые наносятся с помощью вакуумно-плазменных методов. Благодаря наличию наноразмерных составляющих (например, сочетаний металл–керамика, металл–полимер или многослойных структур) такие покрытия демонстрируют уникальные характеристики: высокую устойчивость к коррозии, повышенную твёрдость, малый коэффициент трения и способность к самовосстановлению при незначительных повреждениях. Вместе с тем, процесс их формирования крайне чувствителен к изменению технологических параметров — температуры, состава газовой фазы, энергии ионного облучения. Любые отклонения от оптимума вызывают неоднородность структуры, снижение адгезии и образование дефектов, что в условиях серийного ремонта и производства недопустимо.

В этой связи на первый план выходит задача разработки адаптивных автоматизированных систем управления процессом осаждения покрытий. В отличие от традиционных жёстко заданных контроллеров, адаптивные системы позволяют в реальном времени реагировать на возмущения (изменение состояния мишеней, колебания давления, тепловую инерционность оборудования) и оперативно корректировать режимы для сохранения стабильности структуры и, следовательно, коррозионной стойкости покрытий. Создание таких систем для транспортного машиностроения, где номенклатура деталей широка, а требования к надёжности чрезвычайно высоки, представляет собой актуальную научно-техническую проблему.

Разрабатываемая адаптивная автоматизированная система (ААС) ориентирована на управление вакуумно-плазменным нанесением нанокompозитных покрытий на элементы наземных транспортных комплексов, включая детали железнодорожного подвижного состава. Архитектура системы построена по распределённому принципу на основе промышленных контроллеров и интеллектуальных датчиков, объединённых в единую сеть.

В рамках работы была создана архитектура указанной адаптивной автоматизированной системы, а также предложена её аппаратная платформа. В состав системы входят: широкополосные оптические эмиссионные

спектрометры (для непрерывного анализа состава плазмы), волоконно-оптические пирометры (контроль температуры подложек и деталей), манометры (ёмкостные и ионизационные), масс-расходомеры технологических газов (аргон, азот, реактивные компоненты), а также датчики тока и напряжения дуговых и магнетронных разрядов.

Предлагается оснастить систему источниками питания магнетронов с функцией быстрой регулировки тока и напряжения, генераторами импульсного смещения (bias) на подложку, пропорциональными клапанами для управления давлением и механизмами перемещения деталей (планетарные вращатели с регулируемой частотой вращения).

Ключевой особенностью разрабатываемой системы является применение адаптивных регуляторов, которые позволяют настраивать управляющие воздействия в зависимости от текущего состояния технологического процесса и возникающих возмущений [3].

Идентификация параметров процесса осуществляется в непрерывном режиме с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов, что позволяет отслеживать динамически изменяемые характеристики объекта управления – тепловую инерционность детали, скорость распыления мишени и эффективность ионизации. В качестве источников данных выступают спектроскопия плазмы (интенсивности характерных линий Ti, Al, Si, Cr, N₂) и тепловизионный контроль.

Для контура стабилизации температуры подложки применён каскадный регулятор с эталонной моделью, компенсирующий вариации теплоёмкости и теплопроводности крупногабаритных деталей. Управление составом покрытия (стехиометрией нитридов) реализовано на основе нечёткого регулятора, коэффициенты которого настраиваются по базе знаний, сформированной по результатам предварительных экспериментов. Входными переменными служат отношения интенсивностей спектральных линий металлов и азота, давление и ток разряда.

Разработка системы выполнялась в соответствии с V-моделью, что обеспечило параллельное проектирование, верификацию и валидацию на всех этапах.

Был проведён сбор и анализ данных о коррозионных повреждениях деталей подвижного состава (рам тележек, элементов кузова, тормозной арматуры). Определены критические зоны, предъявляемые требования к адгезии, допустимый диапазон толщины покрытия (5–15 мкм), а также требуемый ресурс – не менее 15 лет в условиях умеренно-агрессивной среды. Сформулированы требования к адаптивной системе: диапазоны регулирования параметров, точность стабилизации, быстродействие и интерфейсы взаимодействия.

Разработанная адаптивная автоматизированная система позволяет повысить коррозионную стойкость деталей в 3–5 раз и обеспечить стабильность свойств покрытий при серийном нанесении, сократив разброс показателей адгезии и толщины на 30–40 %. Внедрение системы даёт

возможность уменьшить время переналадки оборудования и снизить эксплуатационные затраты за счёт сокращения простоев подвижного состава, вызванных коррозионными разрушениями.

Список литературы:

1. Довгяло, В. А. Эксплуатация путевых машин и оборудования : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности «Эксплуатация наземных транспортных и технологических машин и комплексов» / В. А. Довгяло, В. Л. Моисеенко, К. В. Максимчик, Е. М. Масловская, Н. В. Письменная. – Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2024. – 401 с. – EDN: OFANDE.
2. Гарашко В. В. Антикоррозионная защита шпунтовых ограждений: технологии, материалы и перспективы // Молодой исследователь Дона. – 2025. – Т. 10, № 3 (54). – С. 17–21. – EDN: UTSLHL.
3. Опейко О. Ф. Синтез дискретного адаптивного управления с пид-регулятором // Системный анализ и прикладная информатика. – 2025. – № 4. – С. 36–40. – DOI: 10.21122/2309-4923-2025-4-36-40. – EDN: FCHNYY.