

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор ФГБОУ ВО
«Новгородский государственный
университет имени Ярослава Мудрого»

Доктор экономических наук, доцент

Ю.В. Данейкин

2026 г.



О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию *Злотина Владимира Андреевича* на тему: «Обоснование выбора составов внутренних покрытий трубопроводов для снижения проницаемости транспортируемого водорода», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

1. Актуальность темы диссертации

Актуальность диссертационного исследования Злотина Владимира Андреевича обусловлена необходимостью повышения надежности и эффективности трубопроводных систем, предназначенных для транспортировки газообразного водорода. Высокая проникающая способность водорода способствует его диффузии через стенку трубопровода, накоплению в металлической основе. Это приводит к ухудшению механических свойств трубных сталей вследствие водородного охрупчивания. Одновременно диффузионные потери транспортируемого водорода ограничивают допустимые параметры эксплуатации трубопроводов, в том числе допускаемое давление и диаметр, что приводит к снижению эффективности водородной транспортной инфраструктуры. В связи с этим разработка внутренних барьерных покрытий, способных уменьшать диффузию и поток водорода при сохранении требуемой адгезии к стальной подложке, является актуальной научно-технической задачей. Особое значение имеет обоснование составов защитных покрытий, применимых для внутренней поверхности стальных трубопроводов и сочетающих гладкостные, коррозионно-стойкие и барьерные свойства покрытия.

Автором диссертационной работы обоснован выбор фторопластовой эмали ФП-566 как основы внутреннего покрытия, модифицируемого углеродными нанотрубками (УНТ), нанопорошками β -SiC, h-BN и фотоинициатором Irgacure 819, а также исследовано влияние различных адгезионных слоев, включая Al-AlOOH, а также акриловое и фосфатное

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-029 от 10.09.26
АУ УС

грунтовочные покрытия. Рассмотренная в диссертации совокупность вопросов соответствует современным материаловедческим задачам формирования функциональных покрытий для эксплуатации в водородсодержащих средах.

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна работы состоит в получении новых результатов, характеризующих влияние состава модифицированных нанодобавками в виде углеродных нанотрубок, нанопорошков β -SiC, h-BN и фотоинициатором Irgacure 819 фторопластовых покрытий и адгезионных слоев на процессы диффузии водорода через стальную подложку.

К наиболее существенным новым результатам относятся:

- Установлена корреляция между введением в состав фторопластовой эмали ФП-566 углеродных нанотрубок, β -SiC, h-BN и фотоинициатора Irgacure 819 в количестве 0,5 мас. % каждого компонента и повышением эффективности снижения диффузии водорода до 35 раз, а диффузионного потока — до 9,3 раз.

- Выявлена зависимость между уменьшением количества и размеров углеродных агломератов в модифицированном фторопластовом покрытии и снижением его водородопроницаемости и расчетных потерь транспортируемого водорода.

- Предложено использовать отношение коэффициентов эффективности снижения диффузии и потока водорода η/η_D в качестве критерия количественной оценки влияния состава нанодобавок на их агломерацию, формирование сквозных дефектов и барьерные свойства покрытия.

- Обоснована эффективность применения адгезионного слоя Al–AlOON в композиции на основе эмали ФП-566. Установлено, что такой слой обеспечивает повышение адгезионной прочности совместно с модифицированным фторопластовым покрытием к стальной подложке до 8,4 МПа, снижение диффузии до 97 %, потока водорода до 89 % и расчетных диффузионных потерь до 8,9 раз.

Полученные результаты дополняют представления о закономерностях формирования барьерных свойств полимерных нанокomпозиционных покрытий и о роли адгезионных слоев в обеспечении их работоспособности в условиях наводороживания.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций является достаточной. Постановка цели и задач исследования логично вытекает из анализа современных данных о взаимодействии водорода с трубными сталями, механизмах водородного охрупчивания, а также о барьерных свойствах металлических, полимерных и композиционных покрытий.

Достоверность результатов обеспечивается применением комплекса взаимодополняющих экспериментальных и расчетных методов. Исследования водородопроницаемости выполнены электрохимическим методом Деванатана–Стачурски

по ГОСТ Р 9.915-2010. Для определения адгезионной прочности использован метод отрыва по ГОСТ 32299-2025. Структура сформированных покрытий и адгезионного слоя исследовалась методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии. В работе использованы сертифицированное измерительное оборудование и воспроизводимые условия подготовки образцов, нанесения покрытий и проведения испытаний.

Обоснованность интерпретации результатов подтверждается сопоставлением параметров диффузии, стационарного диффузионного потока, коэффициентов снижения диффузии и потока, эффективности барьерного действия, адгезионной прочности и расчетных потерь водорода. Расчетная часть работы основана на математическом описании стационарной и нестационарной диффузии через стенку трубы. Полученные результаты согласуются с рассмотренными в диссертации литературными данными о влиянии дисперсности, равномерности распределения наполнителей и дефектности покрытия на снижение водородопроницаемости полимерными композициями.

4. Научные результаты

Установлено, что фторопластовое покрытие на основе ФП-566, модифицированное углеродными нанотрубками и β -SiC, обеспечивает наиболее сбалансированное сочетание показателей снижения диффузии в 9,55, стационарного потока водорода в 7,58 и кратность снижения расчетных потерь водорода 7,5 среди исследованных полимерных систем. Показано, что совместное введение УНТ, β -SiC и h-BN обеспечивает наибольшее снижение эффективного коэффициента диффузии, однако по показателю снижения стационарного потока уступает композиции УНТ + β -SiC, что связано с особенностями агломерации наполнителей.

Установлено взаимосвязь состава нанодобавок с характером распределения и количеством углеродных агломератов и с показателями водородопроницаемости покрытия. Выявленная корреляция описывается предложенным критерием η_j/η_p , позволяющим совместно учитывать вклад наночастиц в объемный барьерный эффект и влияние сквозных дефектов, определяющих стационарный поток водорода.

Получены результаты сравнительной оценки адгезионных слоев. Наиболее высокие показатели адгезионной прочности и барьерной эффективности достигнуты для системы со слоем Al–AlOOH. Для покрытия, модифицированного УНТ и β -SiC, адгезионная прочность к стальной подложке с указанным слоем составила 8,42 МПа. Тем самым подтверждена целесообразность применения газодинамически нанесенного алюминия с последующей гидротермальной обработкой для формирования функционального адгезионного слоя.

Разработан алгоритм оценки потерь водорода через стенку трубы с барьерными покрытиями, реализованный в программе для ЭВМ «Программа определения распределения концентрации транспортируемого водорода по толщине стенки трубы» свидетельство о регистрации № 2024663063 от 17.06.2024.

Результаты диссертационного исследования достаточно полно отражены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях в изданиях из перечня рецензируемых научных

изданий и в 2 статьях в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus. По результатам работы получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость работы заключается в развитии представлений о влиянии состава, распределения и агломерации нанодобавок на диффузию и поток водорода через фторопластовые покрытия. Предложенный показатель η/η_0 расширяет методический аппарат сравнительной оценки барьерных покрытий, поскольку позволяет учитывать различие между снижением эффективного коэффициента диффузии и уменьшением стационарного потока водорода, чувствительного к сквозным дефектам покрытия.

Практическая значимость состоит в обосновании состава внутреннего фторопластового покрытия на основе эмали ФП-566, модифицированного УНТ и β -SiC, а также в разработке композиционной системы с адгезионным слоем Al–Al₂O₃. Предложенные решения ориентированы на снижение проникновения водорода в стальную подложку, сокращение диффузионных потерь продукта и повышение адгезионной прочности внутренних покрытий.

Практически значимым является усовершенствование методики проведения испытаний методом Деванатана–Стачурски путем нанесения графитового электропроводящего слоя на непроводящие полимерные покрытия. Это позволило проводить электрохимическую оценку водородопроницаемости полимерных покрытий при сохранении возможности сопоставления результатов с характеристиками стальной подложки.

Разработанная программа для ЭВМ позволяет выполнять оценку распределения концентрации и диффузионных потерь водорода по толщине стенки трубопровода с учетом предлагаемых барьерных покрытий. Материалы диссертации приняты к внедрению в ООО «ВИАСМ Плюс» согласно акту от 26.05.2026. Даны рекомендации по составу покрытий и адгезионных слоев для повышения эффективности внутренней защиты стальных трубопроводов.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты работы целесообразно использовать при разработке, подборе и совершенствовании внутренних защитных покрытий стальных трубопроводов, предназначенных для транспортировки газообразного водорода, а также при оценке совместимости существующей газотранспортной инфраструктуры с водородсодержащими средами.

Перспективным направлением дальнейших исследований является оценка долговременной работоспособности разработанных покрытий при воздействии газообразного водорода под давлением, циклического изменения давления и температуры, а также механических нагрузок и абразивного воздействия потока. Целесообразно также

развивать исследования масштабирования технологии нанесения покрытий на внутреннюю поверхность труб, их ремонтпригодности и устойчивости в зоне сварных соединений.

7. Замечания и вопросы по работе

По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания и вопросы:

1. Представляло бы интерес более подробно сопоставить условия электрохимического наводороживания с условиями проникновения газообразного водорода при реальных давлениях транспортировки и определить границы применимости выполненного пересчета к давлению.

2. Электрохимические испытания по наводороживанию проводились только при одной температуре и одной плотности тока. В работе не отмечено, как может измениться эффективность снижения проницаемости водорода покрытием при изменении этих параметров?

3. Для композиции состава УНТ + β -SiC достигнуто наиболее выраженное снижение стационарного потока водорода, тогда как композиция УНТ + β -SiC + h-BN характеризуется наибольшим коэффициентом снижения диффузии. Целесообразно более детально количественно раскрыть влияние размеров, формы и пространственного распределения агломератов на указанное различие результатов.

4. В работе приведены экспериментальные исследования оценки эффективности покрытий по снижению проницаемости водорода только для плоских образцов. Целесообразно оценить эффективности покрытия с учётом радиуса кривизны трубопровода.

5. Исследования проводились только на образцах из стали 20. Как поменяется технология нанесения покрытия, и какая будет его эффективность снижения проницаемости и потерь водорода через образцы из низколегированных сталей?

Высказанные замечания носят преимущественно рекомендательный характер и могут быть учтены при дальнейшем развитии исследований. Они не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

8. Заключение по диссертации

Диссертационная работа Злотина Владимира Андреевича «Обоснование выбора составов внутренних покрытий трубопроводов для снижения проницаемости транспортируемого водорода», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение, является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача обоснования составов внутренних композиционных покрытий и адгезионных слоев для снижения диффузии, потока и потерь водорода через стенку стального трубопровода.

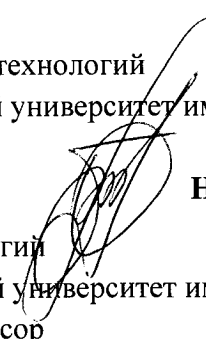
Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение, в частности направлениям, связанным с установлением закономерностей разрушения металлических и неметаллических материалов и

функциональных покрытий под действием внешней среды, разработкой функциональных покрытий и методов управления их свойствами, а также созданием композиционных материалов для эксплуатации в агрессивных средах.

Диссертация «Обоснование выбора составов внутренних покрытий трубопроводов для снижения проницаемости транспортируемого водорода» полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор Злотин Владимир Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

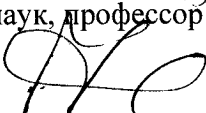
Отзыв на диссертацию и автореферат диссертации Злотина Владимира Андреевича обсужден и утвержден на заседании кафедры промышленных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», протокол №1 от 03.09.2026 года.

И.о. заведующего кафедрой промышленных технологий
ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»
кандидат технических наук



Нозирзода Шодмон Салохидин

Профессор кафедры промышленных технологий
ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»
доктор физико-математических наук, профессор

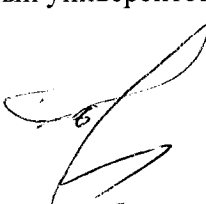


Филиппов Дмитрий Александрович

Секретарь заседания

Доцент кафедры промышленных технологий

ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»
кандидат технических наук, доцент



Бордашев Кирилл Анатольевич

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

Почтовый адрес: 173003, Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41

Официальный сайт в сети Интернет: <http://www.novsu.ru/> эл. почта: novsu@novsu.ru

телефон: +7 (816) 262-72-44