

**В.В. Трубников, В.А. Марков, А.В. Трофимов, А.М. Хахина,
И.А. Зверев**

АНАЛИЗ АНТИКОРРОЗИЙНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСНЫХ МАШИН

Введение. В настоящее время металлы и их сплавы в качестве конструкционных материалов играют важную роль во всех отраслях промышленности и сельского хозяйства. Свойства объекта – прочность, пластичность, высокая электропроводность, теплопроводность, металлический блеск, хорошая обрабатываемость и др. – обеспечивают универсальность их применения.

Металлы химически активны и при контакте с внешней средой подвергаются разрушению, которое называют коррозией [Быкова, 2018; Олиференко и др., 2021]. Процесс является одной из главных причин разрушения материалов, что приводит к значительным экономическим потерям. Анализ технологий борьбы с коррозией позволяет понять, какие методы и подходы наиболее эффективны для машин лесной отрасли, а также выявить ошибки и недостатки, которых можно избежать правильным выбором способа защиты.

Борьба с коррозией является актуальной научной, повседневной проблемой с глубокой древности, с тех пор как появились первые изделия из металла. Основным видом защиты уже в те времена были, как и сейчас, защитные покрытия. Например, в Древнем Египте в качестве покрытий использовали природные смолы, а в 950 г. до н. э. при строительстве дворца Соломона железные сооружения покрывали асфальтом [Различные..., 2014].

Начало научного изучения коррозии связано с работами М.В. Ломоносова, которому принадлежит открытие в 1748 г. закона сохранения массы. Ломоносов изучал растворение металлов в кислотах и показал принципиальное отличие механизма их растворения от растворения солей, при котором тепло поглощается [Различные..., 2014; Олиференко и др., 2021].

При оценке воздействия коррозии на поверхность металла лесных машин необходимо учитывать внешние природные и технологические факторы. Эксплуатация систем проходит в тяжелых условиях, связанных с повышенной влажностью и знакопеременными температурами, при

движении машин по лесу происходит контакт с ветвями деревьев, который может вызывать царапины и отслоения краски, способствующие ускоренному развитию явления. Понимание процессов коррозии и методов защиты от нее является важной задачей для инженеров и ученых, так как это позволяет продлить срок службы конструкций и снизить затраты на их обслуживание и ремонт.

Успешную борьбу с коррозией в связи со сложными и разнообразными запросами современной техники уже невозможно проводить на основе чисто экспериментального подбора новых устойчивых металлических материалов и методов их защиты. Необходимо развивать комплексные научные исследования коррозионных явлений [Голубев, 2013].

Защиту от коррозии возможно предусматривать как непосредственно на стадии проектирования и изготовления машины, так и в процессе ее эксплуатации. На первых этапах важно произвести грамотный выбор материала детали, ее термической, химической или другой обработки, а также предусмотреть поверхностную защиту в виде краски или эмали. На стадии эксплуатации мы ограничены только видом и способом нанесения антикоррозионного покрытия [Шемякин и др., 2016].

Материалы и методика исследования. Представленный в работе обзор базируется на трудах отечественных и зарубежных исследователей в области методов защиты металлов и сплавов от коррозии, практики использования различных антикоррозионных покрытий (металлических, неметаллических, химических и альтернативных), а также области автоматизации нанесения антикоррозионных покрытий. Используются методы сбора и обработки информации. Для наглядного представления рассматриваемых в работе защитных покрытий представлены изображения их микроструктур, которые были получены с использованием лабораторного оборудования – светового оптического микроскопа Leica DMI 5000, оснащенного системой анализа изображений Thixomet.

Цель работы – провести обзор различных видов антикоррозионных покрытий, которые могут быть использованы для защиты несущих конструкций лесных машин от воздействия коррозии, а также выделить технологические особенности нанесения покрытий с учетом возможности автоматизации процесса в условиях ремонтных предприятий.

Результаты исследования. Классификация антикоррозионных покрытий достаточно объёмна и продолжает совершенствоваться. Наиболее распространённая схема представлена на рис. 1.



Рис. 1. Виды антикоррозионных покрытий
 Fig. 1. Types of anti-corrosion coatings

Рассмотрим наиболее популярные методы нанесения различных типов покрытий для повышения коррозионной стойкости металлических несущих конструкций лесных машин (рам и кузовных элементов).

Металлические антикоррозионные покрытия. Металлическими покрытиями называют искусственно созданные на поверхности защищаемого изделия слои металла с целью защиты от коррозии. Роль покрытия как средства защиты от коррозии сводится в основном к изоляции металла от внешней среды. Помимо защиты от коррозии, покрытия могут придать деталям лесных машин дополнительные полезные свойства, такие как твердость, износостойкость, а также декоративные качества. Существует множество методов нанесения металлических покрытий на поверхности деталей. К ним относятся гальваника, наплавка, напыление и др. [Гайдар, 2011].

Сравнивая представленные методы нанесения покрытий, с нашей точки зрения, для крупногабаритных деталей машин (таких как рама) наиболее предпочтительным является напыление, так как наплавки в основном применимы для тел вращения, а гальваника сложна, к тому же требует ванн большого размера и соблюдения ряда экологических норм.

Напыление имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами нанесения металлических покрытий, такие как простота и мобильность установок, возможность автоматизации процесса, низкая технологическая себестоимость нанесения покрытия и возможность создавать покрытия относительно большой толщины с заданными физико-механическими свойствами. Перспективным способом напыления стальных деталей является

холодное газодинамическое напыление (ХГН) порошковых композиционных материалов. При этом процессе происходит минимальное негативное воздействие на восстанавливаемую поверхность за счет щадящих температур (около 400°C). В качестве порошковых материалов могут выступать алюминий, цинк, медь, хром и другие металлы, а также их композиции. На рис. 2 представлена микроструктура покрытия алюминий-цинк, полученного методом ХГН. Светлая фаза на изображении является цинком, а темная – алюминием. Варьируя химическим составом и технологическими параметрами нанесения покрытия, возможно изменять его характеристики, придавая особые свойства деталям машин [Клинков, 2013; Баринов и др., 2024].

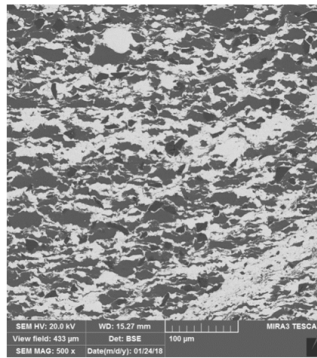


Рис. 2. Микроструктура покрытия алюминий-цинк
Fig. 2. Microstructure of aluminum-zinc coating

Неметаллические антикоррозионные покрытия. К неметаллическим покрытиям относятся краски, лаки, смолы, эмали, полимеры и многое другое (около 80% покрытий, применяемых в промышленности). Такие покрытия отличаются от металлических отсутствием электропроводности, что делает их неподверженными коррозии. Разрушение таких покрытий происходит механическим и химическим путем.

Как правило, такие покрытия наносятся слоем небольшой толщины (до 160 мкм) и защищают лишь от поверхностной коррозии. В процессе эксплуатации лесной техники покрытия повреждаются и отслаиваются при механическом воздействии и вибрациях. Агрессивная среда в этом случае начинает действовать на металлические элементы машины, вызывая очаги коррозии в местах повреждений покрытий и областей рядом с ними. Следует учитывать, что неметаллические покрытия обладают значительно

меньшей термостойкостью, чем металлические и при значительных знакопеременных перепадах температуры окружающей среды и отдельных прилегающих агрегатов машины (например, двигатель), начинают интенсивно разрушаться [Шифрин, Попова, 2023].

Помимо красок, лаков и эмалей, для защиты от коррозии применяют также неметаллические покрытия из резины, смолы и наиболее прогрессивных полимерных материалов. Полимеры отличаются высокой химической стойкостью к действию многих агрессивных сред и в некоторых случаях способны заменить лакокрасочное покрытие, так как могут быть применены в сочетании с декоративными пигментами.

Полимерные покрытия значительно более износостойки и представляют собой длинные цепочки мономеров (соединений), которые могут образовывать различные пространственные структуры.

Структура полимерного антикоррозийного покрытия, сформированная на основе нитрида кремния, представлена на рис. 3. Основным недостатком покрытий является высокая стоимость и более сложная по сравнению с красками технология нанесения [Buketov et al., 2018].

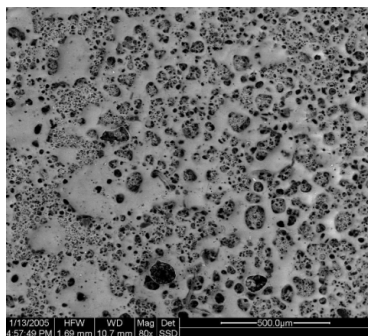


Рис. 3. Микроструктура полимерного покрытия
Fig. 3. Microstructure of the polymer coating

Химические антикоррозийные покрытия. К химической группе защитных антикоррозийных покрытий относят оксидные и фосфатные пленки, пассивирование и др. Оксидную пленку на стали можно получить электрохимическим окислением в электролитах, путем химической обработки в кислых или щелочных окислительных растворах, а также нагревом в атмосфере водяного пара. Наибольшее распространение в промышленности получили химические методы щелочного и паротермического оксидирования стали.

Паротермическое оксидирование производится в токе перегретого водяного пара при температуре 600°C. Образующаяся оксидная пленка состоит в основном из чистого магнетита Fe_3O_4 . Такие методы защиты называются еще грунтами и эффективны лишь в сочетании с лакокрасочным покрытием, которое необходимо наносить поверх [Закиров и др., 2006; Исмаев и др., 2020; Kapustin et al., 2023].

Фосфатное покрытие образуется путем химической реакции между фосфатными солями и поверхностью металла. Формируется тонкий слой кристаллического фосфата железа, цинка или марганца, который защищает металл от коррозии. Метод часто используется для стальных изделий перед покраской или нанесением других защитных слоев. Пример такого покрытия представлен на рис. 4.

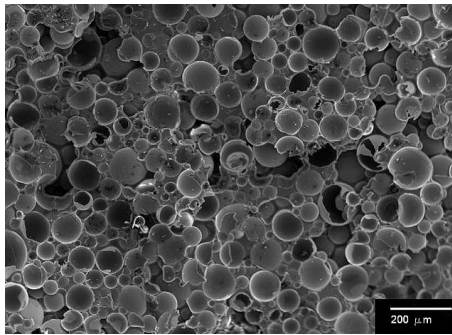


Рис. 4. Фосфатные покрытия
Fig. 4. Phosphate coatings

Пассивирование является процессом формирования тонкой пассивной пленки на поверхности металла, которая предотвращает дальнейшее окисление. Например, нержавеющая сталь защищена естественным слоем оксида хрома, образующимся при контакте с кислородом воздуха [Агабеков, 2015].

Химические антикоррозионные покрытия имеют значительно меньшую толщину, чем неметаллические и тем более металлические. В некоторых случаях толщина покрытия ограничена технологическими возможностями метода. Например, при анодировании алюминия максимальная толщина оксидного слоя составляет несколько микрон, что может оказаться недостаточным для обеспечения длительной защиты в особо агрессивных условиях. Процесс нанесения достаточно сложен технологически, часто токсичен и дорог. Вид покрытий нашел большее применение в таких сферах, как пищевая и химическая промышленность.

Альтернативные антикоррозийные покрытия. Альтернативные методы нанесения антикоррозийных покрытий на текущий момент не нашли широкого применения в серийном и массовом машиностроительном производстве. Это связано в первую очередь с низкой эффективностью методов по сравнению с классическими технологиями, а также ограниченностью применения и недостаточной научной обоснованностью. К таким покрытиям можно отнести биологическую обработку или использование бактерий, производящих антикоррозийные вещества, создание биополимерных покрытий. К этой группе относятся нанотехнологии, хорошо себя зарекомендовавшие в приборостроении и медицине, но не подходящие в силу объема производства для среднесерийного машиностроения.

Альтернативными технологиями защитных покрытий можно назвать подход, основанный на использовании материалов, способных восстанавливать свою структуру после повреждений. Например, самовосстанавливающиеся покрытия могут содержать микрокапсулы с антикоррозийным составом, который высвобождается при появлении царапины или трещины. Пример такого материала и процесс самовосстановления трещины представлен на рис. 5. Практика показывает, что количество восстановлений не бесконечно, и затягивание трещин и повреждений возможно только на микроуровне (восстановление эстетических характеристик лака и краски), что неактуально для лесных машин [Скивко и др., 2019].

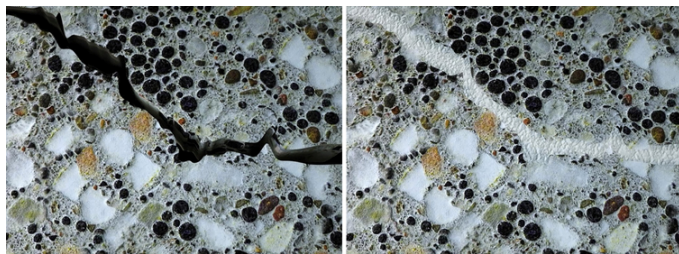


Рис. 5. Структура самовосстанавливающихся покрытий
Fig. 5. Structure of self-healing coatings

Интересным, но малоизученным методом образования покрытий является метод катодной защиты, основанный на использовании электрического тока для изменения потенциала металлической поверхности таким образом, чтобы она стала менее подверженной коррозии [Ryndin et al., 2018].

Альтернативным методом защиты от коррозии является нанесение полифторалкиловых эфиров (PFAE), представляющих собой класс химиче-

ских соединений, которые активно используются в различных отраслях промышленности благодаря своим уникальным свойствам. Они обладают высокой химической стойкостью и термостойкостью, что делает их особенно полезными в условиях агрессивных сред. К тому же эти вещества относятся к так называемой «зеленой химии», так как производятся полностью из растительного сырья.

Трициклические дитерпеновые кислоты ряда абиетана составляют значительную часть канифоли – побочного продукта ЦБП. Огромные объемы образования канифоли при переработке древесины представляют перспективную сырьевую базу. Получение таких эфиров возможно осуществить непосредственно из живицы или канифоли по реакции диенового синтеза с N-замещенными малеимидами. Эти материалы дешевы в производстве, безопасны, экологичны, однако, как и большинство других альтернативных технологий, мало изучены, что затрудняет промышленное применение в машиностроении [Попова и др., 2019].

Выбор метода нанесения защитного антикоррозийного покрытия является сложной задачей для машиностроительного производства. Необходимо учитывать специфику эксплуатации машины, технологические особенности производства, экологические нормы и экономическую целесообразность принятых решений. По мнению авторов работы, для несущих элементов и некоторых кузовных деталей лесных машин целесообразно применение сочетания металлического покрытия, нанесенного методом холодного газодинамического напыления, и классического лакокрасочного покрытия (рис. 6).

Важным технологическим параметром при нанесении покрытия является шероховатость поверхности. Необходимо обеспечить подготовку основного материала (стали) с шероховатостью Rz1 для нанесения холодного газодинамического покрытия и обеспечить шероховатость Rz2 для нанесения на покрытие лакокрасочного материала. При этом обе рассматриваемые шероховатости будут влиять в значительной мере на адгезию слоев материалов (τ_1 и τ_2).

Определение оптимальных параметров нанесения, толщины и материалов для металлического и лакокрасочного покрытия являются отдельными задачами для продолжения исследования. Инновации в этой области дают огромные перспективы для будущего, открывая новые границы применения и повышения эффективности защиты от коррозии. Комбинированный подход к выбору технологий, основанный на анализе каждого конкретного случая, приведет к обеспечению надежной защиты материалов и уменьшит риски, связанные с коррозией.

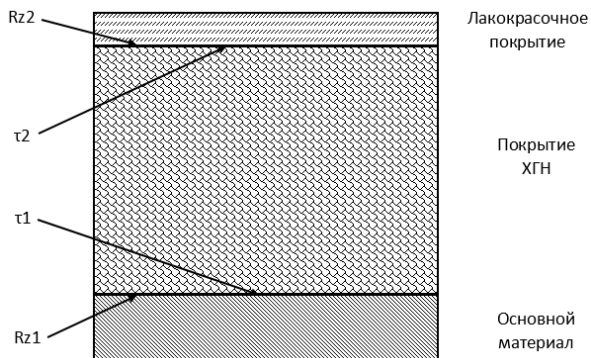


Рис. 6. Схема поверхностей, образованных сочетанием методов холодного газодинамического напыления и классического лакокрасочного покрытия

Fig. 6. Diagram of surfaces formed by a combination of cold gas-dynamic spraying and classic paint coating methods

Как показывает производственная практика нанесения защитных покрытий, степень автоматизации технологического процесса оказывает существенное влияние на качество наносимого слоя. Автоматизация позволяет минимизировать человеческий фактор, исключив вероятность ошибок оператора и повысив точность соблюдения технологических режимов. Современные средства автоматизации обеспечивают стабильное нанесение заданного слоя покрытия, равномерность его распределения по поверхности подложки, а также соблюдение специальных технологических параметров, таких как расстояние от сопла установки до восстанавливаемой поверхности, угол наклона сопла и другие [Иванов, Шифрин, 2024].

По современной классификации существует шесть степеней автоматизации машиностроительного производства. На рис. 7 представлена иерархия подходов применительно к операции нанесения покрытия.

Рассмотрим более подробно предложенную классификацию.

Ручные работы – это самый низкий уровень автоматизации, точнее ее полное отсутствие, при котором операции выполняются вручную человеком. Используется редко и лишь там, где невозможно применить механизмы либо технологически оправдано применять ручной труд. При нанесении защитных покрытий ручные работы могут применяться при использовании неметаллических, химических или альтернативных методов обработки поверхности детали (согласно классификации, приведенной на рис. 1).



Рис. 7. Степени автоматизации нанесения антикоррозионных покрытий
 Fig. 7. Degrees of automation of anti-corrosion coating application

Механизированные работы являются второй ступенью в иерархии автоматизации. Отдельные этапы производственного цикла выполняются машинами, однако контроль над процессом остается за оператором. Человек осуществляет управление оборудованием, закрепление заготовок, настройку параметров процесса и другие вспомогательные операции. Стоит отметить, что в ремонтно-восстановительной практике, которая в основном относится к единичному и мелкосерийному производству, механизированные работы занимают существенную долю общей трудоемкости.

Частично автоматизированные процессы предполагают выполнение основных рабочих циклов машиной самостоятельно, тогда как человек занимается подготовкой оборудования, контролем качества, заменой инструмента и устранением неисправностей. Такой вид автоматизации характерен для серийного производства и является, с нашей точки зрения, рациональным для оборудования и машин лесной отрасли. Явными преимуществами частичной автоматизации будут являться значительно более высокое качество покрытий (по сравнению с ручным трудом и механизацией) при относительно невысоких затратах на оборудование и оснастку [Соколов, 2009].

При полной автоматизации весь технологический цикл нанесения защитных покрытий осуществляется практически без вмешательства человека. Операторы занимаются исключительно обслуживанием и мониторингом работы комплекса. Подход осуществим лишь в условиях крупносерийного или массового производства, нехарактерных для лесного машиностроения. Применение полной автоматизации нанесения защитных покрытий возможно в условиях машиностроительного завода, производя-

шего лесную технику или ее элементы. На ремонтном заводе нецелесообразно применение полной автоматизации из-за нерегулярности восстановительных работ, широкой номенклатуры восстанавливаемых изделий и высокой стоимости оборудования.

Интегрированные автоматизированные системы управления производством (АСУП) являются пятой ступенью иерархии автоматизации процессов. Интеграция всех производственных участков предприятия в единую систему позволяет централизованно управлять процессами, оптимизировать загрузку оборудования, планировать производство и оперативно реагировать на изменения спроса. Системы применимы на глобальных предприятиях в крупных корпорациях. Закупка, контроль качества сырья, процессы нанесения и последующего контроля параметров покрытий могли бы осуществляться полностью без участия человека, однако для лесного машиностроения такая степень автоматизации на современном этапе развития недоступна [Кочковская, Сердюк, 2019].

Самый высокий уровень автоматизации (цифровое производство) включает внедрение цифровых технологий. Предприятия переходят к цифровой модели проектирования, моделирования и мониторинга всего жизненного цикла продукта. Широко используются технологии виртуальной реальности, дополненной реальности, «большие данные» и др. Однако, как и говорилось выше, указанный уровень автоматизации является перспективным, но недоступным для лесного машиностроения на текущий момент времени [Муравьев, Шифрин, 2024].

Заключение. Подводя итоги, можно сделать следующие выводы относительно технологических особенностей нанесения антикоррозийных покрытий на несущие элементы конструкции лесных машин.

1. Для несущих элементов и некоторых кузовных деталей лесных машин целесообразно применение сочетания металлического покрытия, нанесенного методом холодного газодинамического напыления, и классического лакокрасочного покрытия.

2. Подготовка поверхности под нанесение покрытия является важной технологической задачей, обеспечение требуемых параметров шероховатости подложки и шероховатости нанесенного металлического слоя для дальнейшего нанесения лакокрасочного покрытия окажут существенное влияние на качество защитных свойств.

3. Частичная автоматизация является наиболее рациональным решением для процесса нанесения защитного покрытия методом холодного газодинамического напыления в условиях ремонтных предприятий лесной

отрасли. Однако, при изготовлении деталей в условиях машиностроительного предприятия может быть применен более высокий уровень автоматизации.

Вклад авторов. Трубников В.В. – постановка цели и задач исследования, сбор и обработка информации, получение микроструктур покрытий (50%); Марков В.А. – сбор и обработка информации, получение микроструктур покрытий (20%); Трофимов А.В. – сбор и обработка информации (10%); Хахина А.М. – сбор и обработка информации (10%); Зверев И.А. – общее руководство работой (10%).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Агабеков В.Е. Наноструктурированные материалы различного функционального назначения // Наноструктурные материалы: Беларусь-Россия-Украина (НАНО-2014): сб. пленар. докл. IV Межд. науч. конф. / гл. ред. П.А. Витязь. Минск, 2015. С. 145-153.

Баринов Д.В., Марков В.А., Трубников В.В., Шифрин Б.М. Коррозионные свойства газодинамических покрытий // Фундаментальные основы механики. 2024. № 14. С. 129-133. DOI: 10.26160/2542-0127-2024-14-129-133.

Быкова Е.В. Оборудование для нанесения перфторированных защитных покрытий с целью улучшения сохраняемости сельскохозяйственной техники // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 3. С. 58–64.

Гайдар С.М. Теория и практика создания ингибиторов коррозии для консервации сельскохозяйственной техники: монография. М.: Росинформгрупп, 2011. 304 с.

Голубев М.И. Новые материалы для защиты лесных машин от коррозии // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2013. №1(93). С.40–41.

Закиров Д.М., Зоннтаг Б., Добровольскис П., Алин Ш., Гоуфек И. Пассивирование цинковых покрытий в растворах на основе Cr(III) во вращающихся установках // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 4(16). С. 108-110.

Иванов Н.А., Шифрин Б.М. Автоматизация дефектоскопии путем использования компьютерного зрения и искусственного интеллекта // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: мат. XXII Межд. науч.-тех. конф. Вологда, 2024. С. 154-157.

Исаев М.К., Гончарова Л.А., Капустин Ю.И., Колесников А.В. Физико-химические свойства оксидных покрытий на основе рутения титана и редкоземельных элементов при допировании углеродными наноматериалами // Стекло и керамика. 2020. № 3. С. 3-9.

Клинков С.В. Управление эрозионно-адгезионным переходом при ХГН: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2013. 299 с.

Кочковская С.С., Сердюк А.И. Архитектура и программная реализация подсистемы управления производственными ресурсами в АСУП сталеплавильного производства // Автоматизация в промышленности. 2019. № 8. С. 43-46.

Различные аспекты применения химии в повседневной жизни: тез. докл. межфак. студ. науч.-тех. конф. СПб.: СПбГТУРП, 2014. 52 с.

Муравьев А.Г., Шифрин Б.М. Цифровой двойник: история создания и современная концепция // Сб. ст. по мат. науч.-тех. конф. института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 г. СПб., 2024. С. 390-395.

Олиференко Г.Л., Иванкин А.Н., Устюгов А.В., Зарубина А.Н. Проблема коррозии технологического оборудования на предприятиях по химической переработке древесины (обзор) // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2021. Т. 25. № 3. С. 142-151.

Попова Л.М., Иванова В.А., Вершилов С.В. Синтез N-фенилимидов полифторалкиловых эфиров малеопимаровой кислоты // Химия растительного сырья. 2019. № 2. С. 205-211.

Скирко П.В., Макаров А.В., Силаева А.А., Квасников М.Ю., Ко Зо А. Методики получения микрокапсул для применения в лакокрасочных системах // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33, № 6(216). С. 88-90.

Соколов Ю.А. Автоматизация процесса нанесения металлических и керамических порошковых материалов на поверхности изделий методом плазменного напыления // Промышленные АСУ и контроллеры. 2009. № 11. С. 14-16.

Шемякин А.В., Терентьев В.В., Морозова Н.М., Кожин С.А., Кирилин А.В. Применение метода катодной протекторной защиты для снижения потерь металла при хранении сельскохозяйственной техники // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2016. № 4(32). С. 93-97.

Шифрин Б.М., Попова Д.А. Разработка IDEF-модели процесса контроля качества // Сб. ст. по мат. науч.-тех. конф. института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 г. СПб., 2023. С. 350-354.

Buketov A.V., Brailo M.V., Stukhlyak D.P., Yakushchenko S.V., Sapronov O.O., Cherniavskiy V.V., Husiev V.M., Dmitriev D.A., Yatsyuk V.M., Bezbakh O.M., Negrutsa R.Yu. Optimization of components in development of polymeric coatings for restoration of transport vehicles // Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series. 2018. No. 4(92). P. 119-131. DOI: 10.31489/2018M4/119-131.

Kapustin S.N., Volkov A.S., Tsykareva Yu.V. Icing and chemical pollution sensor based on carbon nanoparticles-based superhydrophobic coating // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16, no. S3.2. P. 239-243. DOI: 10.18721/JPM.163.241.

Ryndin V.V., Abdullina G.G., Abdullin A.T. Analysis of passive methods of protection from corrosion of main oil and gas pipelines // Science and Technology of Kazakhstan. 2018. No. 2. P. 91-100.

References

Agabekov V.E. Nanostrukturirovannyye materialy razlichnogo funktsionalnogo naznacheniya. *Nanostrukturnyye materialy: Belarus-Rossiya-Ukraina (NANO-2014): collection of plenary reports of IV int. sci. conf. / main ed. P.A. Vityaz. Minsk, 2015, pp. 145-153. (In Russ.)*

Barinov D.V., Markov V.A., Trubnikov V.V., Shifrin B.M. Korroziionnyye svoystva gazodinamicheskikh pokrytiy. *Fundamentalnyye osnovy mekhaniki*, 2024, no. 14, pp. 129-133. DOI: 10.26160/2542-0127-2024-14-129-133. (In Russ.)

Buketov A.V., Brailo M.V., Stukhlyak D.P., Yakushchenko S.V., Sapronov O.O., Cherniavskiy V.V., Husiev V.M., Dmitriev D.A., Yatsyuk V.M., Bezbakh O.M., Negrutsa R.Yu. Optimization of components in development of polymeric coatings for restoration of transport vehicles. *Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series*, 2018, no. 4(92), pp. 119-131. DOI: 10.31489/2018M4/119-131.

Bykova, E.V. Oborudovaniye dlya naneseniya perfortirovannykh zashchitnykh pokrytiy s tselyu uluchsheniya sokhranyaemosti selskokhozyaystvennoy tekhniki. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal*, 2018, no. 3, pp. 58–64. (In Russ.)

Gaydar S.M. Teoriya i praktika sozdaniya ingibitorov korrozii dlya konservatsii selskokhozyaystvennoy tekhniki: monograph. Moscow: Rosinformagrotekh, 2011. 304 p. (In Russ.)

Golubev M.I. Novyye materialy dlya zashchity lesnykh mashin ot korrozii. *Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik*, 2013, no. 1(93), pp. 40–41. (In Russ.)

Isaev M.K., Goncharova L.A., Kapustin Yu.I., Kolesnikov A.V. Fiziko-khimicheskie svoystva oksidnykh pokrytiy na osnove ruteniya titana i redkozemelnykh elementov pri dopirovaniy uglerodnymi nanomaterialami. *Steklo i keramika*, 2020, no. 3, pp. 3-9. (In Russ.)

Ivanov N.A., Shifrin B.M. Avtomatizatsiya defektoskopii putem ispolzovaniya kompyuternogo zreniya i iskusstvennogo intellekta. *Aktualnyye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: mat. of XXII int. sci.-tech. conf. nauchno-texnicheskoy konferentsii. Vologda, 2024, pp. 154-157. (In Russ.)*

Kapustin S.N., Volkov A.S., Tsykareva Yu.V. Icing and chemical pollution sensor based on carbon nanoparticles-based superhydrophobic coating. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2023, vol. 16, no. S3.2, pp. 239-243. DOI: 10.18721/JPM.163.241.

Klinkov S. V. Upravlenie erozionno-adezionnym perekhodom pri KhGN. Diss. ... Doct. Phys.-Math. Sci. Novosibirsk, 2013. 299 p. (In Russ.)

Kochkovskaya S.S., Serdyuk A.I. Arkhitektura i programmaya realizatsiya podsistemy upravleniya proizvodstvennymi resursami v ASUP staleplavilnogo proizvodstva. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2019, no. 8, pp. 43-46. (In Russ.)

Muravyev A.G., Shifrin B.M. Tsifrovoy dvoynik: istoriya sozdaniya i sovremennaya kontseptsiya. *Collection of papers based on mat. of sci.-tech. conf. of*

Technological Vehicles and Timber Transport Institute by results of scientific research works in 2023. St. Petersburg, 2024, pp. 390-395. (In Russ.)

Oliferenko G.L., Ivankov A.N., Ustygov A.V., Zarubina A.N. Problema korrozii tekhnologicheskogo oborudovaniya na predpriyatiyakh po khimicheskoy pererabotke drevesiny (obzor). Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 142–151. (In Russ.)

Popova L.M., Ivanova V.A., Vershilov S.V. Sintez N-fenilimidov polifloralkilovykh efirov maleopimarovoy kisloty. Khimiya rastitel'nogo syrya, 2019, no. 2, pp. 205-211. (In Russ.)

Razlichnye aspekty primeneniya khimii v povsednevnoy zhizni: thes. of reports in interfac. stud. sci.-tech. conf. St. Petersburg, 2014. 52 p. (In Russ.)

Ryndin V.V., Abdullina G.G., Abdullin A.T. Analysis of passive methods of protection from corrosion of main oil and gas pipelines. Science and Technology of Kazakhstan, 2018, no. 2, pp. 91-100.

Shemyakin A.V., Terentyev V.V., Morozova N.M., Kozhin S.A., Kirilin A.V. Primenenie metoda katodnoy protektonnoy zashchity dlya snizheniya poter metalla pri khraneniі sel'skokhozyaystvennoy tekhniki. Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva, 2016, no. 4(32), pp. 93–97. (In Russ.)

Shifrin B.M., Popova D.A. Razrabotka IDEF-modeli protsessa kontrolya kachestva. Collection of papers based on mat. of sci.-tech. conf. of Technological Vehicles and Timber Transport Institute by results of scientific research works in 2022. 2023, pp. 350-354. (In Russ.)

Skivko P.V., Makarov A.V., Silaeva A.A., Kvasnikov M.Yu., Ko Zo A. Metodiki polucheniya mikrokapsul dlya primeneniya v lakokrasochnykh sistemakh. Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii, 2019, vol. 33, no. 6(216), pp. 88-90. (In Russ.)

Sokolov Yu.A. Avtomatizatsiya protsessa naneseniya metallicheskih i keramicheskikh poroshkovykh materialov na poverkhnosti izdeliy metodom plazmennogo napyleniya. Promyshlennyye ASU i kontroly, 2009, no. 11, pp. 14-16. (In Russ.)

Zakirov D.M., Zonntag B., Dobrovolskis P., Alin S., Goufek I. Passivirovanie tsinkovykh pokrytiy v rastvorakh na osnove Cr(III) vo vrashchayushchikhsya ustanovkakh. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova, 2006, no. 4(16), pp. 108-110. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 16.02.2025

Трубников В.В., Марков В.А., Трофимов А.В., Хахина А.М., Зверев И.А. Анализ антикоррозионных покрытий для несущих элементов лесных машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 480–497. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.480-497

В работе представлен обзор, посвященный проблематике использования антикоррозионных покрытий для защиты несущих конструкций лесных машин от

коррозии. Представленный материал базируется на исследованиях отечественных и зарубежных ученых в области методов защиты металлов и сплавов от коррозии, практики использования различных антикоррозионных покрытий, а также области автоматизации их нанесения. Цель работы – провести обзор различных видов антикоррозионных покрытий, которые могут быть использованы для защиты несущих конструкций лесных машин от воздействия коррозии, а также выделить технологические особенности нанесения покрытий с учетом возможности автоматизации процесса в условиях ремонтных предприятий. Представлена классификация видов антикоррозионных покрытий. В статье рассматриваются металлические, неметаллические, химические и альтернативные защитные покрытия, приводятся технологические особенности их использования и возможность применения в лесном машиностроении. Приводятся изображения микроструктур наиболее характерных представителей различных видов антикоррозионных покрытий. Изображения микроструктур получены с использованием светового оптического микроскопа Leica DMI 5000, оснащенного системой анализа изображений Thixomet. Отдельное внимание в статье уделено вопросу автоматизации нанесения антикоррозионных покрытий. Представлена классификационная схема степеней автоматизации нанесения защитных покрытий и рассмотрены ее уровни с учетом возможности внедрения на предприятиях лесного машиностроения. Исходя из представленного в работе материала, авторы приходят к выводу, что для несущих элементов и некоторых кузовных деталей лесных машин целесообразно применение сочетания металлического покрытия, нанесенного методом холодного газодинамического напыления, и классического лакокрасочного покрытия. Частичная автоматизация является наиболее рациональным решением для процесса нанесения защитного покрытия методом холодного газодинамического напыления в условиях ремонтных предприятий лесной отрасли.

Ключевые слова: коррозия, антикоррозионные покрытия, микроструктура, автоматизация, нанесение защитных покрытий, лесные машины.

Trubnikov V.V., Markov V.A., Trofimov A.V., Nahina A.M., Zverev I.A. Analysis of anti-corrosion coatings for load-bearing elements of forestry machines. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 480–497 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.480-497

This paper presents a review of the application of anti-corrosion coatings to protect forestry machinery load-bearing structures from corrosion. The material presented is based on research by domestic and international scientists in the field of metal and alloy corrosion protection methods, the application of various anti-corrosion coatings, and the automation of their application. The purpose of this paper is to review various types of anti-corrosion coatings that can be used to protect forestry machinery load-bearing

structures from corrosion, as well as to highlight the technological features of coating application, taking into account the possibility of process automation in repair facilities. A classification of anti-corrosion coating types is presented. The article considers metallic, non-metallic, chemical, and alternative protective coatings, discusses the technological features of their use, and discusses the possibility of their application in forestry engineering. Images of the microstructures of the most typical representatives of various types of anti-corrosion coatings are presented. The images of the microstructures were obtained using a Leica DMI 5000 light optical microscope equipped with a Thixomet image analysis system. Special attention is paid to the automation of anti-corrosion coating application. A classification scheme for the degree of automation in protective coating application is presented and its levels are discussed, taking into account the feasibility of implementation at forestry machinery manufacturing facilities. Based on the presented material, it is concluded that for load-bearing elements and some body parts of forestry machinery, a combination of a metallic coating applied by cold gas-dynamic spraying and a traditional paint coating is advisable. Partial automation is the most rational solution for applying protective coatings by cold gas-dynamic spraying in forestry repair facilities.

Key words: corrosion, anti-corrosion coatings, microstructure, automation, application of protective coatings, forestry machines.

ТРУБНИКОВ Виктор Валерьевич – соискатель Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. SPIN-код: 3756-3397.

191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия.

TRUBNIKOV Viktor V. – PhD candidate of the Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 3756-3397.

191186. Bolshaya Morskaya str. 18. St. Petersburg. Russia.

МАРКОВ Виктор Александрович – доцент кафедры машин автоматизированных систем Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук. SPIN-код: 1503-7932.

191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mactor85@mail.ru

MARKOV Viktor A. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Machines and Automated Systems of the St.Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 1503-7932.

191186. Bolshaya Morskaya st. 18. St. Petersburg. Russia. E-mail: mactor85@mail.ru

ТРОФИМОВ Александр Викторович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 8933-0230.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: agregat9@yandex.ru

TROFIMOV Aleksandr V. – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8933-0230.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: agregat9@yandex.ru

ХАХИНА Анна Михайловна – профессор Высшей школы программной инженерии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор технических наук, доцент. SPIN-код: 9541-7908.

195251, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: hahina_am@spbstu.ru

НАНИНА Анна М. – DSc (Technical), Professor at the Higher School of Software Engineering at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Associate Professor. SPIN-code: 9541-7908.

195251. Politekhnikeskaya str. 29. Let. B. St. Petersburg. Russia. E-mail: hahina_am@spbstu.ru

ЗВЕРЕВ Игорь Андреевич – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 1126-2121. ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: igorzv1997@gmail.com

ZVEREV Igor A. – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1126-2121. ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: igorzv1997@gmail.com