

На правах рукописи

Анакина Дарья Анатольевна



**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОЛИМЕРНОГО
КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ
ТРУБ ТЕПЛОСЕТЕЙ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Пряхин Евгений Иванович

Официальные оппоненты:

Бреки Александр Джалюльевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», международный научно-образовательный центр «BaltTribology-Polytechnic», профессор.

Лишевич Игорь Валерьевич

кандидат технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», научно-производственный комплекс №11, начальник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Защита диссертации состоится **25 сентября 2026 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1163.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru. -

Автореферат разослан 24 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Большие города имеют сильно развитую подземную систему водоснабжения. Трубы холодного водоснабжения выполняются из полимера, а трубы горячего – из стали, так как она лучше выдерживает высокую температуру теплоносителя (до 150 °С). Зачастую, прокладка труб осуществляется бесканальным методом, что ведет к их постоянному контакту с грунтом.

Исследования коррозионных процессов для российских городских теплосетей показали, что суммарная доля повреждений от внешней и внутренней коррозии достигает около 60% от общего количества повреждений теплосети. Если сюда же отнести разрывы трубы от сварных дефектов, которые усугубляются коррозией, то процент повреждений стремится к 80%.

Коррозионностойкое покрытие для стальных труб теплосетей должно предотвратить воздействие наиболее опасных факторов, оказывающих наибольшее влияние на сохранность трубопровода, а именно: почвенной коррозии, растрескивания под напряжением и воздействие блуждающих токов.

Пассивная защита внешней поверхности стальных труб теплосетей заключается в применении специальных покрытий. Для систем теплосетей активно применяют трубы в ППУ (пенополиуретановой) изоляции, которая часто теряет свою герметичность из-за особенностей установки и эксплуатации бесканальной прокладки, поэтому требуется дополнительное нанесение покрытия между стальной трубой и изоляцией.

Одним из наиболее опасных является процесс развития коррозии под воздействием блуждающих токов. Источником блуждающих токов в городской среде являются трамвайные пути (600 В), железнодорожные полотна (3000-4000 В), подземный метрополитен (800 В). Скорость процесса коррозии определяется количеством электричества, протекающего в трубопроводе, и зависит от электросопротивления грунта.

Полностью исключить влияние блуждающих токов путем применения активных методов защиты практически невозможно, поэтому важно грамотно осуществлять пассивную защиту труб за

счет применения покрытий, исключающих возможность протекания электрической коррозии. Представляется, что наилучшим вариантом покрытий будет комбинация из компонентов, не проводящих электрический ток.

В данном исследовании было решено исключить из состава покрытия любые металлические элементы и подробно изучить применение разных комбинаций полимерных не проводящих материалов. Учитывая особенности условий эксплуатации трубопроводов (температура, щелочно-кислотность среды, токи, деформация), в данной работе было решено рассмотреть покрытия на основе оксидных и полиуретановых эмалей.

Анализ показал, что важную роль при образовании локальных отслоений покрытия на трубах играет качество подготовки поверхности перед нанесением покрытия. При изготовлении труб на производстве поверхность очищают с помощью струйных методов обработки, при этом она имеет хаотично ориентированные «пики» и «впадины», которые приводят к снижению адгезионного соединения. Поэтому, для подготовки трубы предложено использовать лазерную очистку поверхности. Она позволяет управлять процессом структурообразования в поверхностном слое и создавать наилучшие условия для обеспечения высокой адгезии покрытия с поверхностью металла.

Кроме того, для обеспечения лучшего соединения защитного покрытия с металлической поверхностью решено было оценить возможность применения промежуточных покрытий на основе фосфатов.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами состояния трубопроводов и воздействия на них окружающей среды занимались Москалев И.Л., Литвак В.В., Lopes I.M.F., Побережный Л.Я., Рузнич Е.Н., Киселев В.Г. и др. Оценкой различных факторов, таких как биологическое воздействие занимались Васим, Шаиб Ш. и др., воздействие природной воды – Побережный Л.Я., Звягинцев А.В., скорости коррозии – Брылов И.Ф. Шлычков Д.И.

Технологии позволяют получать прочные противокоррозионные покрытия различного состава, но ввиду

различных факторов на этапе производства, монтажа и эксплуатации, фактический срок службы существующих покрытий и их комбинаций значительно меньше расчетного.

В области покрытий материалов внимание уделяется не только качеству самого покрытия, т.е. модификации его состава (Kim J.G., Galevskiy G.V., Feng Y.), но и его адгезионным свойствам (Джалилов А.Т.). Тем не менее, в промышленности появляется все больше новых материалов, которые ещё не нашли своего применения в области коррозионной защиты.

Вопросами предварительной подготовки поверхности перед нанесением различных полимерных покрытий занимались такие отечественные и зарубежные учёные, как Федосов С.А., Прокопчук Н.Р., Павлычева Е.А., Надиров К.С., Долгалева С.Г., Сонг Дж., Вейко В.П., Дожделев А.М. и другие. Научные труды отечественных и зарубежных учёных во многом способствовали повышению качества адгезионного сцепления покрытий. Однако, для повышения адгезии к трубопроводу в данный момент выполняют стандартными методами обработки – дробеструйной и пескоструйной, которые имеют ряд недостатков.

Объект исследования

Эксплуатационная стойкость теплосетей в условиях подземного залегания трубопроводов и наличия больших блуждающих токов.

Предмет исследования

Технология получения основных и промежуточных коррозионностойких покрытий трубопроводов городских теплосетей и подготовки поверхности труб перед нанесением покрытий.

Цель работы – Разработка технологии формирования защитного покрытия, обеспечивающей повышение адгезионной прочности между покрытием и поверхностью стальной трубы за счет лазерной обработки, и увеличение коррозионной стойкости за счет применения комбинации эпоксидно-полиуретановых эмалей.

Идея заключается в применении лазерной технологии для подготовки поверхности труб перед нанесением покрытия и использовании комплексного полимерного эпоксидно-полиуретанового покрытия.

Задачи исследования:

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований об условиях эксплуатации труб горячего водоснабжения бесканальной прокладки в грунте в городской среде.

2. Экспериментальная оценка методов подготовки поверхности труб для обеспечения высокой стойкости и эффективности нового композиционного покрытия.

3. Оценка эффективности защиты труб горячего водоснабжения от коррозии с использованием известных покрытий.

4. Разработка технологического регламента для эффективного применения новых композиций промежуточных и основных составов покрытий.

5. Экспериментальная проверка опытных образцов защитных покрытий для труб теплосетей на стендовых испытаниях.

6. Разработка рекомендаций по условиям применения новой композиции промежуточных и основных покрытий.

Научная новизна работы:

1. Установлена степень влияния параметров лазера обработки и формируемой микроструктуры металлической поверхности стальной пластины – имитатора трубы, на коэффициент прироста площади полезной поверхности после предварительной лазерной обработки.

2. Определен способ лазерной обработки, позволяющий сформировать наиболее развитый микрорельеф на стальной поверхности.

3. Выявлена эффективность композиции двух полимерных покрытий на основе полиуретановой и эпоксидной эмалей в качестве защитного покрытия под изоляцию для стальных труб горячего водоснабжения.

Соответствие паспорту специальности:

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение по пунктам:

3. Разработка научных основ выбора металлических, неметаллических, гетерогенных и композиционных материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям

изготовления и эксплуатации деталей, изделий, машин и конструкций.

10. Разработка способов повышения коррозионной стойкости металлических и неметаллических материалов в различных условиях эксплуатации.

11. Разработка функциональных покрытий различного назначения и методов управления их свойствами и качеством.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Показано, что применение лазерной обработки поверхности труб для теплосетей позволяет получать упорядоченный, равномерный по глубине на протяжении всей площади обработки поверхности микрорельеф, повышающий площадь полезной поверхности на 72% относительно исходного состояния.

2. На основании полученных результатов показана перспективность применения лазерной обработки по сравнению с пескоструйной (дробеструйной) обработкой поверхности труб горячего водоснабжения перед нанесением на них основного защитного покрытия.

3. Принятая в работе технология нанесения покрытия на стальную поверхность, основанная на предварительной лазерной обработке по выбранным режимам и послойном нанесении эпоксидной и полиуретановой эмалей, позволила получить адгезионно прочное покрытие с показателями на 15% выше относительно применяемых методов обработки.

4. Разработана технология, позволяющая получить комбинированное коррозионностойкое покрытие на основе эпоксидной и полиуретановой эмалей, обладающее высокими адгезионными, коррозионностойкими свойствами, ударопрочностью и удельным объемным электрическим сопротивлением, что позволяет считать этот вариант покрытия перспективным и рекомендовать его к внедрению.

5. Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению на предприятии ООО «ВИАСМ Плюс» в виде рекомендаций для предварительной подготовки стальной поверхности трубопровода перед нанесением полимерных

лакокрасочных покрытий, что подтверждено актом о внедрении результатов диссертации от 30.04.2026.

6. Результаты диссертационной работы подтверждены свидетельством о государственной регистрации базы данных №2022620320. База данных по зависимости комплекса свойств конструкционных и инструментальных сталей от различных режимов закалки и отпуска и заявкой на патент №2026113933 Способ формирования рельефа внешней поверхности трубопровода для повышения адгезионных характеристик коррозионностойких полимерных покрытий.

Методология и методы исследования:

Методология обоснована на достаточном количестве теоретических исследований и анализе научных трудов об эксплуатации трубопроводов теплосетей, методов повышения качества защитных покрытий и технологий их формирования.

Выбор технологии, материалов и области исследования производился на основе анализа российской и зарубежной научной литературы, и исследований в области защитных коррозионностойких покрытий для трубопровода теплосетей.

Исследование включает в себя моделирование и расчет параметров получаемого при обработке лазером микрорельефа и установление зависимости рельефа от параметров лазера. Эксперименты проводились на высокоточном и поверенном оборудовании. Анализ микроструктур проводился на металлографическом микроскопе Leica DMIL HC, профилометре HOMMEL TESTER T1000 и микротвердоме PMT-3M.

Методы экспериментальных исследований разрабатывались на основе существующих нормативных документов в области покрытий трубопроводов тепловых сетей и смежных областей. Оценка свойств полученных покрытий производилась на таком оборудовании, как Elcometer 108 Hydraulic Adhesion Tester, «Константа У-1А» и «ИПУ», приборе «ПРОМТ ИЗГИБ», на приборе «Константа-ШЭ», на дефектоскопе elcometer 270 и elcometer 236 на основе СП 124.13330.2012 Свод правил. Тепловые сети.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение лазерной обработки внешней поверхности стальных труб теплосетей взамен абразивной обеспечивает формирование упорядоченного, равномерного на протяжении всей площади обработки микрорельефа, повышающего площадь полезной поверхности на 72% и позволяющего получить повышение адгезионной прочности наносимого защитного покрытия на 15% выше применяемых методов струйной обработки.

2. Применение комбинированного эпоксидно-полиуретанового покрытия и предварительной лазерной обработки поверхности трубы, позволили получить покрытие с параметрами, превышающими: в 6 раз требования по адгезии, на 20% прочность на удар, в десять раз прочность на изгиб, с удельным объемным электросопротивлением более $1 \cdot 10^8$ Ом*см, прошедшее стендовые испытания для покрытий теплосетей.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического моделирования и эксперимента, проведением стандартных методов испытаний образцов, достаточный объем лабораторных исследований на апробированном и поверенном оборудовании, апробацией результатов исследования на предприятии, всероссийских и международных конференциях и публикациях в рецензируемых российских и международных журналах.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных: XXI Молодежная научная конференция «Функциональные Материалы: Синтез, Свойства, Применение», посвященная 75-летию Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова (с международным участием) (декабрь 2023 года, г. Санкт-Петербург), V-я международная научная конференция «Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах» (декабрь 2024 года, г. Санкт-Петербург), Международный симпозиум «FLAMN-2025 Fundamentals of laser assisted micro- and nanotechnologies» (июнь 2025

года, г. Санкт-Петербург), XXI Всероссийская конференция-конкурс проектов студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (апрель 2026 года, г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, установлении влияния морфологии поверхности металла при предварительной подготовке на адгезионную прочность полимерного покрытия; установлении повышения адгезионной прочности после лазерной обработки; разработке технологии получения комбинированного полимерного коррозионностойкого покрытия для труб теплосетей, включающую предварительную лазерную обработку и нанесение двуслойного эпоксидно-полиуретанового покрытия; проведении экспериментальных исследований по оценке физико-механических свойств покрытия до и после стендовых испытаний, формулировании выводов и защищаемых положений.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и системы цитирования Scopus. Получены 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных и 1 заявка на патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 124 наименования, и 3 приложения. Диссертация изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка и 12 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность за руководство и направление в работе своему научному руководителю, заведующему кафедрой МиТХИ, д.т.н., профессору Пряхину Е.И., коллективу преподавателей, аспирантов кафедры МиТХИ и своей семье за поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор отечественных и зарубежных источников, посвящённых условиям эксплуатации трубопроводов городских теплосетей и выбора коррозионностойких покрытий для защиты труб теплосетей, а также рассмотрены применяемые в промышленном производстве защитные коррозионностойкие покрытия и методы подготовки поверхности труб, сформулированы требования к разрабатываемому покрытию.

Во второй главе представлены применяемые материалы, оборудование и методы для проведения экспериментальных исследований, которые включают исследования по разработке технологии повышения адгезии коррозионностойких полимерных покрытий к стальной поверхности, исследования получаемой микроструктуры поверхности металла и способы оценки качества получаемого покрытия.

В третьей главе представлен анализ морфологии получаемых поверхностей после дробеструйной, пескоструйной и лазерной обработки и произведено математическое моделирование микропрофиля поверхности, расчет параметров лазера для получения наиболее развитой поверхности металла после обработки. Так же третья глава включает экспериментальные данные о повышении адгезии покрытий после лазерной обработки и при применении промежуточного фосфатного слоя.

В четвертой главе представлены экспериментальные исследования по оценке физико-механических и защитных свойств рассматриваемых полимерных покрытий до и после стендовых испытаний с целью оценки возможности их применения для трубопроводов теплосетей, проложенных бесканально, в условиях активного агрессивного воздействия грунтов и наличии больших блуждающих токов.

В заключении отражены выводы на основании полученных результатов исследований и рекомендации к дальнейшим разработкам.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Применение лазерной обработки внешней поверхности стальных труб теплосетей взамен абразивной обеспечивает формирование упорядоченного, равномерного на протяжении всей площади обработки микрорельефа, повышающего площадь полезной поверхности на 72% и позволяющего получить повышение адгезионной прочности наносимого защитного покрытия на 15% выше применяемых методов струйной обработки.

Микрофотографии поверхности после дробеструйной, пескоструйной и лазерной обработки представлены на рисунке 1. Рельеф получаемой поверхности после обработки струйными методами не упорядочен, с разновысокими выступами и впадинами. Он формируется случайными ударами частиц по поверхности, что приводит к структурной неоднородности поверхности труб. Степенью шероховатости можно управлять при пескоструйной и дробеструйной обработке, но стоит понимать, что значения шероховатости в данном случае являются усредненным показателем и не полностью описывают фактическое состояние поверхности после обработки. Минусом такой обработки является случайное образование острых пиков и впадин, снижающих качество наносимого покрытия и служит центрами развития локальной коррозии.

Для решения вопроса повышения адгезии была выдвинута гипотеза, что очистка и структурирование поверхности перед нанесением полимерных покрытий лазером, позволит повысить адгезионные свойства этих покрытий за счет повышения площади полезной поверхности и сцепления между молекулами эмали и оксидной пленкой на стали.

Проведены оценочные исследования различных лазерных систем: непрерывного действия, импульсные длиннофокусные системы и импульсные короткофокусные системы. Рассмотренные факторы, говорят, что импульсная лазерная обработка с меньшим фокусным расстоянием будет предпочтительнее – она позволяет сформировать наиболее развитый рельеф.

Выполнен выбор параметров импульсного волоконного лазера – для этого построена масштабируемая математическая модель профиля, в которой каждый участок периода описан функцией, отражена на рисунке 2, установлена зависимость от параметров обработки, представленная на рисунке 3. Геометрические параметры для модели, по которым выполнены расчеты для представленных зависимостей установлены эмпирически.

Выполнен расчет прироста полезной поверхности металла L при выбранных режимах обработки (по одному направлению и с учетом объема) по формулам 1 и 2:

$$L = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx, \quad (1)$$

где L – длина кривой профиля, мкм; x_1 и x_2 – начальное и конечное значения абсцисс в 1 периоде, мкм; dx и dy – производные по x и y , соответственно. Для периодического профиля достаточно рассчитать длину на одном периоде T , и умножить на количество периодов. Коэффициент увеличения площади K :

$$K = \frac{L}{T}, \quad (2)$$

где T – это длина прямой между начальным и конечным значением абсцисс в 1 периоде, мкм, L – длина кривой профиля.

На основе изменений прироста поверхности определены наилучшие параметры обработки. На основании проведенных исследований разработан патент.

Установлено, что применение лазерной обработки позволяет сформировать на поверхности развитый рельеф с равномерной шероховатостью. Данная модификация поверхности обеспечивает высокие адгезионные характеристики покрытия даже в отсутствие связующего промежуточного слоя.

На рисунке 4а представлены результаты испытаний покрытий на металле после лазерной обработки на адгезию методом решетчатого надреза, образцы выдержали испытание. Дополнительно проведены испытания на адгезионный отрыв (рисунк 4б) образцов полимерных покрытий после: лазерной обработки, дополнительного фосфатирования, пескоструйной обработки, что позволило установить повышение адгезионной

прочности после лазерной обработки на 15% относительно пескоструйной.

2. Применение комбинированного эпоксидно-полиуретанового покрытия и предварительной лазерной обработки поверхности трубы, позволили получить покрытие с параметрами, превышающими: в 6 раз требования по адгезии, на 20% прочность на удар, в десять раз прочность на изгиб, с удельным объемным электросопротивлением более $1 \cdot 10^8$ Ом*см, прошедшее стендовые испытания для покрытий теплосетей.

Разработаны методика выбора компонентов предлагаемого покрытия и принципы получения самого композитного полимерного покрытия с высокими коррозионностойкими и адгезионными свойствами.

На основании ранее указанных в главе 1 рисков, связанных с применением металлосодержащих покрытий для защиты труб теплосетей, было решено проверить в качестве компонентов композитного покрытия два полимерных материала: эпоксидную и полиуретановую эмали. В работе было предложено провести испытание отдельно каждого материала и совместно в разных сочетаниях.

В работе было предложено провести испытание отдельно каждого материала: покрытия только из эпоксидной эмали и только из полиуретановой, а также их сочетания в разных комбинациях.

Полученные результаты предварительной оценки качества предлагаемого коррозионностойкого покрытия и его компонентов на возможность их применения, как защитных коррозионностойких покрытий для труб теплосетей, показали перспективность данных покрытий.

Проведены следующие испытания: оценка сплошности по ГОСТ 34395-2018; оценка адгезии по ГОСТ 31149-2014. и ГОСТ 32299-2013; оценка ударной прочности по ГОСТ 4765-73; оценка прочности на изгиб по ГОСТ 6806-73 и другие дополнительные испытания.

В результате экспериментов, установлено, что двухслойное эпоксидно-полиуретановое покрытие, где первый слой выполнен из

эпоксидной эмали, а второй из полиуретановой, соответствует требованиям, предъявляемым к коррозионностойкому покрытию для труб теплосетей. Результат представлен в таблице 1.

На основании приведенных результатов, авторами была выдвинута идея применения для антикоррозионной защиты комбинированной системы двух эмалей – эпоксидной и полиуретановой, позволяющей объединить сильные стороны и нейтрализовать недостатки отдельных компонентов схемы.

Заключение о рекомендации комбинированного покрытия из двух эмалей возможно после прохождения им стендовых испытаний.

Стальные плоские образцы с покрытием подвергались выдержке в кислоте, щелочи и кратковременной выдержке при температуре 180 °С, а также процедуре смачивания и сушки в 50 циклов в соответствии с нормативными документами. После чего снова проходили оценку на соответствие требованиям к защитным покрытиям.

Результаты, представлены в таблице 2, а этапы экспериментальной оценки на рисунках 4, 5, 6. Установлено, что предложенное комбинированное эпоксидно-полиуретановое покрытие прошло пороговые требования испытаний.

Принять окончательное решение о применении разрабатываемого покрытия в производстве можно только на основе полных длительных испытаний на моделях труб с изоляцией. Такие испытания могут длиться годами, но первым этапом подготовки к ним является проведение ускоренных стендовых испытаний на плоских образцах, представленные в данной работе. Стендовые испытания позволяют выявить перспективные покрытия и технологии их подготовки, которые с большей вероятностью пройдут полную аттестацию и могут применяться в производстве.

Подводя итог, можно заключить, что предложенное композитное полимерное покрытие на основе эпоксидной и полиуретановой эмалей выдержало предварительные стендовые испытания и может рекомендоваться как защитное для труб теплосетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведены исследования в области совершенствования процесса подготовки поверхности трубы перед нанесением защитного коррозионностойкого покрытия, а также произведен выбор состава для формирования защитного полимерного покрытия для труб горячего водоснабжения бесканальной прокладки в грунте в условиях возможного действия блуждающих токов от городского пассажирского электротранспорта.

Результаты выполненной работы следующие:

1. Выполненный анализ условий эксплуатации труб бесканальной прокладки на основе исследований отечественных и зарубежных авторов позволил определить основные причины, вызывающее внешнюю коррозию стального трубопровода ГВС бесканальной прокладки с ППУ-изоляцией в городской среде, к которым относятся: почвенная коррозия, растрескивание под напряжением и наличие блуждающих токов, повреждения при монтаже.

2. Произведена теоретическая и экспериментальная оценка методов подготовки поверхности стальных труб перед нанесением покрытия для обеспечения высокой адгезионной стойкости покрытий. Сравнительному анализу подверглись методы струйной обработки и предложенный метод подготовки поверхности с применением лазера. Обработка лазером позволила получить развитый и однородный микрорельеф поверхности без пиков и поднутрений, позволивший повысить площадь полезной поверхности металла на 72% и повысить адгезию итогового полимерного покрытия примерно на 15% по сравнению с применяемыми струйными методами.

3. Определен способ и режимы лазерной обработки поверхности металла для получения наиболее развитой микроструктуры. Установлено, что изменение параметров мощности и плотности заполнения линий лазерной обработки больше всего оказывает влияние при структурировании поверхности металла лазером.

4. Произведена оценка эффективности защиты труб ГВС от коррозии известными металлическими и металлизированными

покрытиями. Выявлены недостатки применяемых защитных покрытий и определено, что перспективной областью исследования является разработка защитного покрытия на основе полимерных композиций, обладающих высокой адгезией, высокими эксплуатационными характеристиками и токонепроводимостью.

5. Разработан технологический регламент получения нового композиционного коррозионностойкого полимерного покрытия. Он включает в себя методику и режимы лазерной установки для подготовки поверхности перед нанесением покрытия в виде сетки параллельных канавок на поверхности металла, состав и порядок формирования двухслойного полимерного покрытия на основе эпоксидной и полиуретановой эмалей с режимами ускоренной сушки, где первый слой эпоксидный, а финишный слой – полиуретановый. Проведены стендовые испытания полимерного композиционного коррозионностойкого покрытия. Испытания установили, что предложенное полимерное покрытие можно рекомендовать, как защитное для труб ГВС: покрытие выдержало требования характеристик при испытаниях на химическую стойкость, циклическое смачивание и сушку под воздействием температуры и повышенную температуру.

6. Разработаны рекомендации по условиям применения нового покрытия. Несмотря на то, что покрытие выдержало стендовые испытания, дополнительная проверка показала значительное снижение технических характеристик после длительного воздействия химических веществ, особенно кислой среды, вызванное деградацией полимерных связей. Покрытие рекомендовано для применения как защитное для стальных труб ГВС, под изоляционную обшивку из пенополиуретана (как дополнительная защита) и минеральной ваты (как основное защитное) в условиях подземной прокладки в городской среде. Особенно при наличии блуждающих токов. Не рекомендуется применять покрытие в высококислотных грунтах.

Разработанная в данной работе технология подготовки поверхности предполагает применение стационарных лазерных установок и обработки труб в заводских условиях. Перспективой дальнейших исследований является проработка технологических

возможностей, таких как применение лазерных установок ручной обработки и альтернативных методов нанесения ЛКМ покрытия. Так как качество ручной лазерной обработки сильно зависит от человеческого фактора, этот метод требует дополнительных исследований. Определение процессов ручной лазерной обработки видится автору перспективной областью для дальнейшего развития технологии, например, для восстановления защитного покрытия по предложенной технологии после ремонта в полевых условиях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Прибыткова, Д. А. Анализ методов повышения адгезионной прочности коррозионностойких покрытий трубопроводов теплосетей / Д. А. Прибыткова, Е. И. Пряхин // Дизайн. Материалы. Технология. – 2024. – № 1(73). – С. 142-147. – DOI 10.46418/1990-8997_2024_1(73)_142_147. ВАК, № 1092 ред. 23.04.2024.

2. Прибыткова, Д. А. Испытания коррозионностойких покрытий на образцах с предварительной лазерной обработкой / Д. А. Прибыткова, Е. И. Пряхин, Д. Г. Хоришков // Дизайн. Материалы. Технология. – 2024. – № 2(74). – С. 190-194. – DOI 10.46418/1990-8997_2024_2(74)_190_194. ВАК, № 1107 ред. 10.06.2024.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Пряхин, Е. И. Влияние качества подготовки поверхности труб для теплосетей на их коррозионную стойкость при эксплуатации в условиях подземного залегания / Е. И. Пряхин, Д. А. Прибыткова // Черные металлы. – 2023. – № 11. – С. 97-102. – DOI 10.17580/chm.2023.11.15.

4. Пряхин, Е. И. Применение полимерных покрытий для защиты внешней поверхности труб городского горячего водоснабжения от коррозии / Е. И. Пряхин, Д. А. Прибыткова // Черные металлы. – 2025. – № 5. – С. 68-72. – DOI 10.17580/chm.2025.05.12.

5. Pryakhin, E. I. Development and application of a complex polymer coating to ensure high corrosion resistance of the outer surface of steel pipes of urban heating networks / E. I. Pryakhin, D. A. Pribytkova // CIS Iron and Steel Review. – 2025. – Vol. 29. – pp. 97-101. – DOI 10.17580/cisr.2025.01.17.

Публикации в прочих изданиях:

6. Прибыткова, Д. А. Анализ методов предварительной подготовки поверхности для увеличения адгезии коррозионностойкого покрытия трубопровода / Д. А. Прибыткова, Е. И. Пряхин // Функциональные материалы: Синтез, Свойства, Применение : XXI Молодежная научная конференция, посвященная 75-летию юбилею Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова (с международным участием): Тезисы докладов конференции, Санкт-Петербург, 05-07 декабря 2023 года. – Санкт-Петербург: ООО "Издательство "ЛЕМА", 2023. – С. 108-110.

7. Прибыткова, Д. А. Двухслойная система полимерных покрытий для защиты труб горячего водоснабжения от коррозии / Д. А. Прибыткова, Е. И. Пряхин // Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах : Тезисы докладов V Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 09-10 декабря 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2024. – С. 111-112.

Патенты:

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022620320 Российская Федерация. База данных по зависимости комплекса свойств конструкционных и инструментальных сталей от различных режимов закалки и отпуска. Заявка №2022620168: заявл. 04.02.2022: опубл. 09.02.2022/ К.Ю. Шахназаров, А.В. Бойков, Д.А. Прибыткова; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с. – Текст: непосредственный.

9. Заявка на патент №2026113933 Российская Федерация. Способ формирования рельефа внешней поверхности трубопровода для повышения адгезионных характеристик коррозионностойких полимерных покрытий. Заявл. 06.05.2026 / Е.И. Пряхин, Д.А. Анакина; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 13 с. : ил.

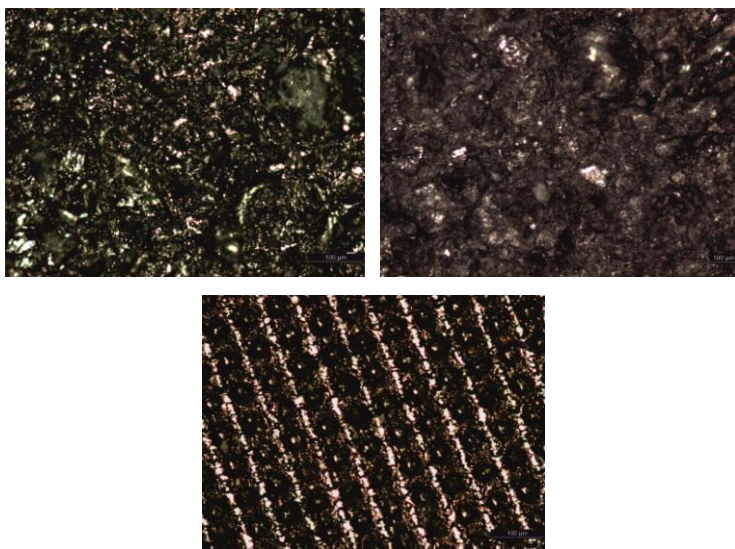


Рисунок 1 – Пескоструйная обработка (верхний левый) x100, дробеструйная обработка (верхний правый) x50 и лазерная обработка (нижний) x100

Таблица 1 – Результаты испытаний покрытий на соответствие требованиям к защитным покрытиям для труб теплосетей

Параметры сравнения	ЭП	ЭП+фос фат	ПУ	ПУ+фос фат	ЭП+ ПУ
Адгезия поверхности, МПа ^к	8,0	7,9	7,9	7,4	8,3
Прочность на удар, 50 кгс x см	+	-	-	+	+
Прочность на изгиб, ø>3мм*	+	-	+	-	+
Сплошность*	-	+	+	+	+
УОЭС, $\geq 1 \cdot 10^8$ Ом·см	+	+	+	+	+

* + и – обозначают выполнение или невыполнение (соответственно) требований в первом столбце



Рисунок 2 – Модель микроструктурированного профиля поверхности, формируемого лазерной обработкой по выбранному режиму

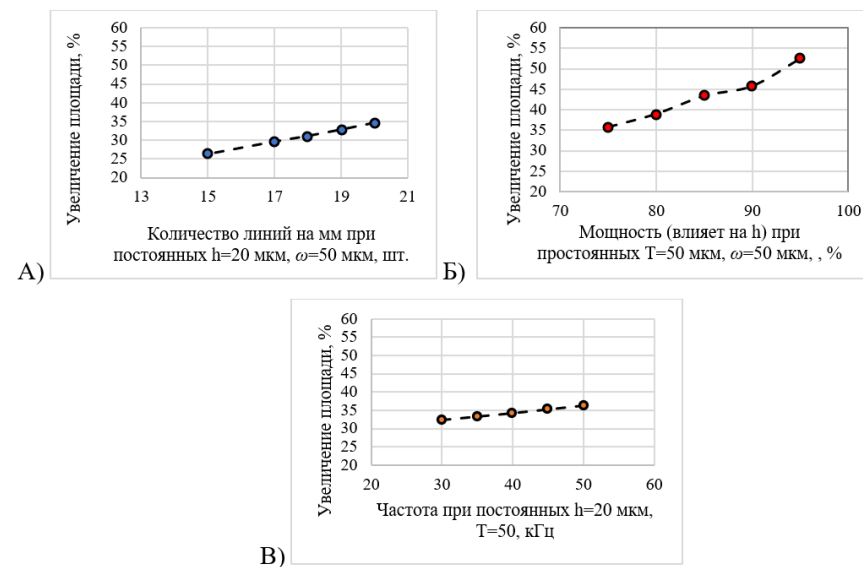


Рисунок 3 – Изменение площади полезной поверхности в зависимости от параметров лазера: А) – от количества линий на мм; Б) – от мощности; В) – от частоты

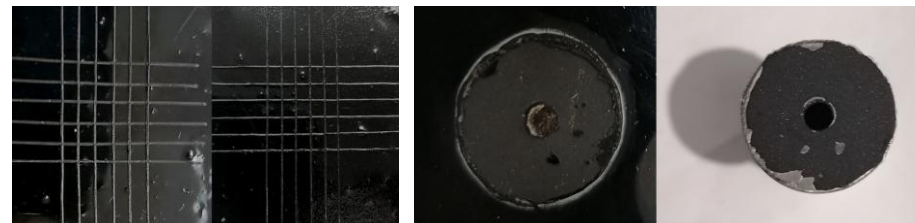


Рисунок 4 – Оценка адгезии покрытия: а) методом решетчатого надреза эпоксидного и полиуретанового покрытия; б) методом отрыва

Таблица 2 – Характеристики покрытий после стендовых испытаний

Испытание	После 50 циклов смачивание-сушка	После р-ра NaOH (pH = 10,5)	После р-ра HCl (pH = 2,5)	После 180 °С (1 час)	Нормативное значение
Адгезия методом царапания, балл	1	1	1	1	1
Адгезия методом отрыва, МПа	1,8	0,9	1,3	7,0	-
Эластичность при изгибе вокруг стержня	Отсутствие излома на оправке $\varnothing$ 1 мм	Отсутствие излома на оправке $\varnothing$ 10 мм	Отсутствие излома на оправке $\varnothing$ 15 мм	Отсутствие излома на оправке $\varnothing$ 1 мм	Отсутствие излома на оправке $\varnothing$ 100 мм
Изгиб методом Эриксона, мм	8,0	4,0	3,8	8,5	-
Сплошность, 9 В	1 краевой	1 краевой	Отсутствие дефектов	Отсутствие дефектов	Отсутствие дефектов
Пробой 500 (900), В	Нет сигнала (нет)	Пробой 900	Пробой 900	Нет сигнала (нет)	-
УОЭС, Ом·см	$\geq 1 \cdot 10^8$	$\geq 1 \cdot 10^8$	$\geq 1 \cdot 10^8$	$\geq 1 \cdot 10^8$	$\geq 1 \cdot 10^8$
Прочность при ударе, см (кгс×см)	> 30	> 40	> 30	> 40	30

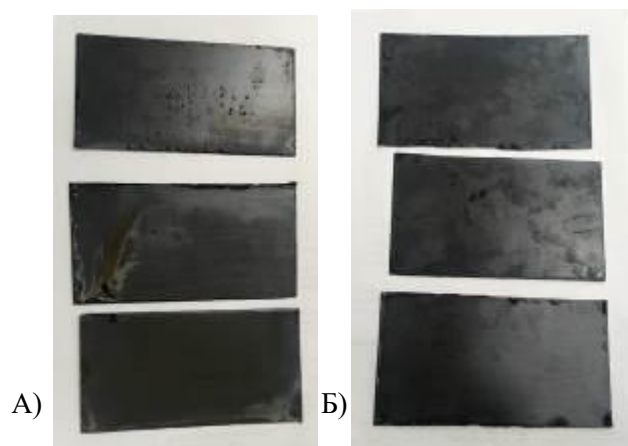


Рисунок 5 – Образцы после испытаний на химическую стойкость: А) – после раствора HCl; Б) – после раствора NaOH



Рисунок 6 – Жестяные пластинки с эпоксидной (верхняя) и полиуретановой (средняя и нижняя) после испытаний

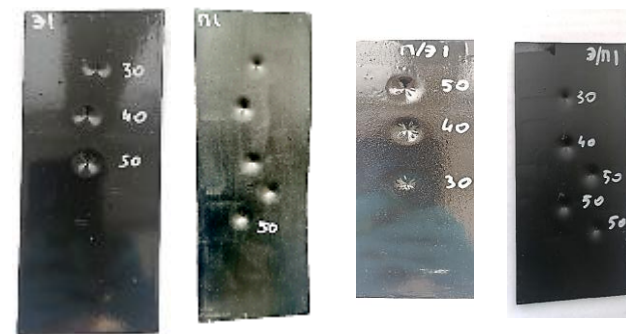


Рисунок 7 – Сравнение результатов испытаний образцов на прочность при ударе. Маркировка Э1 и П1 – эпоксидная и полиуретановая эмаль соответственно, П/Э1 и Э/П1 – комбинированные покрытия.