

ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ

**T. 30 № 1
2025**

THEORY AND PRACTICE OF CORROSION PROTECTION Vol.30. Iss.1



Автономная некоммерческая организация
**“Центральный научно-исследовательский институт
коррозии и сертификации”**

- ✓ **Испытания и сертификация продукции и материалов для топливно-энергетической, газовой, строительной, химической и других отраслей промышленности:**
 - санитарные разрешения;
 - сертификаты соответствия;
 - пожарные сертификаты;
 - паспорта экологической безопасности;
 - разработка и утверждение Планов ликвидации аварийных ситуаций;
 - разработка и регистрация ТУ;
 - проведение сертификационных испытаний
 - проведение испытаний, обследований, экспертиз с выдачей заключения.
- ✓ **Проведение исследовательских работ в области коррозии, электрохимии и материаловедения:**
 - автоклавные коррозионные и коррозионно-механические испытания и исследования материалов в водных и газовых средах (CO_2 , Ar, N_2 , H_2S) при температурах до 320 °C и давлениях до 160 атм любой продолжительности;
 - количественное экспресс-определение коррозионных показателей металлов, сплавов, покрытий, конструкционных материалов в водных, технологических средах, грунтах и атмосфере, в лабораторных, производственных и натуральных условиях с использованием портативных высокочувствительных приборов и оригинальных методик;
 - определение коррозионности водно-органических охлаждающих жидкостей;
 - коррозионный мониторинг систем кондиционирования воздуха, тепло-водоснабжения в лабораторных и эксплуатационных условиях;
 - определение эффективности средств противокоррозионной защиты конструкционных материалов.
- ✓ **Услуги в области охраны интеллектуальной собственности и авторского права:**
 - регистрация товарных знаков;
 - регистрация промышленных образцов;
 - регистрация изобретений;
 - авторское право.
- ✓ **Разработка, выбор оптимальных технологий, поставка материалов для противокоррозионной защиты продукции машиностроения и производственных объектов:**
 - ингибиторов коррозии: летучих, для водных сред, кислотного травления, моющих, дезинфицирующих, пассивирующих составов, изолирующих покрытий, автоконсервантов, преобразователей ржавчины;
 - систем защитных лакокрасочных покрытий для металлоконструкций, находящихся в любом состоянии, при необходимости исключая абразивоструйную обработку путем использования ингибирующих грунтовок;
 - коррозионное обследование, производство противокоррозионных работ на промышленных объектах;
 - технологический аудит.

АНО «ЦНИИКС»
Россия, 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 11 стр. 3
Тел.: 8-985-776-10-21
E-mail: cartec-com@mail.ru
www.cartec-com.ru



Системы защитных и теплоизоляционных покрытий

ЗАО "Ассоциация "КАРТЭК"

*Эмаль термостойкая протекторная
«КАРТЭК-КО»*



Эффективное универсальное средство защиты от коррозии металлоконструкций, для защиты теплоизоляции труб от разрушения под действием солнечной радиации

*Жидкая
теплоизоляция*

*«КАРТЭК-
Экзотермо»*

*белая
серая*



Сочетает в себе свойства теплоизоляции, звукоизоляции и краски

*Эмаль термо / химстойкая
«КАРТЭК-ХМ»*



*желтая
зеленая,
и др. цвета*

Эффективное универсальное средство защиты поверхностей, эксплуатирующихся в агрессивных средах при повышенных температурах

*Цинк-силикатная композиция
Барьер-ЗП*



Протекторные покрытия для долговременной, до десятков лет, защиты от коррозии

*Практика Противоокислительной
защиты*

ООО «КАРТЭК»

115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 11, стр. 3

Тел: (985) 776-10-21

E-mail: cartec-com@mail.ru

cartec-com@mail.ru

К столетию Михаила Николаевича Фокина
(1925-2012)

М.Н. Фокин родился 4 июня 1925 года в Москве. После окончания школы с 1943 года учился в Иркутском высшем военном авиационно-инженерном училище. В 1945 году был принят в Московский институт стали им. Сталина, физико-химический факультет которого закончил с отличием в 1951 году в составе первого в СССР выпуска специалистов по коррозии и защите металлов, и был направлен в Институт физической химии АН СССР, где с 1951 по 1954 год был аспирантом, а в 1954 году стал научным сотрудником и занимался решением проблем оборудования и материалов атомной промышленности.

В этот период во главе группы специалистов им был разработан один из первых в СССР электронный потенциостат и проведены электрохимические исследования механизма и параметров пассивации нержавеющей стали и титановых сплавов. По результатам выполненных работ в 1956 году М.Н. Фокин защитил кандидатскую диссертацию.

В 1967 году был приглашен на должность заведующего кафедрой коррозии в Московский институт стали и сплавов (МИСиС).

Помимо обширной учебно-методической работы при его участии, совместно с Б.К. Опарой и А.Г. Ракочем, был проведен цикл научных работ, посвященных высокотемпературной пассивности металлов и сплавов. По результатам исследований М.Н. Фокин защитил докторскую диссертацию.

В 1972 году был назначен директором Всесоюзного научно-исследовательского института коррозии Минхимпрома СССР (ВНИИК). С его приходом значительно повысился научный уровень исследований института и расширился круг инженерно-технических разработок противокоррозионной защиты не только в химических производствах, но в нефте- и газопереработке и атомной энергетике. ВНИИК под его руководством активно участвовал в решении государственной проблемы рационального использования нержавеющей стали и титановых сплавов.

В 1982 году возглавил отдел коррозии металлов ИФХ АН СССР, где проработал еще 30 лет до конца жизни. В своих трудах, посвященных теории коррозии высоколегированных сталей и титана, М.Н. Фокин развивал научные основы их использования в особо агрессивных химических и радиохимических производствах. Результаты, полученные при глубоком изучении условий эксплуатации, позволили создать надежное оборудование для ведущих отраслей промышленности.

За время работы заведующим кафедры коррозии МИСиС, директором ВНИИ Коррозии и заведующим Отделом коррозии ИФХ РАН профессором М.Н. Фокиным подготовлено несколько поколений специалистов высокой квалификации по коррозии и противокоррозионной защите в России.



М.Н. Фокин

Д.х.н., профессор В.А. Тимонин



**ПРАКТИКА
ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ
ЗАЩИТЫ**

**PRAKTIKA PROTIVOKORROZIONNOJ
ZASITY**

Том 30 № 1 2025 г.

ISSN 1998-5738 (Print)

ISSN 2658-6797 (Online)

**Выходит 4 раза в год
Издается с 1996 года**

**Объединенный каталог «Пресса России»
– индекс 87750, 88009**

Цели и области

В журнале рассматриваются проблемы теории и практики защиты от коррозии в топливно-энергетической, химической и нефтехимической промышленности, на транспорте, в строительстве и машиностроении, вопросы энергосбережения, охраны окружающей среды, прикладной электрохимии. Тематика статей – новые средства и методы защиты от коррозии, приборы и методы контроля коррозии, коррозионно-стойкие материалы. Журнал предназначен для научных работников, специалистов в области защиты от коррозии, преподавателей, аспирантов технических и естественнонаучных вузов. Журнал издается с 1996 года, входит в утвержденный ВАК РФ перечень научных периодических изданий и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций.

После перехода в открытый доступ материалы журнала распространяются под лицензией CC BY (с марта 2026 г.)

Учредитель
ООО «КАРТЭК»

Редакция
ООО «КАРТЭК»

**Зарегистрирован Комитетом Российской
Федерации по печати**

**Свидетельство № 015777
от 26.02.1997 г.**

Адрес Учредителя и Редакции:
РФ, 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе,
дом 11, стр. 3
Почтовый адрес:
РФ, 119071, г. Москва, а/я 64
Тел. +7 (985) 776-10-21
E-mail: corrosion-protection@cartec-com.ru,
cartec-com@mail.ru
http://www.corrosion-protection.ru

**© журнал «Практика противокоррозионной
защиты», 2025**

Отпечатано в ООО «Типография КоПринт», РФ,
127411, г. Москва, шоссе Дмитровское, д. 157, стр. 9
Подписано в печать 01.03.2025.
Тираж 1000 экз
Свободная цена

Редакционная коллегия

Акользин Андрей Павлович (главный редактор),
доктор технических наук, профессор, Генеральный директор
ООО «КАРТЭК», г. Москва, Российская Федерация

Поляков Николай Анатольевич (зам. главного редактора),
кандидат химических наук, директор АНО «ЦНИИКС»,
заведующий лабораторией, Институт физической химии и
электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва, Российская
Федерация

Абрашов Алексей Александрович, кандидат технических
наук, доцент, Российский химико-технологический
университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская
Федерация

Алиев Тофик Аббасали оглы, доктор химических наук,
профессор, член-корреспондент Национальной Академии
Наук Азербайджана, Директор, Институт природных ресурсов
Министерства науки и образования Азербайджанской Республики,
г. Нахчыван, Азербайджанская Республика

Андреев Николай Николаевич, доктор химических наук,
заведующий лабораторией, Институт физической химии
и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва,
Российская Федерация

Ануфриев Николай Геннадиевич, кандидат химических
наук, ведущий научный сотрудник, Институт физической
химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва,
Российская Федерация

Бугай Дмитрий Ефимович, доктор технических наук,
профессор, Уфимский государственный нефтяной
технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Вагапов Руслан Кизитович, доктор технических наук,
начальник лаборатории, Корпоративный научно-технический
центр коррозионного мониторинга и защиты от коррозии
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва, Российская Федерация

Гройсман Алик, кандидат химических наук, преподаватель-
консультант, Технион (Израильский технологический
институт), г. Хайфа, Израиль

Есенов Ермухамед Кудабиевич, доктор технических наук,
профессор, академик Казахской Национальной академии
естественных наук, Южно-Казахстанский университет имени
М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан

Калужина Светлана Анатольевна, доктор химических наук,
профессор, Воронежский государственный университет,
г. Воронеж, Российская Федерация

Минева Надежда Яковлевна, доктор географических
наук, профессор, Государственный университет по
землеустройству, г. Москва, Российская Федерация

Тимонин Виктор Алексеевич, доктор химических наук,
профессор, Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

Фам Зуи Нам, кандидат химических наук, Заместитель
Генерального директора по науке, Российско-Вьетнамский
Тропический научно-исследовательский и технологический
центр (Тропический центр), г. Ханой, Вьетнам

Заведующая редакцией

Акользина Алла Викторовна, кандидат технических наук,
ООО «КАРТЭК», г. Москва, Российская Федерация

Выпускающий редактор

Наркевич Екатерина Николаевна

Технический редактор

Глухов Вячеслав Геннадьевич



THEORY AND PRACTICE OF CORROSION PROTECTION

ПРАКТИКА ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Volume 30 Issue 1 2025

ISSN 1998-5738 (Print)

ISSN 2658-6797 (Online)

4 issues per year

Published 1996 – present

“Press of Russia” United Catalogue
– indices 87750, 88009

Objectives and Scopes

The journal covers the problems of theory and practice of corrosion protection in the fuel and energy, chemical and petrochemical industries, transport, construction and mechanical engineering, energy saving, environmental protection, and applied electrochemistry. The main topics of the articles are new means and methods of corrosion protection, devices and methods for corrosion control, and corrosion-resistant materials. The journal is intended for researchers, specialists in the field of corrosion protection, teachers, and postgraduate students of technical and natural science universities. The journal has been published since 1996 and is included in the list of scientific periodicals and publications approved by the Higher Attestation Commission of the Russian Federation, in which the main scientific results of dissertations should be published.

After transition to open access, the journal materials are distributed under a CC BY license (since March, 2026)

Founder

CARTEC, LLC

Editorial Board

CARTEC, LLC

Registered by Press Committee of the
Russian Federation

License No. 015777

issued 26.02.1997

Address of the Founder and Editorial Board:

bld. 3, 11, Ordzhonikidze st., Moscow,
115419, Russian Federation

Postal address:

PO Box 64, Moscow, 119071, Russian Federation

Tel.: +7(985) 776-10-21

E-mail: corrosion-protection@cartec-com.ru,

cartec-com@mail.ru

<http://www.corrosion-protection.ru>

© “Theory and Practice of Corrosion
Protection”, journal, 2025

Printed by CoPrint Printing House LLC, bld. 9, 157,
Dmitrovskoe highway, Moscow, 127411, Russian Federation
Signed to the press 01.03.2025
Circulation 1000 copies
Free price

Editorial Board

Andrey P. Akol'zin (editor-in-chief),

Dr. Sci. of Technical Sciences, Professor, CEO of CARTEC, LLC,
Moscow, Russian Federation

Nikolay A. Polyakov (deputy editor-in-chief), Cand. Sci. in Chemistry, Director of Independent Non-Profit Organization

“Central Research Institute for Corrosion and Certification”,
Head of Laboratory, Frumkin Institute of Physical Chemistry and
Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian
Federation

Alexey A. Abrashov, Cand. Sci. in Technical Sciences, assistant professor, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

Tofiq A. Aliyev, Dr. Sci. of Chemistry, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Director of the Institute of Natural Resources of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Nakhchivan, Republic of Azerbaijan

Nikolay N. Andreev, Dr. Sci. of Chemistry, Head of Laboratory, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Nikolay G. Anufriev, Cand. Sci. in Chemistry, leading researcher, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Dmitry E. Bugai, Dr. Sci. of Technical Sciences, Professor, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

Ruslan K. Vagapov, Dr. Sci. of Technical Sciences, Head of laboratory of the Corporate Scientific and Technical Center for Corrosion Monitoring and corrosion protection OOO Gazprom VNIIGAZ, Moscow, Russian Federation

Alec Groysman, Ph.D. in Chemistry, lecturer-consultant, Technion (Israel Institute of Technology), Haifa, Israel

Ernuhamed K. Yesenov, Dr. Sci. of Technical Sciences, Professor, Academician of the Kazakhstan National Academy of Natural Sciences, South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, Republic of Kazakhstan

Svetlana A. Kaluzhina, Dr. Sci. of Chemistry, Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

Nadezhda Ya. Mineeva, Dr. Sci. of Geography, Professor, State University of Land Use Planning, Moscow, Russian Federation

Viktor A. Timonin, Dr. Sci. of Chemistry, Professor, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

Duy Nam Pham, Ph.D. in Chemistry, Deputy General Director for science, Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Centre, Hanoi, Vietnam

Managing Editor

Alla V. Akol'zina, Cand. Sci. in Technical Sciences, CARTEC,
LLC, Moscow, Russian Federation

Copy Editor

Ekaterina N. Narkevich

Setting and Design

Vyacheslav G. Glukhov



В номере:

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ

А.Д. Гайзуллин, Р.К. Вагапов

Исследование технологических и защитных свойств ингибиторов коррозии на объектах газовых месторождений..... 6

А.К. Евсеев, Н.А. Поляков, И.Н. Мягова, И.В. Горончаровская,
И.И. Кирсанов, А.Б. Дровосеков, А.А. Каниболоцкий, А.А. Саприн

Оценка термического повреждения ткани при использовании электрохирургического инструмента с износостойкими покрытиями..... 21

И.Н. Ганиев, Р.З. Махмадуллоев, Х.М. Ходжаназаров, Х.О. Одиназода

Влияние добавки алюминия на анодную устойчивость свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) в среде водного раствора NaCl..... 30

ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОХИМИЯ

К.А. Орлова, Н.С. Григорян, Н.А. Аснис, Т.А. Ваграмян, А.А. Абрашов

Исследование процесса иммерсионного оловянирования для производства печатных плат..... 39

ПОРТРЕТ ОРГАНИЗАЦИИ

В.Н. Злобин

Обеспечение безопасности и повышение эффективности эксплуатации объектов энергетики с применением минерально-полимерных покрытий... 49

СЕРТИФИКАЦИЯ..... 67

Уважаемые коллеги!

Мы были бы рады видеть Вас в числе подписчиков журнала «Практика противокоррозионной защиты» на 2025 год. Подписаться на журнал можно во всех отделениях связи России и стран СНГ:

- объединенный каталог «Пресса России»
– индекс 87750, 88009.

Стоимость годовой подписки печатной версии – 6600 рублей, в том числе НДС (10%). Подписная цена включает стоимость доставки.

Стоимость годовой подписки электронной версии журнала – 7200 рублей, в том числе НДС (20%).

Вы также можете оформить подписку в редакции, для этого позвоните по телефону +7 (985) 776-10-21.



Contents:

MATERIALS AND EQUIPMENT FOR CORROSION PROTECTION

Artur D. Gaizullin, Ruslan K. Vagapov

Study of Technological and Protective Properties of Corrosion Inhibitors..... 6

Anatoly K. Evseev, Nikolai A. Polyakov, Inna N. Myagkova,
Irina V. Goroncharovskaya, Iliya I. Kirsanov, Andrey B. Drovosekov,
Alexander A. Kanibolotsky, Artem A. Saprin

**Evaluation of Thermal Tissue Damage Using an Electrosurgical Instrument with
Wear-Resistant Coatings..... 21**

Izatullo N. Ganiev, Rahmonali Z. Mahmadulloev, Khayrullo M. Khojanazarov,
Haydar O. Odinzoda

**Influence of Aluminum Additive on Anodic Stability of Lead Babbitt
B(PbSb15Sn10) in an Aqueous Solution of NaCl..... 30**

APPLIED ELECTROCHEMISTRY

Kseniya A. Orlova, Nelya S. Grigoryan, Naum A. Asnis, Tigran A. Vagramyan,
Aleksey A. Abrashov

Study of Immersion Tin Plating for the Production of Printed Circuit Boards..... 39

PORTRAIT OF THE ORGANIZATION

Victor N. Zlobin

**Ensuring the Safety and Increasing the Efficiency of Energy Facilities Using
Mineral Polymer Coatings..... 49**

SERTIFICATION..... 67

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ

Информация по подготовке статей размещена на сайте:

<http://www.corrosion-protection.ru>.

Редакция журнала не несет ответственность за достоверность
информации рекламных материалов

ATTENTION TO AUTHORS

Information on the preparation of articles is posted on the website:

<http://www.corrosion-protection.ru>.

The editorial board of the journal is not responsible for the accuracy of
the information of advertising materials



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ
ЗАЩИТЫ**

**MATERIALS AND EQUIPMENT FOR
CORROSION PROTECTION**

Article type: original

Тип статьи: научная, оригинальная

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-1>

**Исследование технологических и защитных свойств ингибиторов
коррозии на объектах газовых месторождений**

А.Д. Гайзуллин, Р.К. Вагапов✉

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
142717, Московская обл, г.о. Ленинский, пос. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1

e-mail: R_Vagapov@vniigaz.gazprom.ru

Аннотация. На многих газовых и газоконденсатных месторождениях в добываемой продукции наблюдается повышенное содержание диоксида углерода, что в присутствии конденсационных или пластовых вод приводит к проявлениям на углеродистых и низколегированных сталях углекислотной коррозии, характеризующейся опасными локальными дефектами. Одним из основных способов защиты стального оборудования и трубопроводов на газовых объектах от внутренней коррозии, в том числе и от углекислотной коррозии, является ингибиторная защита. В статье рассмотрены основные требования, предъявляемые к применяемым на газовых и газоконденсатных месторождениях ингибиторам коррозии по технологическим и защитным свойствам. Среди важных технологических параметров ингибиторов коррозии исследованы растворимость в различных растворителях, эмульсообразование, стойкость товарной формы и растворов ингибирующих реагентов к низким температурам. Они важны как для возможности применения ингибиторов коррозии (дозирования, применения при реальных эксплуатационных режимах и др.), так и для исключения негативных последствий в процессах по переработке газа и газового конденсата и выделения их из добываемых флюидов. Изучены возможности использования химического и физического методов для разделения эмульсии «газовый конденсат - вода», образованной из-за высоких концентраций ингибиторов коррозии в эксплуатационных средах. Для снижения негативного влияния эмульсеобразования исследованы оптимальные концентрации и режимы применения в таких условиях деэмульгаторов и повышенных температур соответственно. Для защиты от углекислотной коррозии изучены защитные свойства для двух основных технологий применения ингибиторов коррозии: постоянного и переменного дозирования в рабочие среды. Проведен сравнительный анализ эффективности защиты от общей и локальной коррозии и последствия ингибиторной пленки при этих двух режимах применения ингибиторов.

Ключевые слова: углекислотная коррозия, эмульсеобразование, методы разрушения эмульсии, пленкообразующие свойства ингибиторов, метод поляризационного сопротивления, последствия ингибиторов, локальные дефекты

Для цитирования: Гайзуллин А.Д., Вагапов Р.К. Исследование технологических и защитных свойств ингибиторов коррозии на объектах газовых месторождений // Практика противокоррозионной защиты. – 2025. – Т. 30, № 1 – С. 6-20. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-1>

Статья получена 22.10.2024. Принята к публикации 21.01.2025. Опубликовано 01.03.2025.

Конфликт интересов. Вагапов Р.К. является членом редакционной коллегии журнала «Практика противокоррозионной защиты» с 2023 г., но не имеет отношения к решению опубликовать данную статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

**Study of Technological and Protective Properties of Corrosion Inhibitors
at Gas Field Facilities**

Artur D. Gaizullin, Ruslan K. Vagapov✉

LLC Gazprom VNIIGAZ ,
bld. 1, 15, Gazovikov St., Razvilka, Leninsky municip., Moscow region, 142717, Russian Federation

e-mail: R_Vagapov@vniigaz.gazprom.ru

Abstract. At many gas and gas condensate fields, the extracted products contain increased levels of carbon

dioxide, which in the presence of condensation or formation water leads to carbon dioxide corrosion on carbon and low-alloy steels, characterized by dangerous local defects. One of the main methods of protecting steel equipment and pipelines at gas facilities from internal corrosion, including carbon dioxide corrosion, is inhibitor protection. The article considers the main requirements for corrosion inhibitors used at gas and gas condensate fields in terms of technological and protective properties. Among the important technological parameters of corrosion inhibitors, the following were studied: solubility in various solvents, emulsion formation, resistance of the commercial form and solutions of inhibitor reagents to low temperatures. They are important both for the possibility of using corrosion inhibitors (dosing, use in real operating conditions, etc.), and for eliminating negative consequences in the processes of processing gas and gas condensate and separating them from the produced fluids. The possibilities of using chemical and physical methods for separating the emulsion «gas condensate - water» formed due to high concentrations of corrosion inhibitors in operating environments have been studied. To reduce the negative impact of emulsion formation, optimal concentrations and modes of application in such conditions of demulsifiers and elevated temperatures, respectively, were studied. To protect against carbon dioxide corrosion, protective properties were studied for two main technologies of applying corrosion inhibitors: constant and variable dosing in working environments. A comparative analysis of the effectiveness of protection against general and local corrosion and the aftereffect of the inhibitor film was carried out under these two modes of inhibitor application.

Keywords: carbon dioxide corrosion, emulsion formation, methods of emulsion destruction, film-forming properties of inhibitors, polarization resistance method, aftereffect of inhibitors, local defects

For citation: Gaizullin, A. D., Vagapov, R. K. (2025). Study of technological and protective properties of corrosion inhibitors at gas field facilities. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 30(1), 6-20. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-1>

Received October 22, 2024. Accepted for publication January 21, 2025. Published March 01, 2025.

Conflict of interest. Ruslan K. Vagapov has been a member of the editorial board of the journal "Theory and Practice of Corrosion Protection" since 2023, but was not involved in the decision to publish this article. The article passed the journal's peer review procedure. The authors declared no other conflicts of interest.

Введение

Одной из наиболее актуальных на газовых месторождениях является проблема углекислотной коррозии (УКК) [1, 2]. Удобным и целесообразным способом защиты стального оборудования и газопроводов от образования опасных локальных дефектов [3, 4], характерных для УКК, служат ингибиторы коррозии (ИК) [5, 6].

На газовых месторождениях к ингибирующим реагентам предъявляются, помимо защитных, также и технологические требования [7-9]. Это связано с тем, что ИК должны не только защищать от внутренней коррозии, но и не должны сказываться на технологических процессах при переработке газа. Они должны быть растворимы в растворителях, стойки к низким температурам, не образовывать эмульсий в водно-углеводородной среде и др. Отметим, что условия эксплуатации газовых месторождений отличаются от нефтяных как составом добываемых флюидов (газ и стабильный газовый конденсат), так и технологическими процессами и режимами по их экстракции и переработке в полезные углеводородные продукты. Опыт ингибирования УКК на газовых объектах, который расширяется в по-

следние годы, показал [5, 10], что при их использовании могут наблюдаться некоторые последствия, связанные с отрицательным воздействием на технологические режимы при подготовке и переработке газа. Поэтому на газовых объектах для ИК не менее важными, чем защитные, являются их технологические свойства, и этому уделяется особое внимание. Например, при эксплуатации установки регенерации метанола, применяемого на газовых объектах в качестве ингибитора гидратообразования, снижается эффективность работы аппаратов из-за недостаточного разделения образовавшейся устойчивой эмульсии, состоящей из нестабильного конденсата и водометанольного раствора. Стабилизирует такую эмульсию присутствие повышенных количеств ИК в этой смеси [10]. Нечеткое разделение эмульсии может привести к существенным потерям углеводородного конденсата, а также к уносу жидкости и попаданию их из-за проскока в аппараты, приводя к недостаточной степени осушки газа [11]. Получаемые из добытых флюидов газ и углеводородный конденсат могут быть конечными продуктами, что требует их качественного и достаточного отделения [12].

Однако заметим, что указанные проблемы не всегда бывают связаны с самим ингибирующим реагентом или его свойствами. Они могут быть обусловлены, например, техническими ограничениями самих систем подачи химических реагентов, которые не были запроектированы изначально должным образом. Это, в свою очередь, приводит к сложностям с дозированием ИК, отсутствием четкого регулирования его подаваемого количества и др. Эксплуатационные условия и особенности газового объекта могут потребовать т.н. «ударных» ингибиторных обработок для создания ингибиторной пленки, например скважинного оборудования, что будет приводить к залповым выносам больших количеств ингибитора коррозии. Такие условия могут привести к повышенным нагрузкам на сепарационное оборудование объектов по подготовке и переработке добываемого газа, когда повышенное содержание ингибитора коррозии в жидкой двухфазной среде будет приводить к возникновению эмульсии по ранее описанному механизму.

В связи с вышеизложенным, необходимо изначально оценивать и учитывать возможные риски применения ИК с учетом особенностей, технических и технологических возможностей/ограничений конкретного ингибируемого газового объекта. Исходя из потенциальных проблем при ингибировании, на этапах подбора ИК необходимо искать и подбирать способы их решения. Для обеспечения защиты стальной поверхности ИК должен обладать хорошими адсорбционными свойствами, обеспечивая устойчивое и продолжительное ингибирующее последствие.

Цель статьи – исследование пленкообразующих и основных технологических свойств ИК и методов борьбы с эмульсиями, возникающими в процессе добычи и переработке газа и газового конденсата.

Методика проведения

Метод измерения эмульсеобразования основан на визуальном наблюдении за процессом, временем и полнотой расслоения эмульсии «углеводородная фаза–вода», которая образовалась при эксплуатации на газовом месторождении в условиях при-

менения ингибитора коррозии. Фиксировалось изменение внешнего вида (полнота разделения, прозрачность фаз или др.) при дозировке деэмульгатора или нагреве эмульсии. Растворимость оценивалась в спирте (этанол), воде (дистиллированная вода) и углеводороде (керосин) при добавлении в них заданной концентрации ИК, встряхивании и выдержке до 7 суток. Ингибитор коррозии считался полностью растворимым, если смесь сохраняла однородность (без признаков эмульсии, расслоения или выпадения осадка). Стойкость к низким температурам (T) оценивалась при охлаждении пробирки с ИК до $T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и определением наличия/отсутствия подвижности жидкости при наклоне пробирки с пробой на 45° . При выполнении испытаний по технологическим параметрам ИК были использованы методики, регламентированные и более подробно описанные в СТО Газпром 9.3-007-2007 [13].

Пленкообразующие свойства ИК исследовались в модели конденсационной воды (МКВ) с общей минерализацией $1,031\text{ г/л}$ методом линейного поляризационного сопротивления (ЛПР). Солевой состав МКВ включал $783,5\text{ мг/дм}^3\text{ NaCl}$, $91\text{ мг/дм}^3\text{ KCl}$, $81,7\text{ мг/дм}^3\text{ NaHCO}_3$, $30,2\text{ мг/дм}^3\text{ CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $10,1\text{ мг/дм}^3\text{ MgCl}_2$, $34,5\text{ мг/дм}^3$ и Na_2SO_4 . Пленка ИК наносилась при погружении стальных образцов из стали Ст20 в раствор ИК (время экспозиции 1 час). Испытания методом ЛПР проводились на цилиндрических образцах (ЛПР-датчиках) из стали Ст3 в ячейках при постоянных перемешивании и продувке CO_2 . Коррозионные эксперименты проводились при $T=22\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значения скорости общей коррозии ($K_{\text{ЛПР}}$) замерялись коррозиметром «Эксперт-004». Скорость локальной коррозии ($K_{\text{лок.}}$) определяли по измерению глубины коррозионного поражения на ЛПР-датчиках. Были испытаны два ИК, которые являлись промышленно выпускаемыми реагентами на основе амин- и имидазолин-содержащих соединений.

Визуальная оценка коррозионного воздействия стальных образцов проводилась на металлографическом микроскопе ЛОМО РВ-21-2 (ЛОМО, РОССИЯ) с цифровой видеокамерой МС-12 (увеличение изображения поверхности стали до 100 раз).

Результаты и их обсуждение

Технологические свойства

Растворимость ИК в различных средах является важным параметром, поскольку они взаимодействуют с эксплуатационными средами, такими как жидкие углеводороды, спирт и вода. На газовых промыслах обычно используются растворы ИК в углеводородных или спиртовых растворителях, а не их товарная форма. Распределение ИК между водной (водноспиртовой) и углеводородной фазами в эксплуатационных средах газовых объектов влияет на его защитные свойства [14, 15]. В воде ИК может полностью растворяться, диспергироваться или не растворяться. Хорошая растворимость ИК в агрессивной водной фазе способствует более эффективному ингибированию стали за счет улучшения адсорбции вещества на металлической поверхности. Диспергирование ИК в водную фазу поможет создать его гидрофобную пленку на защищаемой поверхности стали. Если активный компонент ИК является гидрофобным соединением, не растворяется в воде и преимущественно полностью переходит (растворяется) в углеводородную фазу, то он не сможет защитить от коррозии из-за отсутствия или недостаточной его концентрации в водной

среде.

Метод определения растворимости ИК основывался на визуальном анализе смеси «ингибитор–растворитель», получаемой посредством механического смешивания составляющих. Для этого готовили смеси со следующими концентрациями ИК ($C_{ИК}$) в растворителе: 0,1%; 1%; 5%; 10%...50%. В роли растворителей применяли этанол, керосин и дистиллированную воду [13]. Как видно (табл. 1), ингибитор «ИК1» полностью растворяется в этиловом спирте и воде. После смешения со спиртом образуется пена, которая разрушается в течение нескольких секунд. При смешении «ИК1» с водой пена также образуется при $C_{ИК}$ до 20% и сохраняется до 24 часов, что может негативно сказаться на технологических процессах переработки газа. В органическом растворителе реагент «ИК1» не растворяется.

Одним из негативных последствий отсутствия растворимости ИК в эксплуатационных средах может быть образование осадка, который будет забивать аппараты, фильтры или способствовать образованию отложений на стенках оборудования, например, на теплообменниках [16].

Еще одним условием эксплуатации ИК, когда могут выпасть осадки, являются по-

**Таблица 1. Результаты испытания растворимости ингибитора «ИК1»
(Р – растворим, НР – не растворим)**

Table 1. Results of the solubility test of the inhibitor «IK1» (P - soluble, HP – insoluble)

Растворитель / Solvent	$C_{ИК}$ об. %	Результаты испытаний / Test results					
		После смешивания / After mixing	Через 1 ч / In 1 hour	Через 3 ч / In 1 hour	Через 24 ч / In 1 hour	Через 72 ч / In 1 hour	Через 168 ч / In 1 hour
Этиловый спирт / Ethanol	0,1...20	Р, пена	Р	Р	Р	Р	Р
	30	Р, пена	Р	Р	Р	Р	Р
	40	Р, пена	Р	Р	Р	Р	Р
	50	Р, пена	Р	Р	Р	Р	Р
Дистиллированная вода / Distilled water	0,1...20	Р, пена	Р, пена	Р, пена	Р, пена	Р	Р
	30	Р, пена	Р, пена	Р, пена	Р	Р	Р
	40	Р, пена	Р, пена	Р, пена	Р	Р	Р
	50	Р, пена	Р	Р	Р	Р	Р
Керосин / Kerosene	0,1...50	НР					

ниженные T в зимний период. Одним из требований является то, что реагент не должен терять подвижность (загустевать или затвердевать) при отрицательных T : не ниже $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Заметим, что применение ИК в условиях сурового климата Крайнего Севера, где температура окружающей среды может опускаться значительно ниже вышеуказанного значения, требует отдельного внимания и рассмотрения. В таких случаях проводятся дополнительные исследования, включая наблюдения за поведением ИК до $T=-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ или даже $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. В ходе исследований было установлено (табл. 2), что различные образцы товарных форм ИК могут проявлять отличающуюся стойкость к низким T . Так, образец «ИК1», достигнув $T=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, помутнел, а при дальнейшем понижении до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ приобрел вязкую консистенцию и стал малоподвижным. Другой реагент «ИК2» сохранил свой исходный внешний вид и подвижность во всем исследованном диапазоне температур.

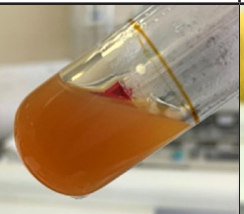
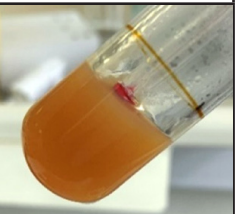
Поскольку ИК применяются не в исходном товарном виде, а в виде растворов в растворителе, что отмечалось выше, то актуальным является исследование их растворения и стойкости к низким T самих растворов. К негативным последствиям на открытом воздухе в зимнее время могут привести застывание или выпадение осадка в растворе ИК при его транспортировке по ингибиторопроводам к точке дозирования, а также сложности с растворением и

смешиванием более вязкого при отрицательных температурах ИК с растворителем. Для этого было проведено исследование растворимости двух образцов ИК в спирте, предварительно охлажденных до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда реагент становится более вязким при низких T . И спирт, и ИК могут храниться в условиях окружающей среды. В связи с чем раствор ИК может готовиться при низких T . Для этого пробирки со спиртом и обоими ИК по отдельности охлаждали до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем их смешивали путем добавления охлажденного спирта в пробирку с ИК (рис. 1). В отличие от комнатной T смешение при минус $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит медленнее. Через 15 секунд перемешивания ингибитор «ИК2» растворяется полностью. В то время как для полного растворения реагента «ИК1» необходимо уже 75 секунд перемешивания.

Как уже отмечалось выше, ИК, являясь поверхностно-активными веществами, способны при определенных концентрациях формировать эмульсии [17], что может негативно сказаться на производственных процессах. Присутствие ИК не должно оказывать негативного влияния на время разделения эмульсии, усложняя отделение углеводородов от воды. Образование промежуточного слоя между ними может привести к вышеуказанным проблемам при переработке добытых флюидов.

Заметим, что процесс образования эмульсий может быть обусловлен как естественными эмульгаторами, например, ас-

Таблица 2. Внешний вид товарной формы ингибиторов «ИК1» и «ИК2» при различных T
Table 2. View of the commercial form of inhibitors «IC1» and «IC2» at different T

$T, ^{\circ}\text{C}$	+20	-40	-50	-60
«ИК1» / «IC1»				
«ИК2» / «IC2»				

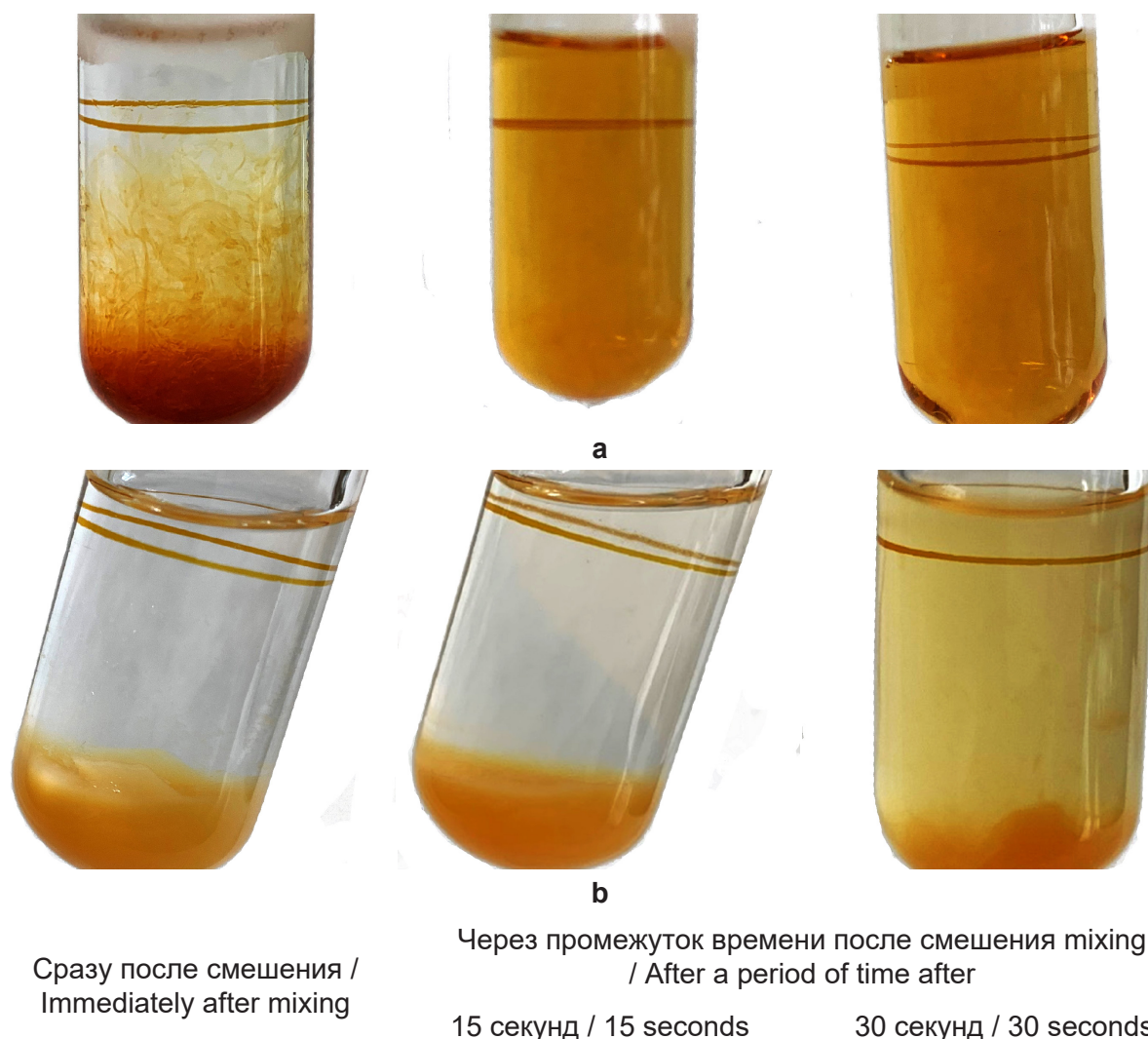


Рис. 1. Результаты смешения ингибиторов со спиртом при температуре минус 50 °C:
a – «ИК2»; b – «ИК1»

Fig. 1. Results of mixing inhibitors with alcohol at a temperature of minus 50 °C: a – «IC2»; b – «IC1»

фальтово-смолистыми веществами, парафинами или другими углеводородами, так и механическими примесями, среди которых могут быть и продукты коррозии, содержащиеся в трубопроводе [18].

Существуют разные способы разрушения эмульсий. Среди них можно выделить термический способ (физический метод) и добавление деэмульгатора (химический метод), не требующие внесения существенного изменения в конструкции оборудования объектов переработки газа. Сообщается об исследовании возможности применения волнового воздействия (ультразвуковое, импульсное магнитное, электромагнитное поле, постоянное магнитное поле) для разрушения эмульсий [18, 19]. Однако такие

методы волнового воздействия не всегда способны самостоятельно справиться и разделить эмульсию. Требуется их совместное использование с теми же физическим и химическим методами. К тому же они требуют специального приборного сопровождения для создания волнового воздействия.

В связи с этим нами были проведено исследование эффективности деэмульгатора и термического способа на промышленных (естественных) эмульсиях (Проба № 1 и Проба № 2), образовавшихся на газовом месторождении. Результаты исследования представлены в табл. 3. Добавление деэмульгатора в объеме до 0,3 мл позволило эффективно разделить эмульсию в Пробе 2. Однако дозировка деэмульгатора ($V_{деэм}$),

Таблица 3. Влияние химического и термического методов на расслоение двух проб естественных эмульсий

Table 3. Effect of chemical and thermal methods on the stratification of two samples of natural emulsions

Химический метод / Chemical method					
$V_{\text{деэм}}, \text{мл}$ / $V_{\text{dem}}, \text{ml}$	0	0,1	0,3	0,5	1
Проба №1 / Sample №1					
Проба №2 / Sample №2					
Термический метод / Thermal method					
$T, ^\circ\text{C}$ / $T, ^\circ\text{C}$	+25	+35	+45	+55	
Проба №1 / Sample №1					
Проба №2 / Sample №2					

начиная от 0,3 мл и выше, хоть и улучшала разделение эмульсии (водный фаза становилась более прозрачной), но начинала оказывать негативное влияние на систему. При этом присутствие деэмульгатора стимулировало и повышало образование пены

с ростом $V_{\text{деэм}}$ (табл. 3). Дальнейшее добавление деэмульгатора привело к образованию более устойчивой эмульсии. На Пробу № 1 добавление деэмульгатора не оказало положительного влияния.

Схожие результаты были получены и

при воздействии термического метода на эмульсии. На Пробу №1 нагрев до +55 °С не влиял на разделение эмульсии также, как и дальнейшее повышение T до +70 °С. Разделение на фазы Пробы № 2 начинается при $T = +45$ °С, улучшаясь при повышении до +55 °С. Положительный эффект для Пробы № 2 выражается не только в отделении углеводородной фазы, но и в повышении прозрачности водного слоя.

С помощью метода хроматомасс-спектрометрии было выявлено гораздо большее процентное соотношение высокомолекулярных углеводородов, включая парафинистых соединений, в газовом конденсате Пробы 1, что могло способствовать его большей склонности к эмульсеобразованию и устойчивости эмульсии (рис. 2).

Основными способами ингибиторных обработок скважинного оборудования и промышленных трубопроводов являются либо непрерывное дозирование реагента в эксплуатационные среды, либо периодическая (т.н. «ударная») обработка большим количеством ИК для создания ингибиторной пленки на поверхности стали. Эффективность применения ИК зависит от правильности выбора как самого реагента, так и технологии его подачи [20]. При любой технологии использования ИК одним из основных свойств, влияющих на защиту от внутренней коррозии, является их способность прочно ад-

сорбироваться на стали. Отличием двух технологий применения ИК будет то, что при постоянном дозировании происходит подпитка для поддержания ингибиторной пленки. В то время как при периодической ингибиторной обработке ИК должен обладать более повышенными пленкообразующими свойствами, чтобы обеспечить защиту от УКК на протяжении продолжительного периода до следующей «ударной» закачки. При отсутствии пленки ИК, ее удалении из-за пониженных пленкообразующих свойств или десорбции в процессе эксплуатации, например поток движущейся среды, в этих местах будут создавать условия для развития локальной УКК на стали [6, 21, 22].

Несмотря на актуальность защитных и пленкообразующих параметров ИК, они остаются мало изученными. При этом нередко методические приемы, применяемые для моделирования такого рода агрессивных воздействий на пленку ИК, в недостаточной мере имитируют реальные условия эксплуатации объекты добычи углеводородов [23]. Одним из основных методов изучения пленкообразующих свойств является метод ЛПР, который нередко используется для этих целей [24]. При этом тестируется десорбция предварительно созданной на стальной поверхности ингибиторной пленки во времени и таким способом определяется способность ИК сохранять сплошность, за-

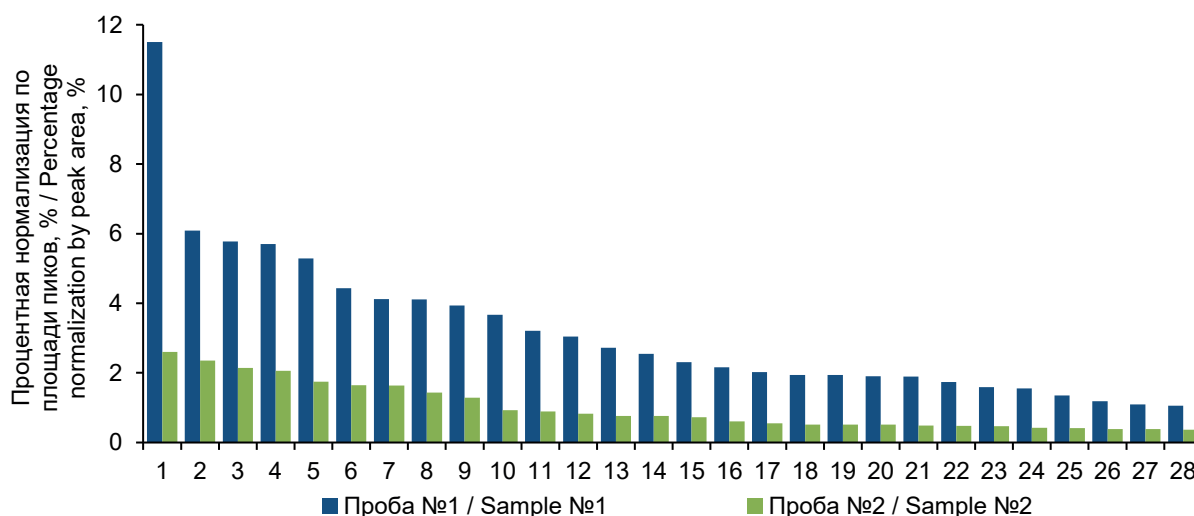


Рис. 2. Качественный состав промышленных проб газового конденсата (нумерация приведена по различным компонентам)

Fig. 2. Qualitative composition of field samples of gas condensate (numbering is given for different components)

щищая сталь от коррозии, и время последующих действий в коррозионной водной среде. Это требует проведения продолжительных испытаний, в ходе которых ингибитор будет частично переходить в водную фазу и растворяться в ней. Однако большинство коррозионных опытов, в том числе и продолжительных, проводятся в одном и том же испытательном растворе, который будет уже недостаточно агрессивен из-за присутствия растворившегося в нем ИК. Хотя в реальных условиях газового месторождения будет происходить движение и замена потока агрессивной жидкости, контактирующей с пленкой ИК на стальной поверхности [25].

В связи с этим, для имитации реальных промышленных условий нами в процессе испытаний методом ЛПР производилось несколько замен водного раствора для оценки стойкости пленки ИК при наиболее агрессивных режимах. При исследовании десорбции пленки Ингибитора 1 со стального электрода методом ЛПР были проведены две серии испытаний: без и с двухкратной сменой водного раствора с минерализацией $1,031 \text{ г/дм}^3$ за время испытаний (рис. 3 и табл. 4).

Исследования авторов [26] стойкости ингибиторных пленок на нефтяном объекте также подтверждают важность адсорбционных свойств ИК. Наибольшую эффективность показали реагенты при хемосорбции их на стальной поверхности. В таких условиях эффективность пленки ИК не всегда будет зависеть от ее толщины. Как обнаружили исследователи [27] при тестировании трех промышленно применяемых пленкообразующих ИК, наибольшую эффективность показал реагент 1 с наименьшей толщиной слоя. При хорошей стойкости ИК, которая определяется его адгезионными свойствами, агрессивные условия и среды не смогли его удалить со стали (реагент 1 сохранился на 100% поверхности). Пленка другого реагента 2, изначально наиболее толстая, но с неравномерной толщиной по стали из-за имеющихся глобул (кластеров) ИК, после испытаний стала тоньше. Это произошло при воздействии динамических условий, которые сгладили ингибиторную пленку, как бы «расплющивая» ее по поверхности стали. По данным авторов пленка реагента

2 сохранилась на 60% поверхности, а его защитные свойства от коррозии были наихудшие. По ингибирующим свойствам реагент 3 находился посередине между двумя другими пленкообразующими ИК и после испытаний сохранился на 80% защищаемой поверхности.

Видно (рис. 3), что $K_{\text{ЛПР}}$ в отсутствии ИК достигает $1,8 \dots 2,0 \text{ мм/год}$, а динамика его изменения в течение опыта имеет схожий характер при параллельных испытаниях (кривые 1 и 2). Смена испытательного раствора не влияет на его значения. Испытания пленочного «ИК3» показали, что $K_{\text{ЛПР}}$, будучи на первой неделе ниже пограничного значения $0,1 \text{ мм/год}$, которое позволяет относить условия эксплуатации к коррозионно-агрессивным, начинает расти после первой смены раствора (через 8 дней) и достигает $0,45 \dots 0,7 \text{ мм/год}$ (через 22 дня). После второй замены водного среды (через 22 дня) продолжается повышение $K_{\text{ЛПР}}$, достигая $1,2 \dots 1,4 \text{ мм/год}$ к моменту окончания эксперимента. Сравнение двух параллельных опытов с «ИК3» показало идентичность их защитных свойств (кривые 3 и 4 на рис. 3). Испытания «ИК4», предназначенного для постоянного дозирования, с поддержанием на протяжении всего времени эксперимента его $C_{\text{ИК}} = 200 \text{ мг/л}$ в воде подтвердило эффективность ($K_{\text{ЛПР}}$ ниже $0,1 \text{ мм/год}$) данной технологии ингибиторной защиты от УКК (кривые 5 и 6 на рис. 3). При этом, если после первой замены агрессивного раствора (через 8 дней) не добавлять «ИК4», то значения $K_{\text{ЛПР}}$ через 12 дней начинают интенсивный рост, возрастая до $1,1$ и $1,8 \text{ мм/год}$ через 22 и 36 дней соответственно (кривая 8 на рис. 3). В промежуток между 9 и 12 днями данных условий испытаний пленка «ИК4», созданная на ЛПР-образцах, сохраняла сплошность и обеспечивала защиту от УКК. Похожий период времени (до 4 дней) обеспечивалась защита стали «ИК4», когда уже после второй замены раствора (через 22 дня) можно не дозировать «ИК3» (кривая 7 на рис. 3). За последующие 6 дней отсутствия ИК в водной среде значения $K_{\text{ЛПР}}$ быстро выросло до $1,4 \text{ мм/год}$).

Анализ внешнего вида показал (табл. 4), что после испытаний локальные дефекты не образовались только на ЛПР-датчи-

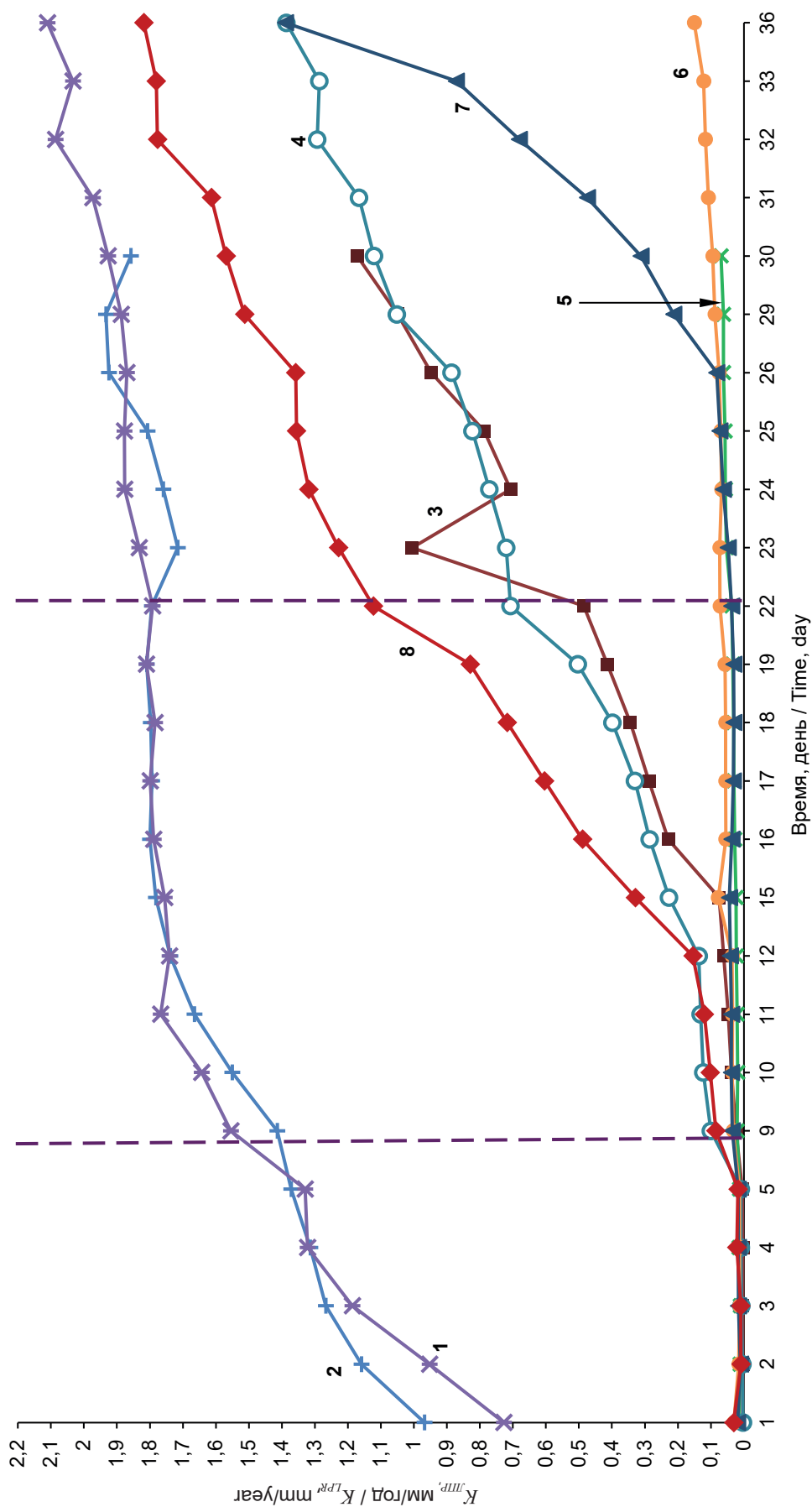
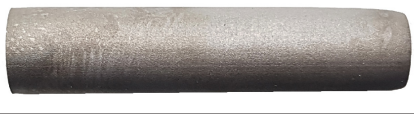
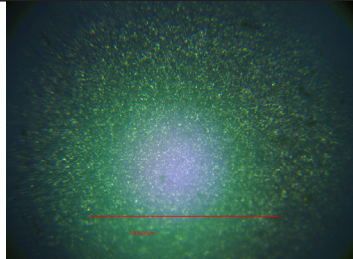
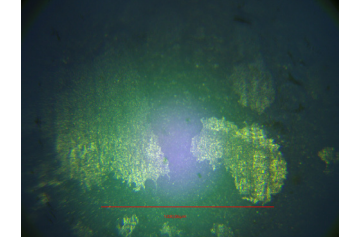
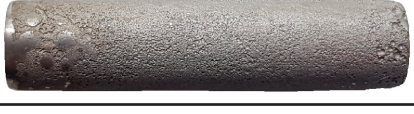
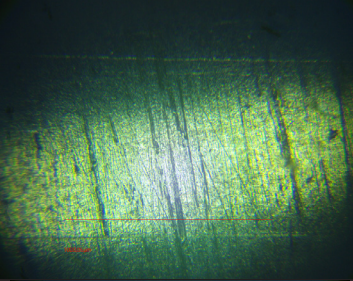
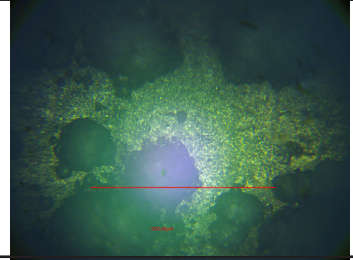
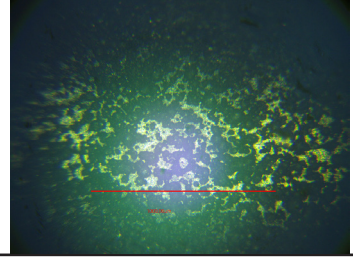


Рис. 3. Динамика изменения скорости коррозии стальных образцов от времени по результатам ЛПР-измерений: 1, 2 – без добавления ингибитора; 3, 4 – пленка «ИК3»; 5, 6 – «ИК4» ($C_{ик} = 200$ мг/л, постоянно); 7 – «ИК4» ($C_{ик} = 200$ мг/л, двукратно); 8 – «ИК4» ($C_{ик} = 200$ мг/л, однократно). Пунктирной линией обозначены периоды обновления водного раствора

Fig. 3. Dynamics of change in the corrosion rate of steel samples over time based on the results of LPR measurements: 1, 2 – without adding inhibitor; 3, 4 – film «IK3»; 5, 6 – «IK4» ($C_{ci} = 200$ mg/l, constantly); 7 – «IK4» ($C_{ci} = 200$ mg/l, twice); 8 – «IK4» ($C_{ci} = 200$ mg/l, once). The dotted line indicates the periods of renewal of the aqueous solution

Таблица 4. Значения и вид образцов после испытаний методом ЛПР (на фото отрезок сфокусированного изображения составляет 1000 μm). Нумерация образцов соответствует значениям, указанным на рис. 3

Table 4. Values and appearance of samples after testing by the LPR method (in the photo, the segment of the focused image is 1000 μm). The numbering of the samples corresponds to the values indicated in Fig. 3

Номер образца / Sample number	$K_{\text{лок.}}$, мм/год / $K_{\text{loc.}}$, mm/year	Внешний вид образцов после испытаний / View of samples after testing	
		Макро / Macro	Микро / Micro
1	—		
			
3	0,949...2,674		
			
5	—		
7	2,258...3,975		
8	0,686...1,059		
			

ках, экспонируемых в условиях без ИК и с постоянным присутствием $C_{ИК} = 200$ мг/л в водной среде. После испытаний с пленкой из реагента «ИКЗ» на стальных образцах образовались локальные повреждения со $K_{лок.} = 0,949...2,674$ мм/год. Как после первой замены раствора, так и после второй, пленка «ИК4» оказалась мало эффективной от локальной УКК: значение $K_{лок.}$ находилось в диапазонах 2,258...3,975 и 0,458...1,059 мм/год.

Выводы

1. Помимо защитных свойств, к ингибиторам коррозии, применяемым на газовых месторождениях, предъявляются ряд технологических требований для возможности применения и исключения негативного воздействия на объекты переработки газа и газового конденсата. Растворимость ингибиторов коррозии позволяет дозировать ингибиторы коррозии из их растворов в разных растворителях. Дополнительно хорошая растворимость и стойкость ингибиторов и их растворов позволяет избежать выпадения осадков и засорения элементов оборудования механическими примесями. Добавление ингибитора в концентрациях, достаточных для защиты от коррозии, не должно способствовать эмульсообразованию в системе «стабильный конденсат – вода».

2. Химический и термический способы позволяют разрушать образованные эмульсии, которые были отобраны с объектов переработки газового месторождения. Нагревание до $+40...+60$ °C способствует лучшему отделению углеводородной фазы из эмульсии. Добавление деэмульгатора позволяет разделять эмульсии до определенной оптимальной дозировки реагента, превышение которой приводит к негативным последствиям в виде пенообразования или повторного эмульсообразования. Наибольшей стойкостью обладают эмульсии, в которые входят газовые конденсаты, содержащие высокомолекулярные углеводороды.

3. Метод поляризационного сопротивления позволяет оценивать последствие образованной пленки ингибитора коррозии по степени ее десорбции в процессе испытаний. Примененный способ многократной замены водной фазы позволяет проводить

оценку пленкообразующих параметров ингибиторов коррозии в наиболее агрессивных условиях, близких к реальным эксплуатационным режимам. В местах отслоения нестойких в условиях углекислотной коррозии пленок ингибиторов образуются глубокие локальные дефекты, фиксируемые после испытаний. Стойкость пленкообразующих свойств ингибиторов коррозии следует оценивать не только по скорости общей, но и локальной коррозии.

Литература

1. Кантюков Р.Р., Запечалов Д.Н., Вагапов Р.К. Исследование коррозионной активности сред и стойкости используемых материалов в условиях присутствия агрессивного диоксида углерода // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 11. – С. 793-801. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-793-801>
2. Вагапов Р.К. Стойкость сталей в эксплуатационных условиях газовых месторождений, содержащих в добываемых средах агрессивный CO_2 // Материаловедение. – 2021. – № 8. – С. 41-47. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2021-0-8-41-47>
3. Alamr A.H. Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview // Engineering Failure Analysis. – 2020. – V. 116. – Article 104735. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104735>
4. Mansoori H., Mirzaee R., Esmaeilzadeh F. et. al. Pitting corrosion failure analysis of a wet gas pipeline // Engineering Failure Analysis. – 2017. – V. 82. – P. 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.08.012>
5. Меньшиков С.Н., Мельников И.В., Байдин И.И. и др. Эффективность применения ингибитора коррозии «СОНКОР-9020»: результаты промысловых испытаний на установке комплексной подготовки газа - низкотемпературной сепарации Юбилейного НГКМ // Газовая промышленность. – 2020. – № 11 (809). – С. 40-47.
6. Paolinelli L.D., Brown B., Simison S.N. et. al. Inhibition of CO_2 corrosion of carbon steel with 1% Cr. // Materials Chemistry and Physics. – 2012. – V. 136, № 2-3. – P. 1092-1102. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.08.055>
7. Слугин П.П., Ягафаров И.Р., Кантюков

Р.Р. и др. Научный анализ технического состояния и защиты скважинного оборудования и промысловых трубопроводов ПАО «Газпром» в условиях добычи и транспортировки коррозионно-агрессивного газа. Часть 1 // Газовая промышленность. – 2023. – № 9 (854). – С. 64-71.

8. Набутовский З.А., Антонов В.Г., Филиппов А.Г. Проблемы коррозии и ингибиторной защиты на месторождениях природного газа // Практика противокоррозионной защиты. – 2000. – № 3 (17). – С. 50-56. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9141839>

9. Вигдорович В.И., Стрельникова К.О. Критерии оценки защитной эффективности ингибиторов коррозии // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – Т. 13, № 1. – С. 24-28.

10. Слугин П.П., Полянский А.В., Ермилов О.М. Способ повышения извлечения конденсата на Бованенковском НГКМ // Наука и техника в газовой промышленности. – 2018. – № 1 (73). – С. 33-37.

11. Корякин А.Ю., Кобычев В.Ф., Александров В.В. и др. Опыт модернизации технологического оборудования подготовки газа залежей ачимовской толщи Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения // Газовая промышленность. – 2019. – Т. 782. – С. 64-70.

12. Prokopyov A.V., Istomin V.A., Fedulov D.M. et. al. Increasing the Efficiency of Hydrocarbons C5+ Extraction from the Gas of Condensate Fields by a Low-Temperature Absorption Process // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2019. – V. 53, № 5. – P. 886-892. <https://doi.org/10.1134/S0040579518050214>

13. СТО Газпром 9.3-007-2010 Защита от коррозии. Методика лабораторных испытаний ингибиторов коррозии для оборудования добычи, транспортировки и переработки коррозионно-активного газа. – М: Газпром экспо, 2011. – 91 с.

14. Касенова Ж.С. Исследование распределения ингибиторов коррозии между водной и нефтяной фазами // Технологии нефти и газа. – 2021. – № 1 (132). – С. 15-18. <https://doi.org/10.32935/1815-2600-2021-132-1-15-18>

15. Hernández Zarate K.A., Guzmán Castañeda J.I., Cosmes López L.J. et. al. A new method to estimate the partition of corrosion

inhibitors // Corrosion Reviews – 2023. – V. 42, № 3. – P. 331-340. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2023-0040>

16. Колосов В.М., Власова Г.В., Пивоварова Н.А. и др. Проблемы образования отложений в технологическом оборудовании при переработке газового конденсата // Газовая промышленность. – 2019. – № 3 (781). – С. 73-82.

17. Муравьева С.А., Мельников В.Г. Влияние строения азотосодержащих соединений на их пеногасящую и деэмульгирующую способность // Теоретические основы химической технологии. – 2005. – Т. 39, № 1. – С. 83-87.

18. Романова Ю.Н., Мусина Н.С., Марютина Т.А. Влияние различных видов волнового воздействия на разрушение стойких гельсодержащих водонефтяных эмульсий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – № 7. – С. 7-15. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-7-7-15>

19. Лекомцев А.В., Илюшин П.Ю., Степаненко И.Б. и др. Технология разрушения стойких водонефтяных эмульсий магнитным воздействием // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – № 2. – С. 7-12.

20. Вагапов Р.К., Запечалов Д.Н. Возможности использования и выбор технологии ингибиторной защиты от коррозии объектов добычи газа, характеризующихся присутствием агрессивного диоксида углерода // Наука и техника в газовой промышленности. – 2020. – № 1 (81). – С. 72-79.

21. Askari M., Aliofkhazraei M., Ghaffari S. et. al. Film former corrosion inhibitors for oil and gas pipelines - A technical review // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – V. 58. – P. 92-114. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.07.025>

22. Shamsa A., Barker R., Hua Y. et. al. Performance evaluation of an imidazoline corrosion inhibitor in a CO₂-saturated environment with emphasis on localised corrosion // Corrosion Science. – 2020. – V. 176. – Article 108916. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108916>

23. Papavinasam S., Revie R.W., Attard M. et. al. Comparison of Laboratory Methodologies to Evaluate Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Pipelines // Corrosion. – 2003. – № 10 (59). – P. 897-912. <https://doi.org/10.5006/1.3287711>

24. De Marco R., Durnie W., Jefferson A. et. al. Persistence of Carbon Dioxide Corrosion Inhibitors // *Corrosion*. – 2002. – № 4 (58). – P. 354-363. <https://doi.org/10.5006/1.3287686>

25. Вагапов Р.К., Ибатуллин К.А., Яровой В.В. Моделирование режимов движения потока среды по газопроводу в процессе коррозионных испытаний // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2023. – № 10 (89). – С. 40-46. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-40-46>

26. De Marco R., Durnie W., Jefferson A. et. al. Surface Analysis of Adsorbed Carbon Dioxide Corrosion Inhibitors // *Corrosion*. – 2001. – № 1 (57). – P. 9-18. <https://doi.org/10.5006/1.3290335>

27. Menendez C.M., Bojes J.M., Lerbscher J. Obtaining Batch Corrosion Inhibitor Film Thickness Measurements Using an Optical Profiler // *Corrosion*. – 2011. – № 3 (67). – P. 035003-1-035003-12. <https://doi.org/10.5006/1.3560117>

References

1. Kantyukov, R. R., Zapevalov, D. N., Vagapov, R. K. (2021). Media corrosiveness and materials resistance at presence of aggressive carbon dioxide. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 64(11), 793-801. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-793-801> (in Russ.)

2. Vagapov, R. K. (2022). Resistance of Steels under Operating Conditions of Gas Fields Containing Aggressive CO₂ in the Produced Media. *Inorganic Materials: Applied Research*, 13(1), 240-245. <https://doi.org/10.1134/S2075113322010397> (in Russ.)

3. Alamr, A. H. (2020). Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview. *Engineering Failure Analysis*, 116, Article 104735. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104735>

4. Mansoori, H., Mirzaee, R., Esmaeilzadeh, F. et. al. (2017). Pitting corrosion failure analysis of a wet gas pipeline. *Engineering Failure Analysis*, 82, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.08.012>

5. Menshikov, S. N., Melnikov, I. V., Baidin, I. I. et. al. (2020). Effectiveness of Soncor-9020 corrosion inhibitor: results of field tests at the low-temperature separation complex gas treatment plant, Yubileynoye oil, gas, and condensate field. *Gas Industry of Russia*, 809(11), 40-

47. (in Russ.)

6. Paolinelli, L. D., Brown, B., Simison, S. N. et al. (2012). Inhibition of CO₂ corrosion of carbon steel with 1% Cr. *Materials Chemistry and Physics*, 136(2-3), 1092-1102. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.08.055>

7. Slugin, P. P., Yagafarov, I. R., Kantyukov, R. R. et.al. (2023). Scientific analysis of the technical status and protection of well equipment and field pipelines of PJSC Gazprom under conditions of corrosive gas production and transportation. Part 1. *Gas Industry of Russia*, 854(9), 64-71. (in Russ.)

8. Nabutovsky, Z. A., Antonov, V. G., Filippov, A. G. (2020). Problems of corrosion and inhibitor protection at natural gas fields. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 17(3), 50-56. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9141839> (in Russ.)

9. Vigdorovich, V. I., Strelnikova, K. O. (2011). Criteria to assess the protective effectiveness of corrosion inhibitors. *Kondensirovannyye Sredy i Mezhfaznye Granitsy*, 13(1), 24-28. (in Russ.)

10. Slugin, P. P., Polyansky, A. V., Ermilov, O. M. (2018). Methods for increasing the recovery of condensate at the Bovanenkovskoye oil and gas condensate field. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*, 73(1), 33-37. (in Russ.)

11. Koryakin, A. Yu, Kobychiev, V. F., Alexandrov, V. V. et al. (2019). Experience of modernization of technological equipment for gas preparation of the reserves of Achimov sequence of the Urengoy oil, gas and condensate field. *Gas Industry of Russia*, 782, 64-70. (in Russ.)

12. Prokopov, A. V., Istomin, V. A., Fedulov, D. M. et. al. (2019). Increasing the Efficiency of Hydrocarbons C₅+ Extraction from the Gas of Condensate Fields by a Low-Temperature Absorption Process. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 53(5), 886-892. <https://doi.org/10.1134/S0040579518050214>

13. STO Gazprom 9.3-007-2010 Corrosion protection. Methodology for laboratory testing of corrosion inhibitors for equipment for the production, transportation and processing of corrosive gas. – M.: Gazprom Expo, 2011. – P. 91. (in Russ.)

14. Kassenova, Zh. S. (2021). Study of Portioning of Corrosion Inhibitors between

Water and Oil Phases. *Science and Technology of Hydrocarbons*, 132(1), 15-18. <https://doi.10.32935/1815-2600-2021-132-1-15-18> (in Russ.)

15. Hernández Zarate K. A., Guzmán Castañeda J. I., Cosmes López L.J. et. al. (2023). A new method to estimate the partition of corrosion inhibitors. *Corrosion Reviews*, 42(3), 331-340. <https://doi.10.1515/corr-rev-2023-0040>

16. Kolosov, V. M., Vlasova, G. V., Pivovarova, N. A. et al. (2019). Problems of sediment formation in technological equipment in the processing of gas condensate. *Gas Industry of Russia*, 781(3), 73-82. (in Russ.)

17. Murav'eva, S. A., Mel'nikov, V. G. (2005). Effect of the structure of nitrogen-containing compounds on their defoaming and demulsifying abilities. *Theoretical foundations of chemical engineering*, 39(1), 81–84. <https://doi.10.1007/pl00022165>

18. Romanova, Yu. N., Musina, N. S., Maryutina, T. A. (2018). The impact of different types of wave action on the destruction of stable gel-containing water-oil emulsions. Industrial laboratory. *Diagnostics of materials*, 84(7), 7-15. <https://doi.10.26896/1028-6861-2018-84-7-7-15> (in Russ.)

19. Lekomtsev, A. V., Stepanenko, I. B., Derendyaev, K. A. et al. (2021). Investigation of Ultrasonic Impact Technology for Breaking Stable Water-Oil Emulsions in Phase Inversion Conditions. *Chemical and Petroleum Engineering*, 57, 3-9. <https://doi.10.1007/s10556-021-00886-0> (in Russ.)

20. Vagapov, R. K., Zapevalov, D. N. (2020). Inhibitor Corrosion Protection for Gas Production Facilities with Carbon Dioxide Presence: Application Feasibility and Technology

Selection. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*, 81(1), 72-79. (in Russ.)

21. Askari, M., Aliofkhazraei, M., Ghaffari, S. et. al. (2018). Film former corrosion inhibitors for oil and gas pipelines - A technical review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 58, 92-114. <https://doi.10.1016/j.jngse.2018.07.025>

22. Shamsa, A., Barker, R., Hua, Y. et. al. (2020). Performance evaluation of an imidazoline corrosion inhibitor in a CO₂-saturated environment with emphasis on localised corrosion. *Corrosion Science*, 176, Article 108916. <https://doi.10.1016/j.corsci.2020.108916>

23. Papavinasam, S., Revie, R.W., Attard, M. et. al. (2003). Comparison of Laboratory Methodologies to Evaluate Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Pipelines. *Corrosion*, 59(10), 897-912. <https://doi.10.5006/1.3287711>

24. De Marco R., Durnie W., Jefferson A. et. al. (2002). Persistence of Carbon Dioxide Corrosion Inhibitors. *Corrosion*, 58(4), 354-363. <https://doi.10.5006/1.3287686>

25. Vagapov, R. K., Ibatullin, K. A., Yarkovoy, V. V. (2023). Simulation of the Modes of Medium Flow Movement through a Gas Pipeline during Corrosion Tests. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 89(10), 40-46. <https://doi.10.26896/1028-6861-2023-89-10-40-46> (in Russ.)

26. De Marco, R., Durnie, W., Jefferson, A. et. al. (2001). Surface Analysis of Adsorbed Carbon Dioxide Corrosion Inhibitors. *Corrosion*, 57(1), 9-18. <https://doi.10.5006/1.3290335>

27. Menendez, C. M., Bojes, J. M., Lerbscher, J. (2011). Obtaining Batch Corrosion Inhibitor Film Thickness Measurements Using an Optical Profiler. *Corrosion*, 67(3), 035003-1 - 035003-12. <https://doi.10.5006/1.3560117>

Информация об авторах

Артур Дамирович Гайзуллин, м.н.с., Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»), Московская область, Российская Федерация

Руслан Кизитович Вагапов, д.т.н., к.х.н., начальник лаборатории, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская область, Российская Федерация

Information about authors

Artur D. Gaizullin, junior scientist, Limited-liability company «Gazprom VNIIGAZ», Moscow region, Russian Federation

Ruslan K. Vagapov, Doc. of Technical Sciences, Cand. Sci. in Chemistry, Head of Laboratory, Limited-liability company «Gazprom VNIIGAZ», Moscow region, Russian Federation



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ
ЗАЩИТЫ**

**MATERIALS AND EQUIPMENT FOR
CORROSION PROTECTION**

Article type: original

Тип статьи: научная, оригинальная

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-2>

**Оценка термического повреждения ткани при использовании
электрохирургического инструмента с износостойкими покрытиями**

**А.К. Евсеев¹✉, Н.А. Поляков², И.Н. Мягкова³, И.В. Горончаровская¹,
И.И. Кирсанов¹, А.Б. Дровосеков², А.А. Каниболоцкий¹, А.А. Саприн¹**

¹Научно-исследовательский институт скорой помощи имени Н.В. Склифосовского
Департамента здравоохранения города Москвы,
РФ, 129090, г. Москва, Большая Сухаревская площадь, 3, стр. 1

²Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН,
РФ, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4

³Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,
РФ, 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9

e-mail: evseevak@sklif.mos.ru

Аннотация. В качестве функциональных покрытий электрохирургического инструмента исследованы покрытия Cr-наноалмаз, WC, а также сплавы Ni-P и Ni-W-P. В модельных экспериментах было показано, что использование покрытий Ni-P (15,6 ат.% P) и Ni-W-P (1,4 ат.% W; 12,6 ат.% P) приводило к снижению глубины термического поражения по сравнению с непокрытым инструментом. Было предположено, что функциональные свойства покрытий зависят от сочетания многих факторов, в том числе микротвердости, шероховатости, электропроводности, однако вклад того или иного фактора требует более тщательного изучения.

Ключевые слова: электрохирургия, сплав Ni-P, сплав Ni-W-P, Cr-наноалмаз, WC

Для цитирования: Евсеев А.К., Поляков Н.А., Мягкова И.Н., Горончаровская И.В., Кирсанов И.И., Дровосеков А.Б., Каниболоцкий А.А., Саприн А.А. Оценка термического повреждения ткани при использовании электрохирургического инструмента с износостойкими покрытиями // Практика противокоррозионной защиты. – 2025. – Т. 30, № 1 – С. 21-29. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-2>

Статья получена 12.11.2024. Принята к публикации 15.02.2025. Опубликовано 01.03.2025.

Конфликт интересов. Поляков Н.А. является членом редакционной коллегии журнала «Практика противокоррозионной защиты» с 2010 г., но не имеет отношения к решению опубликовать данную статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

**Evaluation of Thermal Tissue Damage Using
an Electrosurgical Instrument with Wear-Resistant Coatings**

**Anatoly K. Evseev¹✉, Nikolai A. Polyakov², Inna N. Myagkova³,
Irina V. Goroncharovskaya¹, Iliya I. Kirsanov¹, Andrey B. Drovosekov²,
Alexander A. Kanibolotsky¹, Artem A. Saprin¹**

¹Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine,
bld. 1, 3, B. Sukharevskaya square, Moscow, 129090, Russian Federation

²Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences,
bld. 4, 31, Leninskiy pr., Moscow, 119071, Russian Federation

³Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation

e-mail: evseevak@sklif.mos.ru

Abstract. Cr-nanodiamond, WC, and Ni-P and Ni-W-P alloys were studied as functional coatings for electrosurgical instruments. Model experiments showed that the use of Ni-P (15.6 at.% P) and Ni-W-P (1.4 at.% W; 12.6 at.% P) coatings resulted in a decrease in the depth of thermal damage compared to an uncoated instrument. It was suggested that the functional properties of the coatings depend on a combination of many factors, including microhardness, roughness, and electrical conductivity; however, the contribution of any given factor requires more detailed study.

Keywords: electrosurgery, Ni-P alloy, Ni-W-P alloy, Cr-nanodiamond, WC

For citation: Evseev, A. K., Polyakov, N. A., Myagkova, I. N., Goroncharovskaya, I. V., Kirsanov, I. I., Drovosekov, A. B., Kanibolotsky, A. A. & Saprin, A. A. (2025). Evaluation of Thermal Tissue Damage Using an Electrosurgical Instrument with Wear-Resistant Coatings. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 30(1), 21-29. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-2>

Received November 12, 2024. Accepted for publication February 15, 2025. Published March 01, 2025.

Conflict of interest. Polyakov N.A. has been a member of the editorial board of the journal "Theory and Practice of Corrosion Protection" since 2010, but was not involved in the decision to publish this article. The article passed the journal's peer review procedure. The authors declared no other conflicts of interest.

Введение

В современной оперативной практике одними из наиболее часто применяемых являются электрохирургические методики, основанные на разрушении биологических тканей переменным током высокой частоты (свыше 200 кГц) за счет его преобразования в тепловую энергию и локального разогрева инструмента до температур выше 100 °C [1]. Несмотря на ряд преимуществ электрохирургии (быстрота операции, минимизация оперативного вмешательства, снижение риска развития послеоперационных осложнений), в процессе эксплуатации происходит образование нагара и налипания тканей, что, в свою очередь, приводит к снижению эффективности процесса и влияет на состоятельность гемостаза и глубину термического поражения ткани [2, 3]. Данное обстоятельство требует либо замены инструмента во время операции на новый, либо его очистки с применением абразивных материалов, что, из-за повышения шероховатости, приводит к ухудшению его эксплуатационных характеристик [4].

Одним из подходов к улучшению функциональных свойств электрохирургического инструмента [5] является использование покрытий с величиной микротвердости, превосходящей нержавеющую сталь (как основного материала электродов). Исследования возможности использования покрытий на основе оксидов металлов (Cr_2O_3 , CrO_x , ZrO_x , TiO_2) [6-8], нитридов металлов (CrN , $CrWN_x$, ZrN , TiN) [4, 9] и алмазоподобного углерода [10, 11] показали перспективность развития данной технологии. В боль-

шинстве случаев такие покрытия наносят с применением метода магнетронного распыления, который является весьма дорогостоящим. С экономической точки зрения более выгодным является использование электрохимических технологий для получения функциональных покрытий электрохирургического инструмента с высокими показателями микротвердости и износостойкости. Например, возможно получение химико-каталитических покрытий на основе сплава Ni-P с величиной микротвердости до 10 ГПа [12] и электролитических хромовых покрытий с ультрадисперсным алмазом Cr/C с микротвердостью 16...20 ГПа [13], что значительно превосходит микротвердость материала электрохирургического инструмента (3,7 ГПа [7]). Коррозионно-защитные свойства таких покрытий [14] также могут положительно влиять на эксплуатационные характеристики инструмента.

Целью работы является оценка термического поражения при использовании электрохирургического инструмента с функциональными покрытиями сплавами Ni-P, Ni-W-P, Cr/C и WC.

Материалы и методы

Технология нанесения покрытий

Покрытия наносили на электрохирургические ножи (Shenzhen EMS Life Medical Technology Co., Ltd, КНР).

Осаждение химико-каталитических покрытий Ni-P и Ni-W-P проводили по методике [14]. Покрытия Ni-P получали из раствора химико-каталитического никелирования следующего состава (г/л):

$NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 25; $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ – 10; глицин – 15; $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ – 30; $PbCl_2$ – 2 ppm; pH 5,5 (NaOH); $t = 90$ °C. Покрытия *Ni-W-P* осаждали из раствора с глицином и яблочной кислотой в качестве лигандов. Состав раствора (г/л): $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 14; $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ – 8,25...33; глицин – 15; яблочная кислота – 3,38...13,41; $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ – 31,8; $PbCl_2$ – 2 ppm; pH 7,0 (NaOH); $t = 90$ °C. Вольфрамат натрия и яблочную кислоту вводили в раствор в виде растворенной в воде эквимольной смеси. 1 литр такой смеси содержал 0,5 М (165 г/л) $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ и 0,5 М (67 г/л) яблочной кислоты. Толщина покрытий составляла 15 мкм.

Перед химико-каталитическим осаждением покрытий *Ni-P* и *Ni-W-P* на электрохирургические ножи, последние подвергали предварительной подготовке, состоящей в обезжиривании 96 %-ным этанолом и предварительном электрохимическом никелировании в электролите следующего состава: $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 200 г/л; HCl (35 %-ная) – 200 мл/л; температура 18...25 °C; $i_k = 5$ А/дм²; продолжительность 5 минут (за это время на электрохирургических ножках образовывалось никелевое покрытие толщиной 0,5 мкм). Предварительное никелирование было необходимо для обеспечения прочной адгезии химико-каталитических покрытий к материалу основы (нержавеющая сталь).

Состав сплавов *Ni-P* и *Ni-W-P* определяли электронно-зондовым рентгено-спек-

тральным микроанализом на сканирующем электронном микроскопе JSM U3 фирмы “JEOL” (Япония) с энергодисперсионным спектрометром WinEDS фирмы “Eumex” (ФРГ). Соотношение компонентов в полученных покрытиях представлено в табл. 1.

Покрытия хром-наноалмаз наносили электрохимически из концентрированных сульфатно-оксалатных растворов *Cr(III)*, г/л: $KCr(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ – 250, $Na_2C_2O_4$ – 30...40, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ – 100...110, NaF – 20, pH 1,1...1,5, в которые вводили добавку нанодисперсных частиц алмаза детонационного синтеза в количестве 1 г/л. Подготовка растворов-суспензий включала термообработку свежеприготовленных растворов при 90 °C в течение 30 минут и ультразвуковую обработку в течение 15 минут перед электролизом. Нанесение покрытий проводили при температуре раствора-суспензии 40 °C, катодной плотности тока 50 А/дм² и интенсивном перемешивании с помощью магнитной мешалки [13].

Покрытие *WC* наносили методом химического газофазного осаждения по методике [15].

В качестве контрольного образца использовали электрод без покрытия.

Модельный эксперимент

Оценку эксплуатационных свойств электрохирургического инструмента с покрытиями проводили в модельном экс-

Таблица 1. Элементарный состав покрытий на основе сплава *Ni-P*

Table 1. Elemental composition of coatings based on *Ni-P* alloy

Покрытие / Coating	Концентрация $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ в растворе, г/л / Concentration of $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ in solution, g/l	Содержание элементов в покрытиях, ат. % / Content of elements in coatings, at. %		
		Ni	W	P
<i>Ni-P</i>	-	84,4	-	15,6
<i>Ni-W-P</i>	8,25	86,0	1,4	12,6
	16,5	82,6	2,3	15,1
	24,75	84,1	3,3	12,6
	33,0	86,1	3,1	10,8

перименте на образце мышечной ткани бедра крупного рогатого скота. В работе использовали электрохирургический аппарат ARC 350 (BOWA, Германия) в монополярном режиме «Резание» (100 В). Электрохирургическим инструментом осуществляли разрез длиной 5 см. При этом проводили качественную оценку налипания ткани и сопротивления резу.

Гистологическое исследование

Для гистологического исследования из средней части разреза выделяли участок ткани и помещали в фиксирующий раствор (формалин 10% забуференный). Кассеты с образцами тканей помещали в гистопроцессор карусельного типа, где после стандартной процедуры дегидратации и заливки парафином формировали парафиновые блоки. Из подготовленных блоков было изготовлено по 3 продольных серийных среза толщиной 8...10 мкм. Окрашивание депарафинизированных срезов гематоксилин-эозином проводили по стандартной методике. Анализу подвергали отсканированные изображения срезов. Глубину термического поражения оценивали по 5 точкам вдоль зоны разреза.

Статистический анализ

Статистический анализ данных проводили с помощью пакета программы Statistica 10 (StatSoft, США) и MS Excel (Microsoft, США). Описательную статистику количественных признаков представили в виде $M \pm SD$ (среднее $\pm$ стандартное отклонение). Сопоставление исследуемых групп проводили с использованием U -критерия Манна-Уитни. Статистически значимыми считали различия при значениях $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

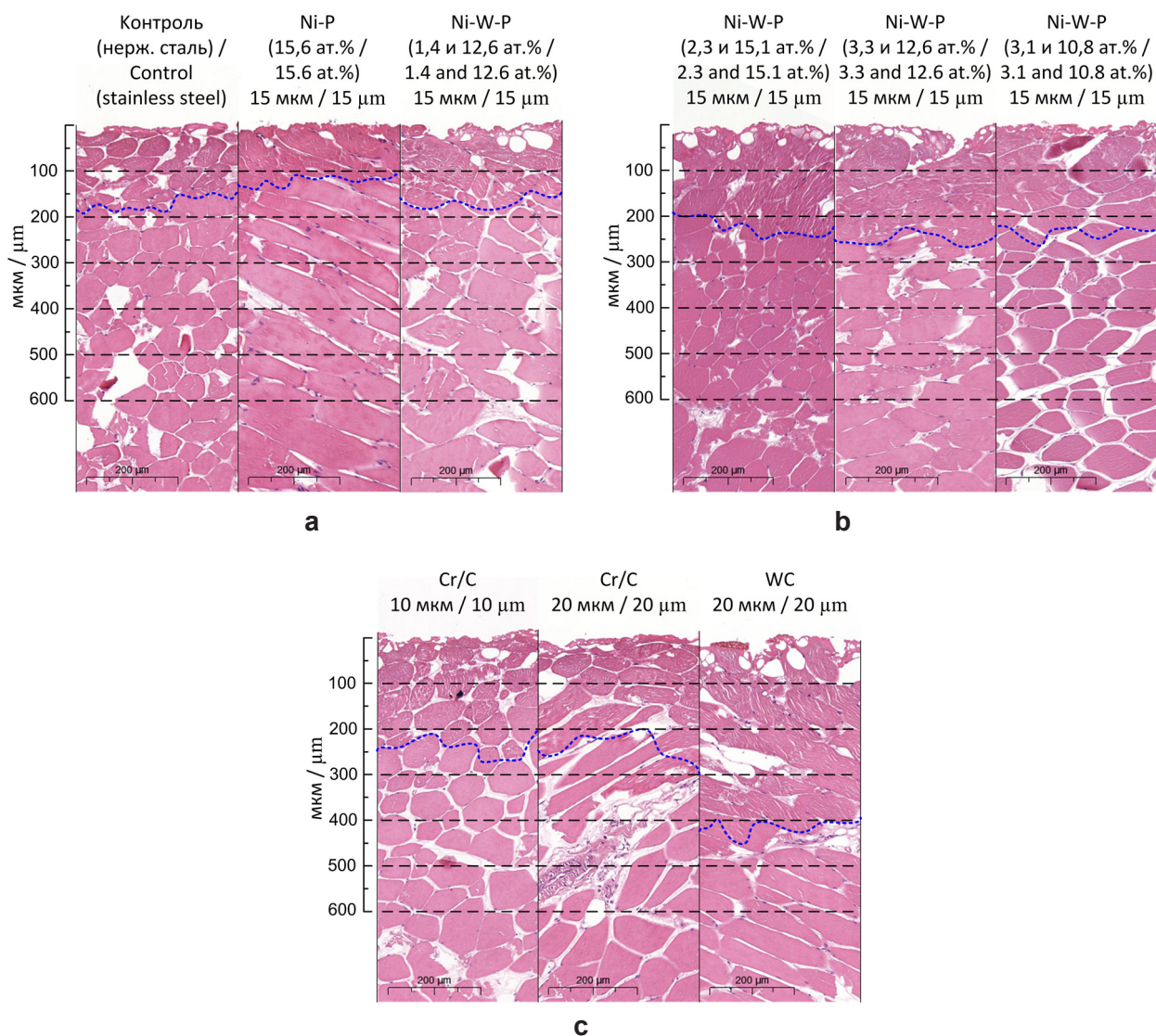
В ходе проведения модельного эксперимента при оценке качественных характеристик электрохирургического инструмента с покрытиями было отмечено, что покрытия на основе $Ni-P$ обладают меньшей склонностью к налипанию ткани и оказывают меньшее сопротивление резу по сравнению с электродом без покрытия (табл. 2). По удобству применения наилучшим показал себя электрод с покрытием $Ni-P$ (15,6 ат.% P). Электроды с покрытиями $Ni-W-P$, в целом, соответствовали контролю, только для

электрода с покрытием $Ni-W-P$ (3,1 ат.% W ; 10,8 ат.% P) отмечали более сильное налипание ткани по сравнению с электродом без покрытия. Электроды с износостойкими покрытиями Cr/C и WC в свою очередь оказались значительно менее эффективными, поскольку для них было характерно достаточно сильное налипание ткани, что увеличивало сопротивление резу.

При анализе гистологических срезов (рис. 1) во всех случаях наблюдали схожую картину воздействия электрохирургическим инструментом, проявляющуюся тонким поверхностным слоем высушенных клеток (10...20 мкм) и более глубоким распространением термического поражения (до 400 мкм), выражающегося в разрывании пучков мышечных волокон и исчезновении ядер (рис. 2).

Было показано, что данные по глубине термического поражения согласуются с полученными качественными характеристиками электродов (табл. 2). Анализ глубины термического поражения показал, что, по сравнению с электродом без покрытия, наименьшая глубина поражения наблюдалась в случае использования электрода с покрытием $Ni-P$ (15,6 ат.% P) и составляла $134,88 \pm 17,59$ мкм ($p = 0,032$). Более глубокие поражения в диапазоне от $168,26 \pm 14,58$ до $228,72 \pm 16,36$ мкм фиксировали при использовании электродов с покрытиями $Ni-W-P$. При этом, данные для электрода с покрытием $Ni-W-P$ (1,4 ат.% W ; 12,6 ат.% P) были сопоставимы с контролем, $168,26 \pm 14,58$ мкм и $169,76 \pm 13,15$ мкм соответственно. Для электродов с покрытиями Cr/C глубина термического поражения была сопоставима с покрытиями $Ni-W-P$ с содержанием W 3,1...3,3 ат.%. Однако использование ножей с покрытием Cr/C сопровождалось более высоким сопротивлением резу и налипанием ткани. Для электродов с покрытием WC глубина термического поражения более чем в 2 раза превышала результаты, полученные на контрольном образце, кроме того, отмечали значительное сопротивление резу и налипание ткани. Таким образом, данное покрытие характеризовалось наихудшими показателями среди исследованных образцов.

Было показано, что данные по глубине термического поражения согласуются с полученными качественными характеристи-



**Рис. 1. Микрофотографии гистологических срезов.
Синий пунктир – визуальная граница термического повреждения**

**Fig. 1. Micrographs of histological sections.
Blue dotted line – visual border of thermal damage**

ками электродов (табл. 2). Несмотря на то, что эти результаты носят сугубо субъективный характер, отражающий мнение специалиста, проводящего операцию, они могут служить дополнительным параметром оценки инструмента. Так, в ходе проведения модельного эксперимента было отмечено, что покрытия на основе *Ni-P* обладают меньшей склонностью к налипанию ткани и оказывают меньшее сопротивление резу по сравнению с электродом без покрытия. По удобству применения наилучшим показал себя электрод с покрытием *Ni-P* (15,6 ат.% *P*). Электроды с покрытиями *Ni-W-P*, в целом, соответствовали контрольному образцу, только для электрода

с покрытием *Ni-W-P* (3,1 ат.% *W*; 10,8 ат.% *P*) отмечали более сильное налипание ткани по сравнению с электродом без покрытия. Электроды с износостойкими покрытиями *Cr/C* и *WC* в свою очередь оказались значительно менее эффективными, поскольку для них было характерно достаточно сильное налипание ткани, что увеличивало сопротивление резу.

Обсуждение

Полученные нами данные могут свидетельствовать о сложном характере влияния свойств покрытий на их функциональные характеристики. Так, несмотря на высокое

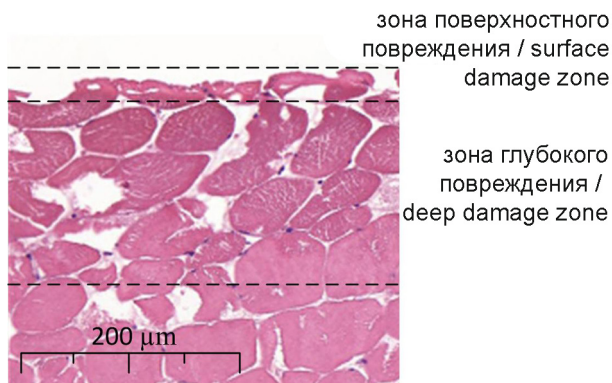


Рис. 2. Микрофотография гистологического среза со схематичным изображением зон повреждения

Fig. 2. Micrograph of a histological section with a schematic representation of the damaged areas

Таблица 2. Характеристики электрохирургического инструмента в модельном эксперименте

Table 2. Characteristics of the electrosurgical instrument in the model experiment

Покрытие / Coating	Налипание ткани / Fabric sticking	Сопротивление резу / Cutting resistance	Глубина термического поражения, мкм / Depth of thermal damage, μm	p-критерий / P-value
Контроль / Control	-	-	169,76±13,15	
Ni-P (15,6 ат.% P)	↓	↓	134,88±17,59	0,032*
Ni-W-P (1,4 ат.% W; 12,6 ат.% P)	—	—	168,26±14,58	1,000
Ni-W-P (2,3 ат.% W; 15,1 ат.% P)	—	—	204,74±15,17	0,016*
Ni-W-P (3,3 ат.% W; 12,6 ат.% P)	—	—	228,72±16,36	0,008*
Ni-W-P (3,1 ат.% W; 10,8 ат.% P)	↑	—	226,62±13,16	0,008*
Cr/C (10 мкм)	↑	↑	229,58±14,72	0,008*
Cr/C (20 мкм)	↑	↑	226,72±17,37	0,008*
WC	↑↑	↑↑	409,38±15,33	0,008*

Примечание. ↓ – ниже по сравнению с контролем, ↑ – выше по сравнению с контролем, — – сопоставимо с контролем. * – различия статистически достоверны ($p < 0,05$)

значение микротвердости покрытия *WC* по сравнению с покрытиями *Ni-P* и *Ni-W-P* [16], оно показало неудовлетворительные результаты в модельных экспериментах, что может быть связано с более низкой электропроводностью [17], по сравнению со сплавами на основе *Ni-P* [18, 19] и хромом, что приводит к большему разогреву поверхности инструмента и, как следствие, увеличению нагара. Для покрытий на основе *Ni-W-P* от-

мечено некоторое увеличение глубины термического поражения с ростом содержания *W* в покрытии. Известно, что увеличение содержания *W* в сплавах *Ni-W-P* приводит к повышению их твердости и износостойкости [20], т.е. предполагаемое нами ранее увеличение микротвердости покрытий имеет ограничения, когда излишнее повышение твердости приводит к ухудшению характеристик. Возможно, что данное явление связано с

увеличением шероховатости покрытий при увеличении их твердости и увеличением коэффициента трения. Схожая картина может наблюдаться и в случае композита хром-на-ноалмаз, когда наличие абразивных частиц наноналмаза на поверхности покрытия приводит к повышению шероховатости.

Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о перспективности применения функциональных покрытий для улучшения характеристик электрохирургического инструмента. Многофакторность влияния свойств покрытия (микротвердость, шероховатость, электропроводность) на конечные рабочие характеристики инструмента открывают обширную область для исследований и подбора покрытий электрохирургического инструмента.

Литература

1. Massarweh N.N., Cosgriff N., Slakey D.P. Electrosurgery: History, Principles, and Current and Future Uses // *Journal of the American College of Surgeons*. – 2006. – V. 202, № 3, – P. 520-530. <https://doi.10.1016/j.jamcollsurg.2005.11.017>
2. Palanker D., Vankov A., Jayaraman P. On mechanisms of interaction in electrosurgery // *New Journal of Physics*. – 2008. – V. 10. Article ID 123022. <https://doi.10.1088/1367-2630/10/12/123022>
3. Zheng L., Wan J., Long Y., Fu H., Zheng J., Zhou Z. Effect of high-frequency electric distributions on the tissue sticking of minimally invasive electrosurgical devices // *Royal Society open science*. – 2018. – V. 5, № 7. – Article ID 180125. <https://doi.10.1098/rsos.180125>
4. Cruz R.L., Nascimento C.D., Souza E.G., Aguzzoli C., Moraes A.C.B.K., Lund R.G. On the Adhesion of Protein in Nitrided Metallic Coatings for Electrosurgical Electrodes of Stainless Steel // *Materials Research*. – 2022. – № 25. – Article ID e20210547. <https://doi.org/10.1557/JMR.1997.0410>
5. Мягкова И.Н., Евсеев А.К., Поляков Н.А., Дровосеков А.Б., Горончаровская И.В., Шабанов А.К. Физико-химические подходы к улучшению характеристик электрохирургического инструмента // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. – 2022. – Т. 65, № 10. – С. 6-13. <https://doi.10.6060/ivkkt.20226510.6649>
6. Lo J.L., Shieu F.S., Hung C.C. Characterization of textured Cr₂O₃ layer formed on AISI440A stainless steel via anisotropic electropolishing for electrosurgical instruments. // *Material Research Express*. – 2019. – V. 6. – Article 025402. <https://doi.10.1088/2053-1591/aaec5e>
7. Hsu Y.L., Lee C.H., Chiu S.M., Sung Y.C., Yang K.Y., Chu C.W. Anti-sticking Properties of PVD CrWN_x, CrO_x and ZrO_x Coatings on Medical Electrode Application // *Defect and Diffusion Forum*. – 2010. – V. 297, № 301. – P. 656-663. <https://doi.10.4028/www.scientific.net/DDF.297-301.656>
8. Han Z., Fu J., Feng X., Niu S., Zhang J., Ren L. Bionic anti-adhesive electrode coupled with maize leaf microstructures and TiO₂ coating // *RSC Advances*. – 2017. – V. 7, № 72. – P. 45287-45293. <https://doi.10.1039/C7RA08184G>
9. Ou K.L., Chu J.C., Hosseinkhani H., Chiou J.F., Yu C.H. Biomedical nanostructured coating for minimally invasive surgery devices applications: characterization, cell cytotoxicity evaluation and an animal study in rat // *Surgical Endoscopy*. – 2014. – V. 28, № 7. – P. 2174-2188. <https://doi.10.1007/s00464-014-3450-9>
10. Konesky G. Porosity Evolution in Electrosurgical Blade Coatings. // *MRS Online Proceedings Library*. – 1998. – V. 550. – P. 249-254. <https://doi.10.1557/PROC-550-249>
11. Shen Y.D., Lin L.H., Chiang H.J., Ou K.L., Cheng H.Y. Research of electrosurgical unit with novel antiadhesion composite thin film for tumor ablation: Microstructural characteristics, thermal conduction properties, and biological behaviors // *Journal of biomedical materials research. Part B, Applied biomaterials*. – 2016. – V. 104, № 1. – P. 96-105. <https://doi.10.1002/jbm.b.33363>
12. Винокуров Е.Г., Бурухина Т.Ф., Скопинцев В.Д., Васильев В.В., Графушин Р.В. Обзор и анализ разработок и исследований трибологических характеристик покрытий Ni-P как альтернатива хромовым покрытиям // *Гальванотехника и обработка поверхности*. – 2023. – Т. 31, № 1. – С.19-35. https://doi.10.47188/0869-53262023_31_1_19
13. Polyakov N.A. Formation of chromium composite electrochemical coatings from sulfate oxalate solutions based on Cr(III) // *Russian Journal of Electrochemistry*. – 2016.

– V. 52, № 9. – P. 858-872. <https://doi.org/10.1134/S1023193516090081>

14. Дровосеков А.Б. Сравнение коррозионно-защитных свойств химикокаталитических покрытий Ni-P и Ni-W-P // Практика Противокоррозионной Защиты. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 66-71. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2020.96.2-8>

15. Dushik V.V., Ruban E.A., Shaporenkov A.A., Drovosekov A.B., Rozhanskii N.V., Gladkikh N.A. Mechanical Properties and Corrosion–Electrochemical Behavior of Multilayer Coatings of the Ni–P and W–C System Obtained by the Electroless Plating Method and Chemical Vapor Deposition. Part 1. Structure and Mechanical Properties of Coatings // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2022. – V. 58, № 7. – P. 1301-1306. <https://doi.org/10.1134/S207020512207004>

16. Dushik V.V., Ruban E.A., Drovosekov A.B., Shaporenkov A.A., Rozhanskiy N.V. Synergistic Effect in Ni–P–W and W–C Multilayer Coating Systems Obtained by Chemical-Catalytic Metallization and Chemical-Vapor Deposition // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques – 2023. – V. 17. – P. 1367-1371. <https://doi.org/10.1134/S1027451023060265>

17. Taylor K.A. Ancillary properties of vapor-deposited carbide coatings // Thin Solid Films. – 1977. – V. 40. – P. 201-209. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(77\)90119-5](https://doi.org/10.1016/0040-6090(77)90119-5)

18. Jensen J.A.D., Møller P., Bruton T., Mason N., Russell R., Hadley J., Verhoeven P., Matthewson A. Electrochemical Deposition of Buried Contacts in High-Efficiency Crystalline Silicon Photovoltaic Cells // Journal of The Electrochemical Society. – 2003. – V. 150, № 1. – G49-G57. <https://doi.org/10.1149/1.1528943>

19. Weil R., Parker K. The Properties of Electroless Nickel // In: Electroless Plating: Fundamentals and Applications (Eds. Mallory G.O., Hajdu J.B.). – NY: William Andrew, 1990. – P. 111-137.

20. Palaniappa M., Seshadri S.K. Friction and wear behavior of electroless Ni–P and Ni–W–P alloy coatings // Wear. – 2008. – V. 265. – P. 735-740. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.002>

References

1. Massarweh, N. N., Cosgriff, N. & Slakey,

D. P. (2006). Electrosurgery: History, Principles, and Current and Future Uses. *Journal of the American College of Surgeons*, 202(3), 520-530. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2005.11.017>

2. Palanker, D., Vankov, A. & Jayaraman, P. (2008). On mechanisms of interaction in electrosurgery. *New Journal of Physics*, 10. Article ID 123022. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/10/12/123022>

3. Zheng, L., Wan, J., Long, Y., Fu, H., Zheng, J. & Zhou, Z. (2018). Effect of high-frequency electric distributions on the tissue sticking of minimally invasive electrosurgical devices. *Royal Society open science*, 5(7). Article ID 180125. <https://doi.org/10.1098/rsos.180125>

4. Cruz, R. L., Nascimento, C. D., Souza, E. G., Aguzzoli, C., Moraes, A. C. B. K. & Lund, R. G. (2022). On the Adhesion of Protein in Nitrided Metallic Coatings for Electrosurgical Electrodes of Stainless Steel. *Materials Research*, (25). Article ID e20210547. <https://doi.org/10.1557/JMR.1997.0410>

5. Myagkova, I. N., Evseev, A. K., Polyakov, N. A., Drovosekov, A. B., Goroncharovskaya, I. V. & Shabanov, A. K. (2022). Physico-chemical approaches to improve the characteristics of electrosurgical instruments. *Chem-ChemTech*, 65(10), 6-13. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226510.6649> (in Russ.)

6. Lo, J. L., Shieu, F. S. & Hung, C. C. (2019). Characterization of textured Cr₂O₃ layer formed on AISI440A stainless steel via anisotropic electropolishing for electrosurgical instruments. *Material Research Express*, 6. Article 025402. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaec5e>

7. Hsu, Y. L., Lee, C. H., Chiu, S. M., Sung, Y. C., Yang, K. Y. & Chu, C. W. (2010). Anti-sticking Properties of PVD CrW_N, CrO_x and ZrO_x Coatings on Medical Electrode Application. Defect and Diffusion Forum, 297(301), 656-663. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.297-301.656>

8. Han, Z., Fu, J., Feng, X., Niu, S., Zhang, J. & Ren, L. (2017). Bionic anti-adhesive electrode coupled with maize leaf microstructures and TiO₂ coating. *RSC Advances*, 7(72), 45287-45293. <https://doi.org/10.1039/C7RA08184G>

9. Ou K. L., Chu J. C., Hosseinkhani H., Chiou J. F. & Yu C. H. (2014). Biomedical nanostructured coating for minimally invasive surgery devices applications: characterization, cell cytotoxicity evaluation and an animal study

in rat. *Surgical Endoscopy*, 28(7), 2174-2188. <https://doi.org/10.1007/s00464-014-3450-9>

10. Konesky, G. (1998). Porosity Evolution in Electrosurgical Blade Coatings. *MRS Online Proceedings Library*, 550, 249-254. <https://doi.org/10.1557/PROC-550-249>

11. Shen, Y. D., Lin, L. H., Chiang, H. J., Ou, K. L. & Cheng, H. Y. (2016). Research of electrosurgical unit with novel antiadhesion composite thin film for tumor ablation: Microstructural characteristics, thermal conduction properties, and biological behaviors. *Journal of biomedical materials research. Part B, Applied biomaterials*, 104(1), 96-105. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33363>

12. Vinokurov, E. G., Burukhina, T. F., Skopintsev, V. D., Vasiliev, V. V. & Grafushin, R. V. (2023). Review and analysis of developments and studies of tribological characteristics of Ni-P coatings as an alternative to chromium coatings. *Galvanotechnics and surface treatment*, 31(1), 19-35. https://doi.org/10.47188/0869-53262023_31_1_19 (in Russ.)

13. Polyakov, N. A. (2016). Formation of chromium composite electrochemical coatings from sulfate oxalate solutions based on Cr(III). *Russian Journal of Electrochemistry*, 52(9), 858-872. <https://doi.org/10.1134/S1023193516090081>

14. Drovosekov, A. B. (2020). Comparison of corrosion-protective properties of chemical-catalytic coatings Ni-P and Ni-W-P. *Practice of Anti-Corrosion Protection*, 25(2), 66-71. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2020.96.2-8> (in Russ.)

15. Dushik, V. V., Ruban, E. A., Shaporenkov, A. A., Drovosekov, A. B., Rozhanskii, N. V. & Gladkikh, N. A. (2022). Mechanical Proper-

ties and Corrosion-Electrochemical Behavior of Multilayer Coatings of the Ni-P and W-C System Obtained by the Electroless Plating Method and Chemical Vapor Deposition. Part 1. Structure and Mechanical Properties of Coatings. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 58(7), 1301-1306. <https://doi.org/10.1134/S207020512207004>

16. Dushik, V. V., Ruban, E. A., Drovosekov, A. B., Shaporenkov, A. A. & Rozhanskii, N. V. (2023). Synergetic Effect in Ni-P-W and W-C Multilayer Coating Systems Obtained by Chemical-Catalytic Metallization and Chemical-Vapor Deposition. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 17, 1367-1371. <https://doi.org/10.1134/S1027451023060265>

17. Taylor, K. A. (1977). Ancillary properties of vapor-deposited carbide coatings. *Thin Solid Films*, 40, 201-209. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(77\)90119-5](https://doi.org/10.1016/0040-6090(77)90119-5)

18. Jensen, J. A. D., Møller, P., Bruton, T., Mason, N., Russell, R., Hadley, J., Verhoeven, P., & Matthewson, A. (2003). Electrochemical Deposition of Buried Contacts in High-Efficiency Crystalline Silicon Photovoltaic Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 150(1), G49-G57. <https://doi.org/10.1149/1.1528943>

19. Weil, R., Parker, K. (1990). The Properties of Electroless Nickel/ In: *Electroless Plating: Fundamentals and Applications* (Eds. Mallory G.O., Hajdu J.B.). NY: William Andrew, 111-137.

20. Palaniappa, M., Seshadri S.K. (2008). Friction and wear behavior of electroless Ni-P and Ni-W-P alloy coatings. *Wear*, 265, 735-740. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.002>

Информация об авторах

Евсеев Анатолий Константинович, д.х.н., в.н.с., Научно-исследовательский институт скорой помощи имени Н.В. Склифосовского Департамента здравоохранения города Москвы (НИИ СП имени Н.В. Склифосовского ДЗМ), г. Москва, Российская Федерация

Поляков Николай Анатольевич, к.х.н., заведующий лабораторией, Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН), г. Москва, Российская Федерация

Мягкова Инна Николаевна, аспирант, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

Горончаровская Ирина Викторовна, к.х.н., с.н.с., НИИ СП имени Н.В. Склифосовского ДЗМ, г. Москва, Российская Федерация

Кирсанов Илья Игоревич, к.м.н., заведующий отделением, НИИ СП имени Н.В. Склифосовского ДЗМ, г. Москва, Российская Федерация

Дровосек Андрей Борисович, к.х.н., с.н.с., ИФХЭ РАН, г. Москва, Российская Федерация

Каниболоцкий Александр Алексеевич, к.м.н., заведующий отделением, НИИ СП имени Н.В. Склифосовского ДЗМ, г. Москва, Российская Федерация

Саприн Артем Анатольевич, заместитель главного врача по медицинской части, НИИ СП имени Н.В. Склифосовского ДЗМ, г. Москва, Российская Федерация

Information about authors

Anatoly K. Evseev, Doctor Sci. in Chemistry, Leading Researcher, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine (Sklifosovsky Institute), Moscow, Russian Federation

Nikolai A. Polyakov, Cand. Sci. in Chemistry, Head of Laboratory, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences (IPCE RAS), Moscow, Russian Federation

Inna N. Myagkova, Postgraduate, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

Irina V. Goroncharovskaya, Cand. Sci. in Chemistry, Senior Researcher, Sklifosovsky Institute, Moscow, Russian Federation

Iliya I. Kirsanov, Cand. Sci. in Medicine, Head of Department, Sklifosovsky Institute, Moscow, Russian Federation

Andrey B. Drovosekov, Cand. Sci. in Chemistry, Senior Researcher, IPCE RAS, Moscow, Russian Federation

Alexander A. Kanibolotskiy, Cand. Sci. in Medicine, Head of Department, Sklifosovsky Institute, Moscow, Russian Federation

Artem A. Saprin, Deputy Chief Physician for Medical Affairs, Sklifosovsky Institute, Moscow, Russian Federation



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ
ЗАЩИТЫ**

**MATERIALS AND EQUIPMENT FOR
CORROSION PROTECTION**

Article type: original

Тип статьи: научная, оригинальная

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-3>

**Влияние добавки алюминия на анодную устойчивость свинцового
баббита Б(PbSb15Sn10) в среде водного раствора NaCl**

И.Н. Ганиев✉, Р.З. Махмадуллоев, Х.М. Ходжаназаров, Х.О. Одиназода

Таджикский технический университет имени М.С. Осими,
Республика Таджикистан, 734042, г. Душанбе, ул. Раджабовых, д. 10

e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Аннотация. Отличительной особенностью баббитов всех видов является низкий индекс усталостного сопротивления, что может ухудшить технические характеристики подшипников. По этой причине материал используют для вкладышей, конструкцией которых предусматривается их установка в корпусе из черного металла (чугуна) или бронзы. Вкладыши с тонкими стенками устанавливают в ДВС, применяя штамповку из биметалла при заливке непрерывным методом. Величина срока эксплуатации подшипников определяется с учетом толщины слоя баббита, заливаемого на основу из металла. При этом срок эксплуатации вкладыша возрастает при уменьшении слоя баббита. Известно, что коррозия разрушает металл, но трудно представить, каков от нее общий ущерб. По оценкам специалистов различных стран эти потери в промышленно развитых странах составляют от 2 до 4% валового национального продукта. Потери металла, включающие массу вышедших из строя металлических конструкций, изделий, оборудования, составляют от 10 до 20% годового производства стали. В работе приведены результаты экспериментального исследования анодного поведения свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного алюминием (от 0,1 до 2,0 масс. %), в среде водного раствора NaCl. Показано, что добавка алюминия уменьшает скорость коррозии свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) на 20...30%. С ростом концентрации алюминия в исходном сплаве потенциалы коррозии, питтингообразования и репассивации смещаются в положительную область значений. Увеличение концентрации хлорид-иона в растворе NaCl способствует росту скорости коррозии сплавов, что сопровождается смещением в отрицательную область основных электрохимических потенциалов сплавов.

Ключевые слова: свинцовый баббит Б(PbSb15Sn10), алюминий, водный раствор NaCl, анодное поведение, потенциостатический метод, скорость коррозии, ток коррозии

Для цитирования: Ганиев И.Н., Махмадуллоев Р.З., Ходжаназаров Х.М., Одиназода Х.О. Влияние добавки алюминия на анодную устойчивость свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) в среде водного раствора NaCl // Практика противокоррозионной защиты. – 2025. – Т. 30, № 1 – С. 30-38. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-3>

Статья получена 12.08.2024. Принята к публикации 15.12.2024. Опубликовано 01.03.2025.

**Influence of Aluminum Additive on Anodic Stability of Lead Babbitt
B(PbSb15Sn10) in an Aqueous Solution of NaCl**

**Izatullo N. Ganiev✉, Rahmonali Z. Mahmadulloev,
Khayrullo M. Khojanazarov, Haydar O. Odinazoda**

Tajik Technical University named after M.S. Osimi,
10, Radjabov st., Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan

e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Abstract. A distinctive feature of all types of babbitts is their low fatigue resistance index, which can reduce the optionality of bearings. For this reason, the material is used on liners, the design of which provides for their installation in a housing made of ferrous metal (cast iron) or bronze. Inserts with thin walls are installed in the internal combustion engine using bimetal stamping and continuous casting. The service life of bearings is determined taking into account the size of the babbitt layer poured onto the metal base. In this case, the service life of the liner increases as the babbitt layer decreases. It is known that corrosion destroys metal,

but it is difficult to imagine how much overall damage it causes. According to experts from various countries, these losses in industrialized countries range from 2 to 4% of the gross national product. At the same time, metal losses, including a mass of failed metal structures, products, and equipment, amount to 10 to 20% of annual steel production. The paper presents the results of an experimental study of the anodic behavior of lead babbitt B($PbSb15Sn10$) doped with aluminum from 0.1 to 2.0 wt. %, in an aqueous solution of $NaCl$. It has been shown that the addition of aluminum reduces the corrosion rate of lead babbitt B($PbSb15Sn10$) by 20...30%. With increasing aluminum concentration in the initial alloy, the potentials of corrosion, pitting and repassivation shift to a positive range of values. An increase in the concentration of chloride ion in a $NaCl$ solution promotes an increase in the corrosion rate of alloys, which is accompanied by a shift to the negative region of the main electrochemical potentials of the alloys.

Keywords: lead babbitt B($PbSb15Sn10$), aluminum, aqueous solution of $NaCl$, anodic behavior, potentiostatic method, corrosion rate, corrosion current

For citation: Ganiev, I. N., Mahmadulloev, R. Z., Khojanazarov, K. M. & Odinzoda, H. O. (2025). Influence of Aluminum Additive on Anodic Stability of Lead Babbitt B($PbSb15Sn10$) in an Aqueous Solution of $NaCl$. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 30(1), 30-38. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-3>

Received August 12, 2024. Accepted for publication December 15, 2024. Published March 01, 2025.

Введение

В современной промышленности широко применяются различные сплавы на основе свинца с добавками олова и других элементов, которые называются баббитами и отличаются легкоплавкостью и относительно низкой ценой. Кроме того, легированные свинцовые сплавы обладают высокими антифрикционными свойствами, что позволяет использовать эти соединения в производстве деталей, работающих в условиях трения и скольжения. Для изготовления свинцовых листов необходимо, чтобы исходный материал обладал достаточной конструкционной прочностью, поэтому структура таких сплавов представляет собой разнородную систему с включением мягких и твёрдых элементов в различных пропорциях. Таким образом, получаются детали с гибкой структурой, которая в процессе работы, благодаря наличию мягкого свинца, приспособляется к поверхностям сопряжённых механизмов, а наличие твёрдых элементов обеспечивает высокую прочность и износостойкость таким изделиям [1, 2].

Отличные антифрикционные качества баббита связаны с его особой гетерогенной структурой, которая характеризуется наличием твёрдых частиц в мягкой пластичной основе сплава. Таким образом, олово или свинец являются пластичной основой сплава, которая обеспечивает равномерное прилегание и прирабатываемость подшипника к валу. В сплаве есть также твердые включения, которые служат опорой подшипника, обеспечивая ему небольшое тре-

ние и износ. Определенные марки баббита содержат такие добавки, как сурьма, медь, никель, мышьяк, кадмий, теллур, кальций, натрий, магний и др. Баббит обладает низкой температурой плавления в пределах 300...440 °C, а также хорошей прирабатываемостью. Баббиты – одни из старейших антифрикционных легкоплавких гетерогенных сплавов, которые широко применяются до сих пор [3, 4].

От вида добавок зависят специфические свойства металла. Например, медь увеличивает способность противостоять ударным нагрузкам. Никель отвечает за износостойкость. От кадмия зависит степень сопротивления изделия коррозии. Сурьма повышает общую прочность [5].

Комбинация добавок позволяет получить высококачественный материал для заливки подшипников. Его наносят тонким слоем на вкладыш путем напыления или литья.

Свинцовый баббит Б($PbSb15Sn10$) может работать при более высокой температуре, чем оловянные типа Б83. Механические свойства баббита Б($PbSb15Sn10$) зависят от условий литья и термической обработки. Этот баббит применяют как заменитель баббитов Б83 и Б16 при спокойной или ударной нагрузке менее 60 (кг·м)/(с·см²) и при скоростях 3 м/сек. Главное преимущество свинцовых баббитов – это низкая цена, которая зачастую является определяющим фактором при выборе сплава для решения конкретных задач [6-8].

Основная задача баббитов – защищать механизмы от коррозии, ударных, температурных и других нагрузок. Данные сплавы

обладают недостаточным уровнем коррозионной стойкости в агрессивных средах, что ограничивает области их использования [9, 10].

Целью настоящей работы является исследование анодного поведения свинцового баббита Б(*PbSb15Sn10*), легированного алюминием, в среде водного раствора *NaCl* различной концентрации.

Материалы и методики исследования

Свинцовый баббит Б(*PbSb15Sn10*) с алюминием получали в шахтной лабораторной печи СШОЛ при температуре 450...500 °С путём плавки свинца марки С1 (99,985 % *Pb*) (ГОСТ 3778-77), олова марки ОВЧ-000 (99,999 % *Sn*) (ГОСТ 860-75), сурьмы металлической марки Су00 (99,9 % *Sb*) (ГОСТ 1089-82) и металлического алюминия марки А85 (99,85 % *Al*) ГОСТ 11069-2019. Содержание алюминия в исходном баббите составило от 0,1 до 2,0 масс. %. Из полученных сплавов в металлический кокиль отливались цилиндрические образцы диаметром 8 мм и длиной 140 мм, торцевая часть образцов служила рабочим электродом для исследования коррозионно-электрохимических свойств. Рабочие электроды перед исследованием зачищались наждачной бумагой, последовательно переходя от крупнозернистой к мелкозернистой (№2-00). Таким образом, подготовка поверхности электрода заключалась в основном в его механической обработке. На последней стадии поверхность электрода очищалась спиртом. Нерабочая часть образцов изолировалась смолой, смесью 50% парафина и 50% капролакта. Каждый образец предварительно отшлифовывали, обезжиривали спиртом и погружали в исследуемый раствор *NaCl* марки ЧДА (ГОСТ 4233-77) для установления бестокового потенциала коррозии.

Коррозионные испытания проводились на импульсном потенциостате ПИ-50-1.1 с программатором ПР-8 и самописцем на ЛКД-4 в среде водного раствора *NaCl*. Электродом сравнения служил хлорид-серебряный, поляризующим – платиновый. Скорость развертки потенциала составляла 2 мВ/с. Исследования проводили по методикам, описанным в работах [11-14].

Результаты исследования представлены

в таблице и на *рис. 1-3*. Процесс поляризации связан с интенсивностью электрохимической коррозии. При электрохимических исследованиях образцы поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении в исследуемый раствор ($E_{(св.корр.)}$ – потенциал свободной коррозии, или стационарный), до значения потенциала, при котором происходит резкое возрастание тока растворения. Затем образцы поляризовали в обратном, т.е. катодном направлении до потенциала -1,150 В, в результате чего происходило подщелачивание приэлектродного слоя и удаление оксидного слоя. Наконец, образец повторно поляризовали в положительном направлении, при этом определялись потенциалы коррозии ($E_{(корр.)}$), питтингообразования ($E_{(п.о.)}$) и репассивации ($E_{(р.п.)}$). Все четыре потенциодинамические кривые свинцового баббита Б(*PbSb15Sn10*), сняты в среде 3,0% водного раствора *NaCl*.

По ходу прохождения полной поляризационной кривой определяли следующие электрохимические параметры:

- $E_{(ст.)}$ или $E_{(св.корр.)}$ – стационарный потенциал или потенциал свободной коррозии;
- $E_{(рп.)}$ – потенциал репассивации;
- $E_{(корр.)}$ – потенциал коррозии;
- $E_{(п.о.)}$ – потенциал питтингообразования;
- $i_{(корр.)}$ – ток коррозии.

Процесс коррозии свинцового баббита контролировался катодной реакцией ионизации кислорода в нейтральной среде, а ток коррозии рассчитывался с учетом тафелевской константы ($b_k = 0,12В$) из катодной ветви потенциодинамических кривых.

Скорость коррозии K определяли по току коррозии ($i_{корр.}$) по формуле $K = i_{корр.} \cdot k$, где $k = 3,865$, г/А·ч – электрохимический эквивалент свинца.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследование коррозионно-электрохимического поведения свинцового баббита Б(*PbSb15Sn10*), легированного алюминием, проводилось в соответствии с рекомендациями ГОСТ 9.017-74 в среде водного раствора *NaCl*, как заменителя морской воды. Легирование алюминием способствует смещению потенциала

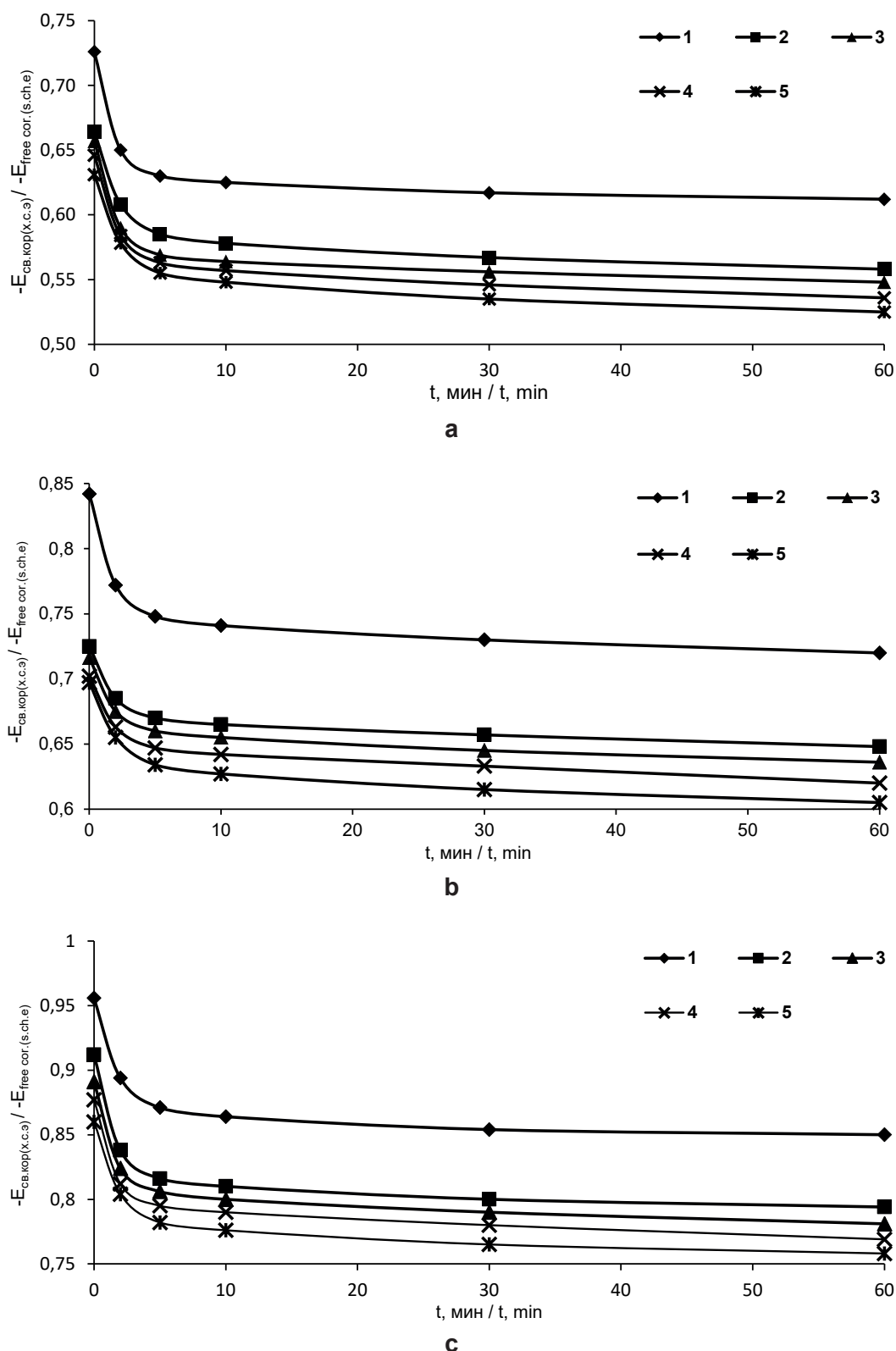


Рис. 1. Временная зависимость потенциала свободной коррозии ($E_{sv.cor.}$, В), свинцового баббита Б($PbSb15Sn10$) (1), содержащего алюминий, масс.%; 0,1(2); 0,5(3); 1,0(4); 2,0(5), в среде водного раствора 0,03% (а), 0,3% (б) и 3,0% (с) NaCl

Fig. 1. Time dependence of the free corrosion potential ($E_{sv.cor.}$, V) of lead babbitt B($PbSb15Sn10$) (1) containing aluminum, wt.%; 0.1(2); 0.5(3); 1.0(4); 2.0(5), in an aqueous solution of 0.03% (a), 0.3% (b) and 3.0% (c) NaCl

свободной коррозии свинцового баббита $B(PbSb15Sn10)$ в положительную область значений во всех трёх изученных средах (0,03%; 0,3%; и 3,0%) водного раствора $NaCl$ (рис. 1).

Коррозионно-электрохимические характеристики свинцового баббита $B(PbSb15Sn10)$, в среде водного раствора $NaCl$ представлены в таблице. Потенциалы коррозии, питтингообразования и репассивации с ростом концентрации алюминия в свинцовом баббите смещаются в положительную область. Данная зависимость имеет место во всех исследованных средах 0,03; 0,3 и 3,0% $NaCl$. Добавка алюминия на 20... 30% снижает скорость коррозии свинцового баббита $B(PbSb15Sn10)$ в исследованных средах. При

увеличении концентрации алюминия до 2,0 масс.% монотонно снижается скорость коррозии исходного баббита.

Из данных таблицы вытекает, что рост концентрации хлорид-иона в электролите $NaCl$ способствует росту скорости коррозии сплавов, независимо от их химического состава, что сопровождается смешением в область отрицательных значений всех электрохимических потенциалов.

На рис. 2 представлена зависимость скорости коррозии свинцового баббита $B(PbSb15Sn10)$ от содержания алюминия в нём. Видно, что с ростом содержания алюминия скорость коррозии исходного баббита монотонно снижается во всех трёх исследованных средах, Улучшение коррозионной

Таблица. Коррозионно-электрохимические характеристики свинцового баббита $B(PbSb15Sn10)$ с алюминием в среде водного раствора $NaCl$

Table. Corrosion-electrochemical characteristics of lead babbitt $B(PbSb15Sn10)$ with aluminum in an aqueous solution of $NaCl$

Среда $NaCl$ / $NaCl$ medium	Содержание алюминия в баббите / Aluminum content in babbitt	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э.) / Electrochemical potentials, V (s.c.e.)				Скорость коррозии / Corrosion rate	
		$-E_{св.кorr}, В$ / $-E_{sv.corr}, В$	$-E_{кorr}, В$ / $-E_{corr}, В$	$-E_{п.о.}, В$ / $-E_{p.o.}, В$	$-E_{рп}, В$ / $-E_{rp}, В$	$i_{кorr} \cdot 10^2,$ $А/дм^2$ / $i_{corr} \cdot 10^2,$ $А/дм^2$	$K \cdot 10^3,$ $г/м^2 \cdot ч$ / $K \cdot 10^3,$ $г/м^2 \cdot h$
0,03	0,0	0,612	1,000	0,510	0,611	0,56	21,64
	0,1	0,558	0,942	0,472	0,575	0,41	15,84
	0,5	0,548	0,933	0,463	0,566	0,39	15,07
	1,0	0,536	0,924	0,454	0,557	0,37	14,30
	2,0	0,525	0,915	0,445	0,548	0,35	13,52
0,3	0,0	0,720	1,066	0,595	0,690	0,75	28,98
	0,1	0,648	0,990	0,518	0,616	0,59	22,80
	0,5	0,636	0,981	0,509	0,608	0,57	22,03
	1,0	0,620	0,971	0,500	0,600	0,55	21,25
	2,0	0,605	0,960	0,491	0,592	0,53	20,48
3,0	0,0	0,850	1,100	0,650	0,700	0,90	34,78
	0,1	0,794	1,024	0,576	0,626	0,74	28,60
	0,5	0,781	1,015	0,567	0,617	0,72	27,82
	1,0	0,769	1,005	0,558	0,608	0,70	27,05
	2,0	0,758	0,995	0,549	0,599	0,68	26,28

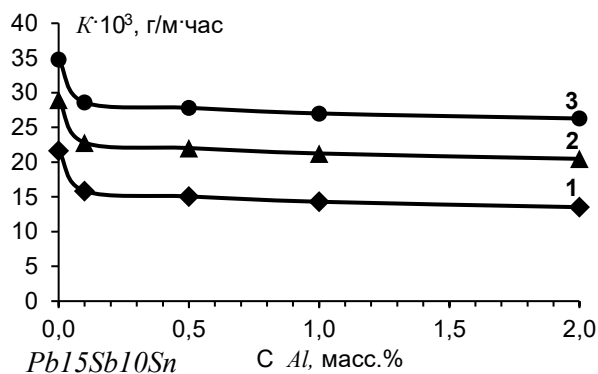


Рис. 2. Зависимость скорости коррозии свинцового баббита Б(*PbSb15Sn10*) с алюминием в среде водного раствора 0,03 (1); 0,3 (2); 3,0% (3) *NaCl*

Fig. 2. Dependence of the corrosion rate of lead babbitt B(*PbSb15Sn10*) with aluminum in an aqueous solution of 0.03 (1); 0.3 (2); 3.0% (3) *NaCl*

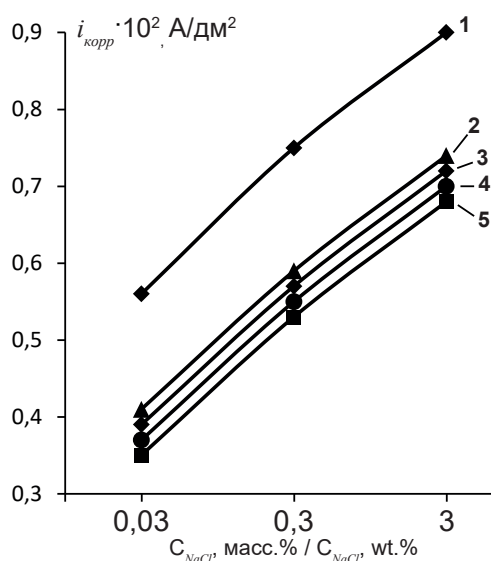


Рис. 3. Зависимость плотности тока коррозии свинцового баббита Б(*PbSb15Sn10*) (1) с алюминием, масс. %: 0,1(2); 0,5(3); 1,0(4); 2,0(5) от концентрации *NaCl*

Fig. 3. Dependence of the corrosion current density of lead babbitt B(*PbSb15Sn10*) (1) with aluminum, wt. %: 0.1(2); 0.5(3); 1.0(4); 2.0(5) from *NaCl* concentration

стойкости свинцового баббита Б(*PbSb15Sn10*) при легировании алюминием объясняется его легирующим действием на структуру твердого раствора на основе свинца, а также увеличением истинной поверхности ано-

да или же уплотнением защитного фазового слоя окислов малорастворимыми продуктами коррозии.

Зависимость плотности тока коррозии свинцового баббита Б(*PbSb15Sn10*) от концентрации водного раствора *NaCl* для сплавов с различным содержанием алюминия представлен на рис. 3. Как и ожидалось, с ростом агрессивности среды наблюдается рост плотности тока коррозии сплавов, не зависимо от их химического состава.

С ростом концентрации алюминия потенциалы свободной коррозии ($E_{(св.кор.)}$) и питтингообразования ($E_{(п.о.)}$) смещаются в положительную область значений, а плотность тока коррозии сплавов уменьшается. Указанные изменения сопровождаются сдвигом в область положительных значений анодных ветвей потенциодинамических кривых сплавов, легированных алюминием по сравнению с исходным сплавом.

Выводы

Изучение коррозионно-электрохимического поведения свинцового баббита Б(*PbSb15Sn10*) с алюминием в среде водного раствора *NaCl* показало, что добавка алюминия до 2,0 масс.%, независимо от концентрации водного раствора *NaCl* уменьшает скорость коррозии исходного сплава на 20...30 % и смещает в область положительных значений все электрохимические потенциалы.

Исследованием влияния хлорид-иона на электрохимические характеристики свинцового баббита Б(*PbSb15Sn10*), легированного алюминием, установлено, что снижение в электролите концентрации хлорид-иона в 10 и 100 раз способствует уменьшению скорости коррозии сплавов на 70...80%.

Выполненные исследования по установлению анодных характеристик свинцового баббита Б(*PbSb15Sn10*), легированного алюминием, позволяют рекомендовать его в качестве базового сплава при изготовлении антифрикционных материалов, контактирующих с агрессивными коррозионными средами.

Литература

1. Шпагин А.И. Антифрикционные сплавы. – М.: Металлургиздат, 1956. – 320 с.
2. Александров В.М. Материаловедение

и технология конструкционных материалов, Учебное пособие, часть 1. Материаловедение. Стандарт третьего поколения. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2015. – 327 с.

3. Лужникова Л.П. Материалы в машиностроении, Т.1. Цветные металлы и сплавы. – М.: Машиностроение, 1967. – 304 с.

4. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. Материаловедение. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 648 с.

5. Фильченков А.С., Иванов Г.В. Влияние химического состава на газонасыщенность и образование дефектов вспучивания переплава баббита БК2 // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции. – 2006. – Т. 3, № 3. – С. 19-24.

6. Шелег В.К., Леванцевич М.А., Пилипчук Е.В., Кравчук М.А., Богданович И.А., Богданова Т.Я. Легирование расплава подшипников скольжения на основе баббита // Наука и техника. – 2020. – Т. 19, № 6. – С. 475-479.

7. Тарельник В.Б., Антошевский Б., Марцинковский В.С. Прирабочные покрытия подшипников скольжения // Вестник ХНТУСГ им. П. Василенко. – 2015. – № 159. – С. 90-104.

8. Дунаев Ю.Д. Нерастворимые аноды на основе свинца. – Алма-Ата: Наука «КазССР», 1978. – 316 с.

9. Зернин М.В., Яковлев А.В. К исследованию усталостной долговечности баббитового слоя тяжело нагруженных подшипников скольжения // Заводская лаборатория. – 1997. – № 11. – С. 39-47.

10. Семенов А.П. Антифрикционные материалы: опыт применения и перспективы // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 12. – С. 21-36.

11. Ганиев И.Н., Ходжаназаров Х.М., Ходжаев Ф.К., Якубов У.Ш. Влияние добавок лития на коррозионно-электрохимическое поведение свинцового баббита БЛ (PbSb15Sn10Li) в среде электролита NaCl // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2022. – № 1. – С. 7-12.

12. Ходжаназаров Х.М., Ганиев И.Н., Ходжаев Ф.К. Потенциодинамическое исследование свинцового баббита БК (PbSb15Sn10K) с калием в среде электролита 3%-ного NaCl // Вестник Саратовского государственного

технического университета. – 2022. – № 1 (92). – С. 86-92.

13. Ганиев И.Н., Ходжаназаров Х.М., Ходжаев Ф.К. Потенциодинамическое исследование свинцового баббита БТ (PbSb15Sn10) с натрием в среде электролита NaCl // Ползуновский вестник. ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – 2022, – № 1. – С. 126-133.

14. Ганиев И.Н., Одинаев А.Х., Ходжаев Ф.К., Ходжаназаров Х.М. Влияние бария на коррозионно-электрохимическое поведение свинцового баббита ББа (PbSb15Sn10Ba) в среде электролита NaCl // Журнал физической химии. – 2023. – Т. 97, № 12. – С. 1776-1782.

References

1. Shpagin, A. I. (1956). *Antifriction alloys*. Moscow: Metallurgizdat. (in Russ.)

2. Alexandrov, V. M. (2015). *Materials science and technology of structural materials*. Tutorial. Part 1. Materials Science. Arkhangel'sk: Northern (Arctic) Federal University. (in Russ.)

3. Luzhnikova, L. P. (1967). *Materials in mechanical engineering*, V. 1, Non-ferrous metals and alloys. Moscow: Mashinostroenie. (in Russ.)

4. Arzamasov, B. N., Makarova, V. I., Mukhin, G. G., et al. (2003). *Materials Science*. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. (in Russ.)

5. Filchenkov, A. S., Ivanov, G. V. (2006). The influence of the chemical composition on gas saturation and the formation of swelling defects in remelted babbitt BK2. *Collection of scientific papers based on the materials of the international scientific-practical conference*, 3(3), 19-24. (in Russ.)

6. Sheleg, V. K., Levantsevich, M. A., Pilipchuk, E. V., Kravchuk, M. A., Bogdanovich, I. A. & Bogdanova, T. Ya. (2002). Melt alloying of babbitt-based sliding bearings. *Science and technology*, 19(6), 475-479. (in Russ.)

7. Tarelnik, V. B., Antoshevsky, B. & Martinkovsky, V. S., (2015). Running-in coatings for sliding bearings. *Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Science and Technology named after P. Vasilenko*, (159), 90-104. (in Russ.)

8. Dunaev, Yu. D. (1978). *Insoluble lead-*

based anodes. Alma-Ata: Science "KazSSR". (in Russ.)

9. Zernin, M. V., Yakovlev, A. V. (1997). To study the fatigue life of the babbitt layer of heavily loaded sliding bearings. *Factory Laboratory*, (11), 39-47. (in Russ.)

10. Semenov, A. P. (2007). Antifriction materials: application experience and prospects. *Friction and lubrication in machines and mechanisms*, (12), 21-36. (in Russ.)

11. Ganiev, I. N., Khodzhanazarov, Kh. M., Khodzhaev, F. K., & Yakubov, U. Sh. (2022). The influence of lithium additives on the corrosion-electrochemical behavior of lead babbitt BLi (PbSb15Sn10Li) in the NaCl electrolyte. *Bulletin of Kazan State Technical University. them. A.N. Tupolev*, (1), 7-12. (in Russ.)

12. Khodzhanazarov, Kh. M., Ganiev, I. N. & Khodzhaev, F. K. (2022). Potentiodynamic

study of lead babbitt BK (PbSb15Sn10K) with potassium in an electrolyte environment of 3% NaCl. *Bulletin of Saratov State Technical University*, 1(92), 86-92. (in Russ.)

13. Ganiev, I. N., Khodzhanazarov, Kh. M. & Khodzhaev, F. K. (2022). Potentiodynamic study of lead babbitt BT (PbSb15Sn10) with sodium in NaCl electrolyte. *Polzunovsky Bulletin, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Altai State Technical University named after I.I. Polzunov"*, (1), 126-133. (in Russ.)

14. Ganiev, I. N., Odinaev, A. Kh., Khodzhaev, F. K. & Khodzhanazarov, H. M. (2023). Effect of barium on the corrosion-electrochemical behavior of lead babbitt BBa (PbSb15Sn10Ba) in a NaCl electrolyte environment. *Journal of Physical Chemistry*, 97(12), 1776-1782. (in Russ.)

Информация об авторах

Ганиев Изатулло Наврузович, академик, доктор химических наук, профессор, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими (ТТУ имени М.С. Осими), г. Душанбе, Республика Таджикистан

Махмадуллоев Рахмонали Зафарович, ассистент, ТТУ имени М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан
Ходжаназаров Хайрулло Махмудхонович, к.т.н., ст. преподаватель, ТТУ имени М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Одиназода Хайдар Одина, член-корреспондент Национальной академии наук Таджикистана, д.т.н., профессор, ТТУ имени М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Information about authors

Izatullo N. Ganiev, Academician, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Tajik Technical University named after M.S. Osimi (TTU named after M.S. Oshimi), Dushanbe, Republic of Tajikistan

Rahmonali Z. Mahmadulloev, assistant, TTU named after M.S. Oshimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

Khayrullo M. Khojanazarov, Cand. of Technical Sciences, senior lecturer, TTU named after M.S. Oshimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

Haydar O. Odinazoda, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Doctor of Technical Sciences, Professor, TTU named after M.S. Oshimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

В.И. Вигдорович, Л.Е. Цыганкова

Ингибирование сероводородной и углекислотной коррозии металлов. Универсализм ингибиторов

Объем издания: 15,25 п.л. (253 стр.)
Стоимость 600 рублей

В монографии обобщены литературные данные и результаты многолетних исследований, выполненных под руководством авторов по вопросам ингибирования коррозии углеродистой стали в сероводородных и углекислотных средах. Значительное внимание уделено разработке критериев защитной эффективности ингибиторов, особенностям кинетики и механизма разрушения стали в присутствии H_2S и CO_2 в

слабокислых и близких к нейтральным минерализованным средам. Анализируется действие большого количества промышленных ингибиторов и лабораторных образцов, в том числе на основе имидазолинов, алифатических, циклических и оксиэтилированных аминов. Рассматривается их защитная эффективность, влияние на кинетику электродных реакций, бактерицидные свойства, и интегральная токсикологическая характеристика, торможение твердофазной диффузии водорода и воздействие на сохраняемость механических свойств стали в сероводородных и углекислотных средах и при совместном присутствии H_2S и CO_2 .



**II Международная научно-техническая конференция
«Современные проблемы технологии макромолекулярных соединений»**

II Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы технологии макромолекулярных соединений», посвященная 105-летию Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности, состоится 24-25 апреля 2025 года. Цель мероприятия – укрепить сотрудничество между представителями местного и международного образования и промышленности, обменяться опытом и выделить ключевые научные достижения в области химической и пищевой инженерии. Конференция будет включать пленарные, устные и постерные доклады на азербайджанском, английском, русском и турецком языках по пяти секциям:

1. Инновационные подходы в органическом синтезе
2. Современные методы синтеза макромолекулярных соединений
3. Получение и применение композитных материалов
4. Здоровое питание и диетология
5. Окружающая среда и безопасность пищевых продуктов

Материалы (тезисы и статьи) в формате А4 на азербайджанском, английском, русском или турецком языках должны быть поданы в электронном виде через сайт конференции (www.asoiu.edu.az/mpmc2025) с 6 января по 1 апреля 2025 года. Избранные работы будут опубликованы в журналах Web of Science или Scopus.

Контактное лицо:

Маммадова Айнур
мобильный телефон: (+994) 55 281 00 14
mpmc-conf@asoiu.edu.az

**The II International Scientific and Technical Conference
“Modern Problems of Macromolecular Compounds Technology”**

The II International Scientific and Technical Conference “Modern Problems of Macromolecular Compounds Technology”, marking the 105th anniversary of the Azerbaijan State Oil and Industry University, will take place on April 24-25, 2025. The event aims to foster collaboration between local and international education and industry representatives, share expertise, and highlight key scientific advancements in chemical and food engineering. The conference will feature plenary, oral, and poster presentations in Azerbaijani, English, Russian, and Turkish across five sections:

1. Innovative approaches in organic synthesis
2. Modern methods of macromolecular compound synthesis
3. Preparation and application of composite materials
4. Healthy food and dietetics
5. Environment and food safety

Materials (abstracts and articles) in A4 format, in Azerbaijani, English, Russian, or Turkish, must be submitted electronically via the conference website (www.asoiu.edu.az/mpmc2025) between January 6 and April 1, 2025. Selected works will be published in Web of Science or Scopus journals.

Contact person:

Mammadova Aynur
tel: mob: (+994) 55 281 00 14
mpmc-conf@asoiu.edu.az



Исследование процесса иммерсионного оловянирования для производства печатных плат

К.А. Орлова[✉], Н.С. Григорян, Н.А. Аснис, Т.А. Ваграмян, А.А. Абрашов

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,
РФ, 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9

e-mail: ksyusha-orlova-98@mail.ru

Аннотация. Разработан раствор иммерсионного оловянирования для осаждения финишных оловянных покрытий на поверхность токопроводящего рисунка (далее ТПР) печатной платы (далее ПП). Финишные оловянные покрытия предназначены для защиты от коррозии ТПР печатной платы с целью обеспечения хорошей смачиваемости поверхности припоем и сохранности способности к пайке и сварке в течение длительного времени (до 6 месяцев), а финишные иммерсионные оловянные покрытия - также для обеспечения компланарности поверхности ТПР. Раствор содержит (г(мл)/л): Sn^{2+} – 12; CH_3SO_3H – 40; $C_3H_5O(COOH)_3$ – 300; ПЭГ-400 – 170; $CS(NH_2)_2$ – 100; $Na(H_2PO_2) \cdot H_2O$ – 25; Ag^+ – 0,025. Позволяет в две стадии (при $t = 18...25$ °C и $\tau = 1...2$ мин; а затем при $t = 60...70$ °C; $\tau = 12...16$ мин) осаждать оловянные покрытия с отвечающей требованиям паяемостью, которая не ухудшается после выдержки в атмосфере пара в течение 4 часов. С увеличением температуры рабочего раствора толщина оловянного покрытия возрастает, а кристаллическая структура укрупняется. Предварительное иммерсионное оловянирование в холодном растворе приводит к измельчению структуры последующего слоя, осаждаемого в горячем растворе. Добавление в раствор гипофосфита натрия повышает стабильность и ресурс раствора, а также улучшает воспроизводимость толщины и структуры покрытий. Установлено, что у легированных серебром оловянных покрытий образование вискерообразования не наблюдается спустя 3 месяца старения. Ресурс разработанного раствора по накапливающимся в процессе иммерсионного обмена ионам меди составляет 8 г/л, что сопоставимо с зарубежным аналогом.

Ключевые слова: защита от коррозии контактных площадок печатных плат, иммерсионное осаждение, иммерсионное оловянирование, финишное покрытие токопроводящего рисунка печатной платы, металлические покрытия, иммерсионные покрытия, ингибитор вискерообразования

Для цитирования: Орлова К.А., Григорян Н.С., Аснис Н.А., Ваграмян Т.А., Абрашов А.А. Исследование процесса иммерсионного оловянирования для производства печатных плат // Практика противокоррозионной защиты. – 2025. – Т. 30, № 1 – С. 39-48. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-4>

Статья получена 12.02.2024. Принята к публикации 20.02.2025. Опубликовано 01.03.2025.

Конфликт интересов. Абрашов А.А. является членом редакционной коллегии журнала «Практика противокоррозионной защиты» с 2018 г., но не имеет отношения к решению опубликовать данную статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Study of Immersion Tin Plating for the Production of Printed Circuit Boards

Kseniya A. Orlova[✉], Nelya S. Grigoryan, Naum A. Asnis,
Tigran A. Vagramyan, Aleksey A. Abrashov

Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation

e-mail: ksyusha-orlova-98@mail.ru

Abstract. An immersion tin plating solution was developed for depositing the finishing tin coatings onto the surface of the conductive pattern (hereinafter referred to as CPR) of a printed circuit board (hereinafter referred to as PCB). The finishing tin coatings are intended to protect the CPR of a printed circuit board from corrosion in order to ensure good wettability of the surface with solder and to retain the ability to solder and weld for a long time (up to 6 months), and the finishing immersion tin coatings are also intended to ensure coplanarity of the CPR surface. The solution contains (g (ml)/l): Sn^{2+} – 12; CH_3SO_3H – 40; $C_3H_5O(COOH)_3$ – 300; PEG-400 – 170;

$CS(NH_2)_2 - 100$; $Na(H_2PO_3) \cdot H_2O - 25$; $Ag^+ - 0,025$. It allows to deposit tin coatings with the required solderability in two stages (at $t = 18...25$ °C and $\tau = 1...2$ min; and then at $t = 60...70$ °C; $\tau = 12...16$ min) that do not deteriorate after being held in a steam atmosphere for 4 hours. As the temperature of the working solution increases, so does the thickness of the tin coating, while the crystal structure becomes larger. Preliminary immersion tinning in a cold solution leads to a refinement of the structure of the subsequent layer deposited in a hot solution. The addition of sodium hypophosphite increases the stability and service life of the solution, and improves the reproducibility of the thickness and structure of the coatings. It was found that in silver-doped tin coatings, whisker formation is not observed after 3 months of aging. The maximum operation concentration of copper ions that accumulate during the immersion exchange is 8 g/L, which is comparable to a foreign analogue.

Keywords: corrosion protection of contact pads on printed circuit boards, immersion deposition, immersion tin plating, finishing coating of the conductive pattern on printed circuit boards, metal coatings, immersion coatings, inhibitor of whisker formation

For citation: Orlova, K. A., Grigoryan, N. S., Asnis, N. A., Vagramyan, T. A. & Abrashov, A. A. (2025). Study of Immersion Tin Plating for the Production of Printed Circuit Boards. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 30(1), 39-48. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-4>

Received February 12, 2024. Accepted for publication February 20, 2025. Published March 01, 2025.

Conflict of interest. Abrashov A.A. has been a member of the editorial board of the journal "Theory and Practice of Corrosion Protection" since 2018, but was not involved in the decision to publish this article. The article passed the journal's peer review procedure. The authors declared no other conflicts of interest.

Введение

Получение правильных и надежных паяных соединений в электронном оборудовании зависит от многих конструктивных и технологических факторов, включая требуемую паяемость соединяемых элементов - компонентов и проводников печатных плат. Для сохранения паяемости ТПР печатных плат до монтажа электронных компонентов, обеспечения плоскостности (компланарности) покрытия и надежного монтажа паяных соединений на медную поверхность контактных площадок ТПР печатной платы наносят т.н. финишные покрытия, которые, защищая ТПР от коррозии, обеспечивают требуемые функциональные характеристики поверхности контактных площадок.

Защитные финишные покрытия ПП должны обеспечивать хорошую смачиваемость поверхности припоем и сохранность способности к пайке и сварке в течение длительного времени (до 6 месяцев), а также прочность спаянных и сваренных соединений в процессе эксплуатации ПП.

Иммерсионное оловянное покрытие обладает такими необходимыми для финишных покрытий свойствами, как: хорошая паяемость, компланарность поверхности лучше, чем после горячего лужения (Hot-Air Solder Leveling – HASL), невысокая цена по сравнению с процессом иммерсионного золочения (Electroless Ni & Immersion Gold – ENIG) [1]. Недостатки HASL-процесса: наплывы припоя на монтажных элементах,

жесткий термоудар, который испытывают платы при погружении в расплавленный припой. Кроме того, с января 2013 г. в Европе вступили в силу экологические ограничения использования определенных опасных веществ (свинец, кадмий, шестивалентный хром и т.п.) в электрическом и электронном оборудовании [2]. Эти нормы потребовали, в том числе, полного удаления свинца из электронной промышленности, а приемлемые по качеству и относительно низкотемпературные бессвинцовые припои для HASL-процессов на сегодняшний день отсутствуют. Известным, часто возникающим на ENIG-покрытиях дефектом является т.н. "черная контактная площадка" - потемнение и ухудшение паяемости покрытия, связанное, по мнению авторов [3], с тем, что на поверхности покрытия из-за недостаточного количества фосфора в сплаве (менее 8%) образуется оксид никеля, который и препятствует смачиваемости поверхности припоем.

Применение оловянного иммерсионного покрытия в качестве финишного покрытия ПП некоторое время назад было ограничено по причине склонности к росту нитевидных кристаллов (вискеров) и пористости покрытия [4, 5]. Кроме того, способность к образованию и непрерывному росту интерметаллидов на границе медь – олово с последующим их окислением серьезно ухудшала паяемость покрытия [6, 7]. Эти недостатки устранены в технологиях иммерсионного оловянирования последнего поколе-

ния. Российские разработки в этой области относятся к 80-м гг. и не удовлетворяют современным требованиям по стабильности растворов и характеристикам покрытия. Российские производители ПП до последнего времени использовали технологии европейских компаний [8]. В условиях санкционной политики обострилась актуальность разработки технологии иммерсионного оловянирования для производства ПП, чему и посвящено настоящее исследование.

Методики экспериментов

В качестве образцов использовали пластины из фольгированного диэлектрика марки FR-4 размером 2×3 см. Для приготовления растворов в работе применялись химические реактивы марок "ч", "чда" и дистиллированная вода. Кислотность приготовленного раствора не превышала 1 единицы pH . Перед нанесением оловянного покрытия производилась подготовка поверхности, которая включала в себя кислую очистку и микротравление с применением композиций УМ-П2О и УМ-П2Т соответственно. Элементный состав покрытия исследовали методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на энергодисперсионном спектрометре EDX-7000 (Shimadzu, Япония). Толщину покрытия определяли кулонометрическим методом с помощью настольного толщиномера покрытий Fischer серии COULOSCOPE CMS2 STEP (Fischer, Германия). Хронопотенциограммы получали с помощью потенциостата Р-45Х.

Содержание ионов олова (II) и меди (II) в растворе определяли методами комплексонометрического титрования. Для определения содержания ионов олова (II) в растворе использовали индикатор метил-тимоловый голубой, а для определения ионов меди (II) – PAN-индикатор.

Параметры шероховатости обработанной поверхности измеряли с помощью оптического 3D-профилометра SuperView W1. В сочетании с модулем сканирования Z-направления и алгоритмом 3D-моделирования прибор бесконтактно сканирует поверхность исследуемого образца и затем создает 3D-изображение.

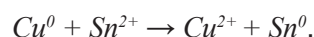
Структуру поверхности образцов исследовали с помощью сканирующего электрон-

ного микроскопа Thermo Fisher Scientific Quattro S путем их сканирования сфокусированным пучком электронов и регистрации детектором сигнала, возникающего в результате взаимодействия электронного пучка с образцом.

Испытания на паяемость проводили в соответствии с ГОСТ 28211-89 [9].

Результаты и их обсуждение

Процесс иммерсионного осаждения заключается в том, что электроны от более отрицательного металла переходят к более положительному по реакции, в результате чего на медной поверхности образуется оловянное покрытие:



Разность стандартных электродных потенциалов меди и олова составляет примерно 0,5 В. С учетом этого, чтобы сместить потенциал меди в более отрицательную по отношению к олову область потенциалов и сделать возможным процесс иммерсионного оловянирования, в качестве лиганда должно быть выбрано соединение, образующее более прочные комплексы с медью, чем с оловом. С учётом констант устойчивости комплексов, была выбрана тиомочевина, которая образует прочный комплекс с ионами меди ($K_{уст} 10^{15,4}$) и весьма непрочный комплекс с ионами олова (II) ($K_{уст} 10^{1,3}$) [10].

С учетом литературных сведений и наших предварительных экспериментов, в качестве объекта исследования был составлен раствор следующего состава (г/л): Sn^{2+} – 10...14; CH_3SO_3H – 30...50; $C_3H_5O(COOH)_3$ – 300; ПЭГ-400 – 170; $CS(NH_2)_2$ – 80...100.

Олово вводилось в раствор в виде метансульфоната олова, исходя из более высокой растворимости данной соли по сравнению с сульфатом олова. Лимонная кислота была введена с целью предотвращения образования метаоловянной кислоты [11]. При составлении раствора возникла необходимость повышения растворимости тиомочевины, для чего в раствор был введён ПЭГ-400.

Электродный потенциал меди в фоновом растворе – растворе, не содержащем тио-

мочевину ($\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ – 30-50; $\text{C}_3\text{H}_5\text{O}(\text{COOH})_3$ – 300; ПЭГ-400 – 170) составляет 0,144 В, а олова – -0,284 В. При введении в этот раствор тиомочевины электродный потенциал меди существенно смещается в сторону отрицательных значений (на 670 мВ), а потенциал олова в сторону отрицательных значений смещается незначительно (на 120 мВ). Таким образом, электродный потенциал меди становится более отрицательным по отношению к олову: -0,524 В против -0,41 В, что делает возможным процесс иммерсионного оловянирования медной поверхности.

Известные зарубежные растворы иммерсионного оловянирования работают в диапазоне температур от 10 до 80 °С, а продолжительность процесса составляет 10...25 минут [12].

На рис. 1 представлена зависимость толщины оловянного покрытия от продолжительности процесса при различных температурах.

Видно, что толщина покрытия возрастает тем быстрее, чем выше температура. Оптимальной для финишного оловянного покрытия считается толщина ~1 мкм, поскольку

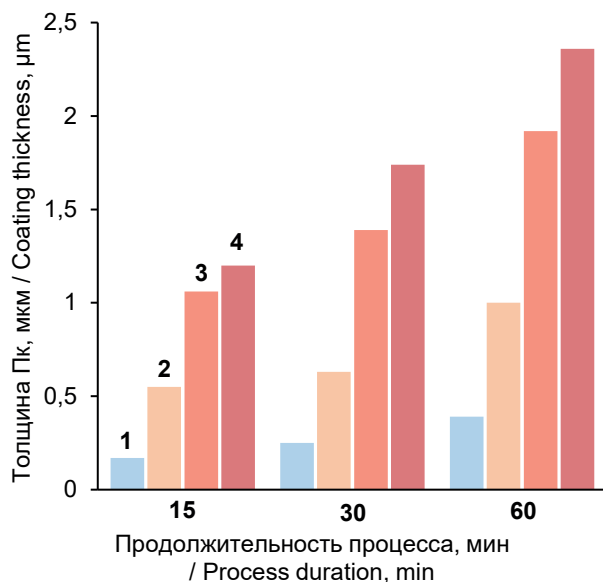


Рис. 1. Зависимость толщины оловянного покрытия от продолжительности процесса при различных температурах:
1 – 20 °С; 2 – 50 °С; 3 – 60 °С; 4 – 70 °С

Fig. 1. Tin coating thickness as a function of process duration at various temperatures:
1 – 20 °С; 2 – 50 °С; 3 – 60 °С; 4 – 70 °С

уже при данной толщине достигается необходимая паяемость [13]. При температуре 70 °С покрытие оптимальной толщины (0,8...1,2 мкм) формируется в растворе за 15 минут, при температуре 60 °С – за 15...30 минут, а при 50 °С – за 60 минут. Известно, что продолжительность процесса иммерсионного оловянирования в современных технологиях последнего поколения составляет 16 мин, и такое же значение данного технологического параметра регламентируется в технологических картах многих российских производств. С учетом этого, а также требований к толщине иммерсионного оловянного покрытия температура 70 °С была выбрана в качестве рабочей для дальнейших исследований.

С целью установления влияния температуры на структуру покрытий были получены СЭМ-изображения поверхности оловянных покрытий, сформировавшихся за одинаковое время при различных температурах раствора, причём для более явного проявления различий продолжительность процесса была выбрана достаточно длительной (180 мин).

Приведенные на рис. 2 фотографии свидетельствуют, что покрытие, полученное при температуре 22 °С, имеет мелкокристаллическую структуру, а с увеличением температуры раствора до 50 °С и 70 °С структура покрытий укрупняется.

Кроме того, видно, что более плотная гладкая структура оловянного покрытия, обязательная для финишного покрытия, формируется при температуре раствора 18...25 °С. Однако при такой температуре очень мала скорость процесса и необходимая толщина покрытия не достигается за технологически заданное время (до 16 мин).

Известно, что до толщины гальванического покрытия 5 мкм его структура во многом определяется структурой основы [14]. Учитывая, что толщина разрабатываемых покрытий должна составлять всего 1...1,2 мкм, мы исследовали возможность осаждения мелкокристаллического покрытия (за допустимое время) за счет двухстадийного осаждения. Подобные исследования описаны в некоторых работах [15-17]. Первые слои покрытия, которые обеспечат мелкокристаллическую структуру последующих слоёв, мы осаждали в холодном растворе (18...25 °С), а затем

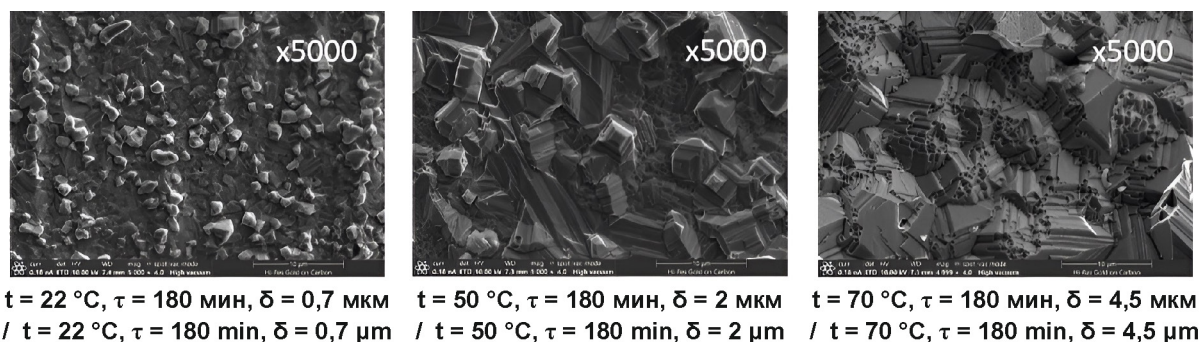


Рис. 2. СЭМ-изображения оловянных покрытий, сформированных при различных температурах раствора

Fig. 2. SEM images of tin coatings formed in solutions at different temperatures

увеличивали температуру раствора (до 50 и 70 °C) для повышения скорости процесса.

На рис. 3 представлены хронпотенциограммы медного и оловянного электродов в растворе следующего состава (г/л): Sn^{2+} – 10...14; $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ – 30...50; $\text{C}_3\text{H}_5\text{O}(\text{COOH})_3$ – 300; ПЭГ-400 – 170; $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ – 80...100. Видно, что в холодном растворе иммерсионного оловянирования значение электродного потенциала меди (-0,32 В) приближается к значению электродного потенциала олова (-0,315 В). При увеличении температуры раствора до 70 °C электродные потенциалы меди и олова смещаются в сторону положительных значений и составляют -0,305 и -0,25 В соответственно. Таким образом, разность электродных потенциалов меди и олова составляет 5 мВ в холодном растворе и 55 мВ в горячем растворе иммерсионного оловянирования, чем, по-видимому, объясняется более низкая скорость процесса в холодном растворе, а также формирование в нём более плотных мелкокристаллических покрытий.

Суммарная продолжительность процесса при двухстадийном формировании, как и у лучших мировых аналогов, составляет 16 минут. Дальнейшие исследования проводились с использованием двухстадийной технологии.

В ходе экспериментов с вышеприведенным раствором иммерсионного оловянирования было обнаружено, что толщина и структура оловянных покрытий плохо воспроизводятся в серии одинаковых экспериментов. Из литературы известно, что в ряде случаев растворы иммерсионного оловянирования содержат гипофосфит натрия, ко-

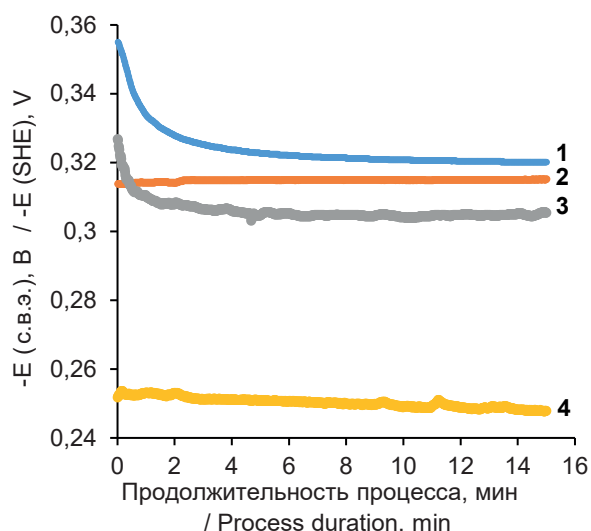


Рис. 3. Хронпотенциограммы медного и оловянного электродов в растворе (г/л): Sn^{2+} 10...14; $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ 30...50; $\text{C}_3\text{H}_5\text{O}(\text{COOH})_3$ 300; ПЭГ-400 170; $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ 80...100.
1 – Cu, $t = 20...25$ °C; 2 – Sn, $t = 20...25$ °C;
3 – Cu, $t = 70$ °C; 4 – Sn, $t = 70$ °C

Fig. 3. Chronopotentiograms of copper and tin electrodes in solution (g/l): Sn^{2+} 10...14; $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ 30...50; $\text{C}_3\text{H}_5\text{O}(\text{COOH})_3$ 300; ПЭГ-400 170; $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ 80...100.
1 – Cu, $t = 20...25$ °C; 2 – Sn, $t = 20...25$ °C;
3 – Cu, $t = 70$ °C; 4 – Sn, $t = 70$ °C

торый, по мнению авторов, также участвует в восстановлении олова [18-20]. Нами было установлено, что добавление гипофосфита натрия улучшает воспроизводимость толщины и структуры покрытий, а также повышает стабильность и ресурс раствора. Для объяснения этого факта было исследовано

влияние гипофосфита на параметры процесса.

В соответствии с реакцией (1) из раствора иммерсионного оловянирования на медной поверхности должно осаждаться столько же молей олова, сколько молей меди растворяется с основы. Однако наряду с реакцией иммерсионного замещения протекает побочная реакция – окисление меди кислородом, растворенным в электролите. Вследствие этого число молей растворившейся меди будет превышать число молей осаждённого олова. Было выявлено, что из раствора иммерсионного оловянирования, который не содержит гипофосфит натрия, осаждается в 2 раза меньше молей олова, а из раствора с гипофосфитом натрия – в 1,5 раза меньше молей олова, чем растворяется молей меди. Установлено, что скорость растворения меди в растворе, не содержащем гипофосфит натрия, в 2 раза выше по сравнению со скоростью растворения меди в растворе с гипофосфитом натрия: 0,83 мкм/ч против 0,37 мкм/ч. Вероятнее всего,

введение в раствор иммерсионного оловянирования гипофосфита натрия тормозит реакцию окисления меди растворённым кислородом. Это, в свою очередь, благоприятно сказывается на воспроизводимости толщины иммерсионного слоя, а также на ресурсе раствора к накоплению ионов меди [21].

Как известно, из-за склонности оловянных покрытий к висцерообразованию возникает риск замыкания соседних элементов ТПР печатной платы [22]. Чтобы избежать опасности замыкания длина вискеров не должна превышать 5 мкм [23]. Было установлено, что образование вискеров на поверхности разработанных оловянных покрытий происходит уже через 2...3 дня старения, а их длина составляет 6...7 мкм, что превышает допустимые значения.

С целью ингибирования висцерообразования олово легируют такими металлами как сурьма, висмут или серебро [24]. При введении в разработанный раствор ионов серебра и висмута (0,0002 моль/л) внешний

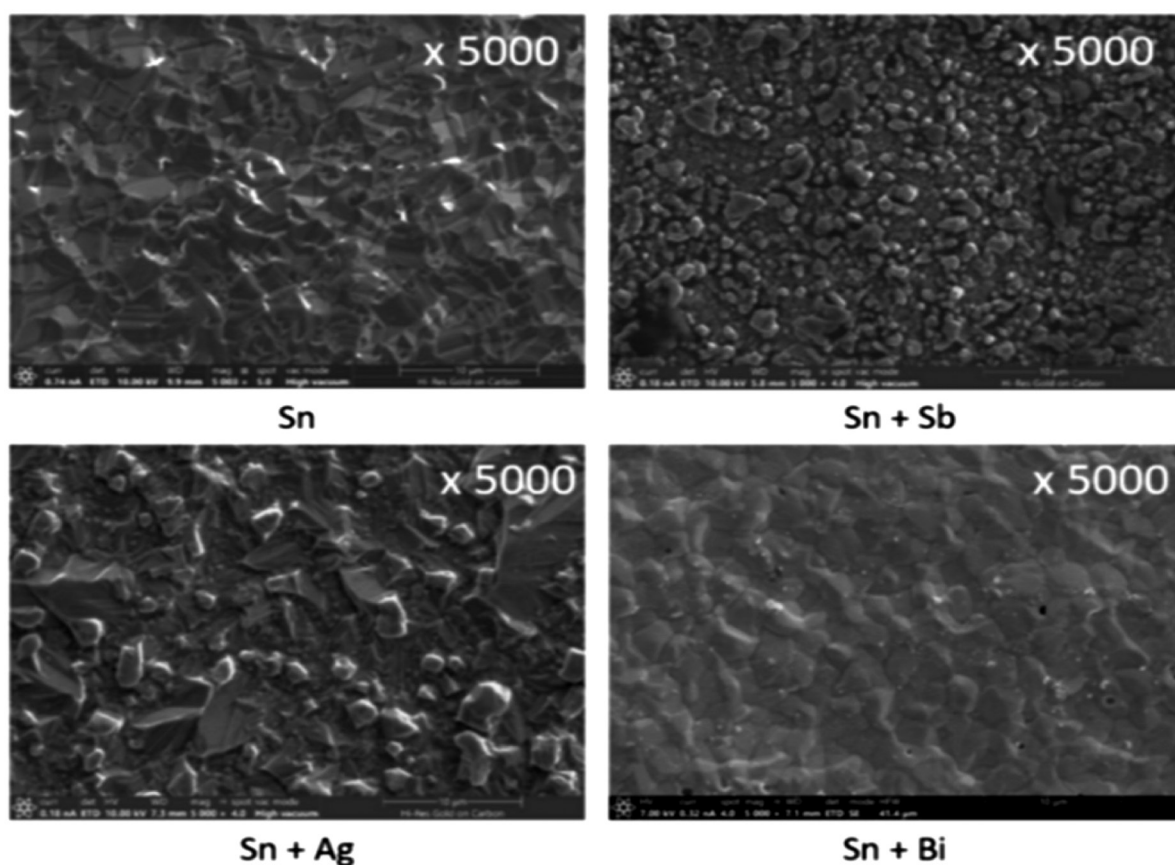


Рис. 4. СЭМ-изображения оловянных покрытий

Fig. 4. SEM images of tin coatings

вид и пластичность покрытий не изменялись, в то время как при добавлении ионов сурьмы в раствор покрытия становились тёмными и хрупкими.

СЭМ-изображения поверхности покрытий (рис. 4) показывают, что кристаллическая структура покрытий при добавлении в раствор ионов серебра, сурьмы или висмута измельчается, причём в большей степени при легировании сурьмой. Следует отметить, что на толщину формирующихся покрытий легирующие добавки ионов серебра и сурьмы практически не влияли, в то время как добавка ионов висмута снижала толщину оловянных покрытий в 2 раза. При этом содержание сурьмы, висмута или серебра в покрытии составляло 1,5...2 %, и такое содержание легирующего компонента позволило значительно ингибировать рост вискоз. У легированных серебром оловянных покрытий образование вискоз не наблюдалось даже после 3 месяцев старения.

В процессе иммерсионного оловянирования медного ТПР происходит накопление ионов меди в растворе в соответствии с реакцией (1). Было установлено, что после

накопления в разработанном растворе 5 г/л ионов меди толщина покрытия начинает постепенно снижаться и перестаёт удовлетворять требованиям (0,8...1,2 мкм), когда концентрация ионов меди достигает 8 г/л (рис. 5). По достижении этой концентрации раствор подлежит очистке от ионов меди и корректировке по основным компонентам. Следует отметить, что ресурс разработанного раствора аналогичен ресурсу зарубежного аналога [12].

Тестирование оловянных покрытий, сформированных в разработанном растворе, показало, что их паяемость отвечает требованиям ГОСТ 28211-89, паяемость не ухудшается после выдержки на пару в течение 4 часов.

Выводы

1. Разработан раствор иммерсионного оловянирования меди, содержащий: Sn^{2+} – 12 г/л; CH_3SO_3H – 40 мл/л; $C_3H_5O(COOH)_3$ – 300 г/л; ПЭГ-400 – 170 г/л; $CS(NH_2)_2$ – 100 г/л; $Na(H_2PO_2) \cdot H_2O$ – 25 г/л; Ag^+ – 0,025 г/л, позволяющий осаждать на медную поверхность иммерсионные оловянные покрытия толщиной 1,0...1,2 мкм в две стадии:

I стадия – $t = 18...25^\circ C$ и $\tau = 2$ мин, II стадия – $t = 70^\circ C$ и $\tau = 14$ мин.

2. Выявлено, что с увеличением температуры рабочего раствора толщина иммерсионного оловянного покрытия возрастает, а кристаллическая структура укрупняется.

3. Установлено, что предварительное иммерсионное оловянирование в холодном растворе приводит к измельчению структуры последующего слоя, осаждаемого в горячем растворе.

4. Установлено, что у легированных серебром оловянных покрытий образование вискоз не наблюдается спустя 3 месяца старения.

Литература

1. Данилова Е.А., Нелюцков М.А., Тузова Д.Е. Исследование финишных защитных покрытий печатных плат // Инжиниринг и технологии. – 2022. – Т. 7, № 2. – С. 1-9. <https://doi.10.21685/2587-7704-2022-7-2-4>

2. Директива 2011/65 / ЕС (RoHS II) «Об ограничении использования определенных опасных веществ в электриче-

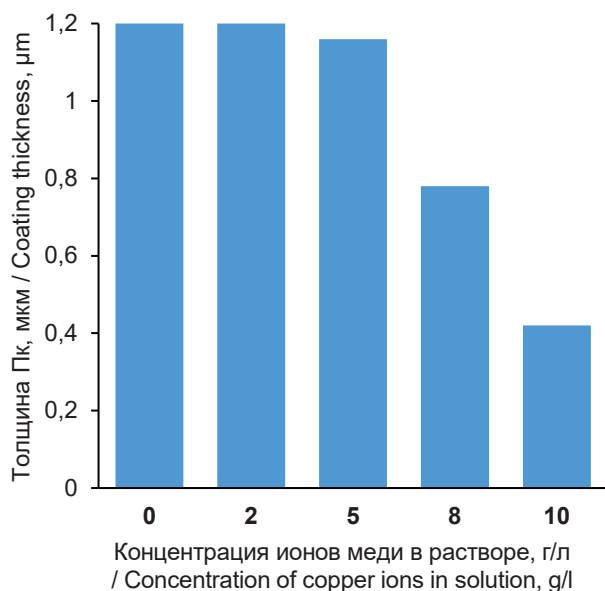


Рис. 5. Изменение толщины оловянного покрытия при накоплении ионов меди в растворе

$\tau_{\text{стадия 1}} = 2 \text{ мин}, \tau_{\text{стадия 2}} = 14 \text{ мин}$

Fig. 5. Change of the tin coating thickness as the copper ions accumulate in solution

$\tau_{\text{stage 1}} = 2 \text{ min}, \tau_{\text{stage 2}} = 14 \text{ min}$

ском и электронном оборудовании» (утв. Европейским парламентом и Советом 08.06.2011).

3. Зоткин В.В., Зайцев А.Г., Гаврилин Г.О., Архипов Е.А., Смирнов К.Н. Изучение процесса химического никелирования как стадии ENIG-процесса // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2015. – Т. 23, № 1. – С. 47-50.

4. Астахов Н.В., Башкиров А.В., Макаров О.Ю., Пирогов А.А., Демихова А.С. Проблемы повышения надежности и качества радиоэлектронных средств и приборов при использовании бессвинцовых припоев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 48-53.

5. Орлова К.А., Григорян Н.С., Аснис Н.А. Влияние структуры медной фольги диэлектрика на толщину иммерсионного оловянного покрытия // Материалы I Всероссийской научной конференции с международным участием. (20-23 ноября 2023 г.). – Казань, 2023. – С. 68-69.

6. Бондарь А.А., Демьянов Б.Ф. Морфология фаз на границе раздела твердая медь/жидкое олово // Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (01-05 июня 2020 г.). – Барнаул, 2020. – С. 48-50.

7. Бондарь А.А., Агейкова Л.Н., Демьянов Б.Ф. Рост интерметаллидов и образование переходного слоя в зоне контакта меди с жидким оловом // Ползуновский вестник. – 2019. – № 2. – С. 133-137.

8. Wessling B., Rischka M., Posdorfer J. OrmeSTAR Ultra – the organic metal nanofinish // Circuit World. – 2010. – Vol. 36, № 1. – P. 14-21. <https://doi.org/10.1108/03056121011015059>

9. ГОСТ 28211-89 Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание Т: Пайка. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 23 с.

10. Martell A.E., Smith R.M. Critical Stability Constants, Vol. 3, Other organic ligands. New York: Plenum Press, 1977. – 495 p.

11. Котик Ф.И., Ускоренный контроль электролитов, растворов и расплавов. Справочник. – М.: «Машиностроение», 1978. – 191 с.

12. Substitution type electroless tin-silver alloy plating solution: pat. JP 2000309876A. Japan; за-

явл. 23.04.1999; опубл. 07.11.2000. 12 p.

13. Arazna A., Koziol G., Krolkowski A., Bielinski J. The corrosion characteristics and solderability of immersion tin coatings on copper // Materials and Corrosion. – 2013. – Vol. 64, № 10. – P. 914-925. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.004>

14. Брусницына Л.А. Электрохимическая металлизация печатных плат: учеб. пособие для студентов, обучающихся по программе бакалавриата направлений: 18.03.01 Химическая технология; 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии. – Екатеринбург: Изд-во ФГАОУ ВПО УрФУ, 2017. – 44 с.

15. Muhd Amli S.F., Mohd Salleh M.A.A., Ramli M.I.I., Abdul Aziz M.S., Yasuda H., Chaiprapa J., Nogita K. Effects of immersion silver (ImAg) and immersion tin (ImSn) surface finish on the microstructure and joint strength of Sn-3.0Ag-0.5Cu solder // J Mater Sci: Mater Electron. – 2022. – Vol. 33. – P. 14249-14263. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08353-z>

16. Wessling B. Use of Organic Metal to enhance the operating window and solderability of immersion tin // Circuit World. – 1999. – Vol. 25, № 4. – P. 8-16. <https://doi.org/10.1108/03056129910290733>

17. Медведев А.М. Финишные покрытия под пайку // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2012. – № 4. – С. 47-57.

18. Huttunen-Saarivirta E. Observations on the uniformity of immersion tin coatings on copper // Surface and Coatings Technology. – 2002. – Vol. 160. – P. 288-294. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00412-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00412-7)

19. Kovac Z., Tu K.N. Immersion tin: Its chemistry, metallurgy and application in electronic packaging technology // Res. Develop. – 1984. – Vol. 28, № 6. – P. 726-734. <https://doi.org/10.1147/RD.286.0726>

20. Huang Y., Yang Ch., Tan X., Zhang Zh., Wang Sh., Hu J., He W., Du Zh., Du Y., Tang Y., Su X., Chen Y. Benzaldehyde derivatives on tin electroplating as corrosion resistance for fabricating copper circuit // Nanotechnology Reviews. – 2022. – Vol. 11, № 1. – P. 3125-3137. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0497>

21. Orlova K.A., Grigoryan N.S., Asnis N.A., Smirnov K.N., Abrashov A.A., Vagramyan T.A., Zhirukhin D.A. Study of immersion tin plating

for the production of printed circuit boards // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2023. – Vol. 12, № 4. – P. 1719-1732. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-4-17>

22. Fadil N.A., Yusof S.Z., Abu Bakar T.A., Ghazali H., Mat Yajid M.A., Osman S.A., Ourdjini A. Tin Whiskers' Behavior under Stress Load and the Mitigation Method for Immersion Tin Surface Finish // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 6817-6832. <https://doi.org/10.3390/ma14226817>

23. Смертина Т. Иммерсионное олово как финишное покрытие // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 4. – С. 16-19.

24. Delhaise A.M., Bagheri Z., Meschter S., Snugovsky P., Kennedy J. Tin Whisker Growth on Electronic Assemblies Soldered with Bi-Containing, Pb-Free Alloys // Journal of Electronic Materials. – 2020. – Vol. 50, № 3. – P. 842-854. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08544-6>

References

1. Danilova, E. A., Nelyutskov, M. A. & Tuzova, D. E. (2022). Research on finishing protective coatings for printed circuit boards. *Engineering and Technology*, 7(2), 1-9. <https://doi.org/10.21685/2587-7704-2022-7-2-4> (in Russ.)

2. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.

3. Zotkin, V. V., Zaitsev, A. G., Gavrilin, G. O., Arkhipov, E. A. & Smirnov, K. N. (2015). Study of Electroless Nickel Plating Process as a Stage in ENIG Process. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 23(1), 47-50. (in Russ.)

4. Astahov, N. V., Bashkirov, A. V., Makarov, O. Yu., Pirogov, A. A. & Demihova, A. S. (2021). Problems of improving the reliability and quality of radio electronic products and instruments when using lead-free solders. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 17(2), 48-53. (in Russ.)

5. Orlova, K. A., Grigoryan, N. S. & Asnis, N. A. (2023). The influence of the structure of

copper foil dielectric on the thickness of immersion tin coating. *Materialy I Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. Kazan, 68-69. (in Russ.)

6. Bondar', A. A., Dem'yanov, B. F. (2020). Morphology of phases at the solid copper/liquid tin interface. *Materialy XVII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh*. Barnaul, 48-50. (in Russ.)

7. Bondar', A. A., Ageykova, L. N. & Dem'yanov, B. F. (2019). Growth of intermetallic compounds and formation of a transition layer in the contact zone of copper with liquid tin. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 133-137. (in Russ.)

8. Wessling, B., Rischka, M. & Posdorfer, J. (2010). OrmeSTAR Ultra – the organic metal nanofinish. *Circuit World*, 36(1), 14-21. <https://doi.org/10.1108/03056121011015059>

9. GOST 28211-89 (1990). Basic environmental testing procedures. Part 2. Tests. Test T: Soldering. Moscow: Izdatelstvo standartov. (in Russ.)

10. Martell, A. E., Smith, R.M. (1974-1989). *Critical Stability Constants* (Vols. 1-6). New York: Plenum Press.

11. Kotik, F. I. (1978). *Accelerated control of electrolytes, solutions and melts*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russ.)

12. JP Patent No 2000309876A.

13. Arazna, A., Koziol, G., Krolkowski, A. & Bielinski, J. (2013). The corrosion characteristics and solderability of immersion tin coatings on copper. *Materials and Corrosion*, 64(10), 914-925. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.004>

14. Brusnitsyna, L. A. (2017). *Electrochemical metallization of printed circuit boards: textbook for students studying under the bachelor's degree program in the following areas: 18.03.01 Chemical technology; 18.03.02 Energy and resource-saving processes in chemical engineering, petrochemistry and biotechnology*. Ekaterinburg: Izdatelstvo FGAOU VPO UrFU. (in Russ.)

15. Muhd Amli, S. F., Mohd Salleh, M. A. A., Ramli, M. I. I., Abdul Aziz, M. S., Yasuda, H., Chairapa, J. & Nogita, K. (2022). Effects of immersion silver (ImAg) and immersion tin (ImSn) surface finish on the microstructure and joint strength of Sn-3.0Ag-0.5Cu solder. *J Mater Sci: Mater Electron*, 33, 14249-14263.

<https://doi.10.1007/s10854-022-08353-z>

16. Wessling B. (1999). Use of Organic Metal to enhance the operating window and solderability of immersion tin. *Circuit World*, 25(4), 8-16. <https://doi.10.1108/03056129910290733>

17. Medvedev, A. M. (2012). Finish coatings for soldering. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, (4), 47-57. (in Russ.)

18. Huttunen-Saarivirta, E. (2002). Observations on the uniformity of immersion tin coatings on copper. *Surface and Coatings Technology*, 160, 288-294. [https://doi.10.1016/S0257-8972\(02\)00412-7](https://doi.10.1016/S0257-8972(02)00412-7)

19. Kovac, Z., Tu, K. N. (1984). Immersion tin: Its chemistry, metallurgy and application in electronic packaging technology. *Res. Develop*, 28(6), 726-734. <https://doi.10.1147/RD.286.0726>

20. Huang, Y., Yang, Ch., Tan, X., Zhang, Zh., Wang, Sh., Hu, J., He, W., Du, Zh., Du Y., Tang, Y., Su, X. & Chen, Y. (2022). Benzaldehyde derivatives on tin electroplating as corrosion resistance for fabricating copper circuit. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 3125-3137.

<https://doi.10.1515/ntrev-2022-0497>

21. Orlova, K. A., Grigoryan, N. S., Asnis, N. A., Smirnov, K. N., Abrashov, A. A., Vagramyan, T. A. & Zhirukhin, D. A. (2023). Study of immersion tin plating for the production of printed circuit boards. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 12(4), 1719-1732. <https://doi.10.17675/2305-6894-2023-12-4-17> (in Russ.)

22. Fadil, N. A., Yusof, S. Z., Abu Bakar, T. A., Ghazali, H., Mat Yajid M.A., Osman, S.A. & Ourdjini, A. (2021). Tin Whiskers' Behavior under Stress Load and the Mitigation Method for Immersion Tin Surface Finish. *Materials*, 14, 6817-6832. <https://doi.10.3390/ma14226817>

23. Smertina, T. (2007). Immersion tin as a finishing coating. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, (4), 16-19. (in Russ.)

24. Delhaise, A. M., Bagheri, Z., Meschter, S., Snugovsky, P. & Kennedy, J. (2020). Tin Whisker Growth on Electronic Assemblies Soldered with Bi-Containing, Pb-Free Alloys. *Journal of Electronic Materials*, 50(3), 842-854. <https://doi.10.1007/s11664-020-08544-6>

Информация об авторах

Орлова Ксения Александровна, аспирант, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ), г. Москва, Российская Федерация

Григорян Неля Сетраковна, к.х.н., профессор, РХТУ имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

Аснис Наум Аронович, к.т.н., ведущий научный сотрудник, РХТУ имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

Ваграмян Тигран Ашотович, д.т.н., заведующий кафедрой, РХТУ имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

Абрашов Алексей Александрович, к.т.н., доцент, РХТУ имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

Information about authors

Kseniya A. Orlova, postgraduate, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (MUCTR), Moscow, Russian Federation

Nelya S. Grigoryan, Cand. Sci. in Chemistry, professor, MUCTR, Moscow, Russian Federation

Naum A. Asnis, Cand. of Technical Sciences, Leading Researcher, MUCTR, Moscow, Russian Federation

Tigran A. Vagramyan, Doctor of Technical Sciences, Head of department, MUCTR, Moscow, Russian Federation

Aleksey A. Abrashov, Cand. of Technical Sciences, associate professor, MUCTR, Moscow, Russian Federation



ПОРТРЕТ ОРГАНИЗАЦИИ

PORTRAIT OF THE ORGANIZATION

Тип статьи: научная, оригинальная

Article type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-5>

Обеспечение безопасности и повышение эффективности эксплуатации объектов энергетики с применением минерально-полимерных покрытий

В.Н. Злобин✉

ООО «Специализированное управление – 87»,
РФ, 119002, г. Москва, Смоленский бульвар, д. 24, стр. 2

e-mail: info@su87.ru

Аннотация. Работа посвящена обеспечению безопасности и повышению эффективности важнейших отраслей городского хозяйства, к которым относятся теплоснабжающие и электроснабжающие предприятия города. Система энергоснабжения включает комплекс энергетических установок и сетей, обеспечивающих потребителей в городе тепловой и электрической энергией. Наибольшую сложность для городских властей представляет организация систем теплоснабжения, так как она требует значительных капиталовложений в теплотехническое оборудование и тепловые сети, непосредственно влияет на экологическое и санитарное состояние окружающей среды, а также имеет многовариантное решение.

Ключевые слова: антикоррозионное защитное минерально-полимерное покрытие (МПП), санация, бестраншейные технологии, тепловая сеть, инновационный комплексный подход (ИКП), лакокрасочные покрытия (ЛКП)

Для цитирования: Злобин В.Н. Обеспечение безопасности и повышение эффективности эксплуатации объектов энергетики с применением минерально-полимерных покрытий // Практика противокоррозионной защиты. – 2025. – Т. 30, № 1 – С. 49-66. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-5>

Статья получена 03.02.2024. Принята к публикации 15.02.2025. Опубликовано 01.03.2025.

Ensuring the Safety and Increasing the Efficiency of Energy Facilities Using Mineral Polymer Coatings

Victor N. Zlobin✉

Limited Liability Company Specialized Management – 87,
bld. 2, 24, Smolensky Boulevard, 119002, Moscow, Russian Federation

e-mail: info@su87.ru

Abstract. The work is devoted to ensuring safety and increasing efficiency in the most important sectors of the urban economy, which include heat and electricity supply enterprises in the city. The energy supply system includes a complex of power plants and networks that provide consumers in the city with heat and electricity. The organization of heat supply systems is the most difficult for the city authorities, as it requires significant investments in heating equipment and heating networks, directly affects the ecological and sanitary state of the environment, and also has a multi-variant solution.

Keywords: anticorrosive protective mineral polymer coating (MPP), sanitation, trenchless technologies, heating network, innovative integrated approach (ICP), paint and varnish coatings (LKP)

For citation: Zlobin, V. N. Ensuring the Safety and Increasing the Efficiency of Energy Facilities Using Mineral Polymer Coatings. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 30(1), 49-66. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-5>

Received February 03, 2024. Accepted for publication February 15, 2025. Published March 01, 2025.

Введение

Деятельность компании «СУ-87», начиная с 1997 года, охватывает многие направления в сфере строительства и проектирования наружных сетей в системе ЖКХ. Мы работаем с различными средами, давлениями и материалами труб, ежегодно сдавая в эксплуатацию более 20 тысяч погонных метров трубопроводов с техническими сооружениями.

Отличительный знак компании – способность успешно выполнить любое задание, вне зависимости от сложности проекта. Мы тщательно готовимся к проектам, подбираем квалифицированных сотрудников, лучшие машины и вспомогательное оборудование. Регулярно обновляем и модернизируем парк. В 100% случаев наши клиенты обращаются к нам с новыми проектами. Мы применяем новейшие бестраншейные технологии как для ремонта, так и для замены участков трубы целиком. Процессы проектирования и строительства инженерных коммуникаций отлажены до автоматизма и постоянно улучшаются. Это позволяет быстро выполнять работу в стеснённых городских условиях, где открытый способ нарушает работу инфраструктуры и доставляет дискомфорт жителям.

Не меньшую гордость мы испытываем от освоения компанией современных методов санации трубопроводов. Санация труб, подобно профилактике нарушений здоровья человека, обходится гораздо дешевле лечения и эффективно продлевает срок службы трубопроводов. Сегодня компания занимает лидирующие позиции по разработке и внедрению передовых технологий и инноваций в проектирование инженерных коммуникаций, диагностике, строительстве новых и восстановлении существующих трубопроводов (рис. 1).

Любые трубопроводы со временем растрескаются, изнашиваются, подвергаются коррозии. Санация позволяет восстановить надёжность и пропускную способность водопроводных, канализационных, тепловых и нефтегазовых сетей.

Приоритетным направлением для нас являются тепловые сети – наиболее уязвимые элементы системы теплоснабжения в России. Основные средства, выделяемые бюджетом на капитальный и текущий

ремонт подземных инженерных систем, поглощаются именно тепловыми сетями. Большинство подземных коммунальных трубопроводов в России находится в эксплуатации с 30...70 гг. двадцатого века и практически исчерпали свой срок службы.

Согласно данным российских источников, при благоприятных условиях строительства и эксплуатации долговечность элементов тепловых сетей в среднем составляет:

- стальные трубы – 10...20 лет;
- тепловая изоляция – 10...15 лет;
- гидроизоляция и защитные антикоррозионные покрытия – 5...7 лет [1].

Актуальность решения задачи эффективного ремонта теплотрасс предопределила то большое внимание, которое уделяли и уделяют этой проблеме специалисты исследовательских лабораторий ведущих мировых производителей защитных покрытий. Не остались в стороне и наши специалисты. Занявшись исследованием и разработкой данной проблемы, они пришли к мнению, что одним из возможных решений по ремонту и восстановлению трубопроводов системы теплоснабжения является использование для этой цели цементно-песчаных покрытий (ЦПП). Тем более, на тот момент это было одним из основных наших направлений при проведении санации водопроводных сетей. Цементно-песчаное покрытие наносится достаточно быстро (100 и более погонных метров в день), имеет сравнительно невысокую стоимость и обладает высокими механическими и антикоррозионными свойствами. Это единственное известное покрытие, которое обладает свойствами пассивной и активной антикоррозионной защиты. Возможность применения цементного раствора для антикоррозионной защиты стальных и чугунных труб была впервые обоснована в 1836 году учеными Французской Академии наук. Было признано, что наиболее экономичным способом антикоррозионной защиты внутренней поверхности трубопровода является нанесение цементно-песчаного покрытия толщиной не менее 2,5 мм. Исследования внутренней поверхности трубопроводов с внутренним цементно-песчаным покрытием после 100 лет эксплуатации показали отсутствие коррозии и инкрустаций, а также сохранность гидроизоляционных

свойств [2]. Первые исследования возможности применения ЦПП для ремонта трубопроводов систем теплоснабжения показали, что обычный цементный раствор нельзя использовать в этих целях. В результате колебаний температуры транспортируемой воды цементный раствор отслаивается и разрушается. Ему не хватает эластичности.

Поэтому лабораторные исследования были направлены на улучшения эластичных свойств покрытия, тиксотропных свойств и технологичности материала (рис. 2).

Первоначально для проведения эксперимента был применён раствор с добавками латекса и измельченной резины автопокрышек, испытания показали, что мы двигались в правильном направлении. В результате проведенных натурных испытаний было разработано двухкомпонентное покрытие, которое не отслаивалось от внутренней поверхности стальных и чугунных труб при сильных колебаниях температуры транс-

портируемой воды. Это дало основание рекомендовать материал для устройства внутреннего защитного покрытия при ремонте трубопроводов систем теплоснабжения.

Минерально-полимерное покрытие (МПП) было разработано в 1996 году, покрытие доказало свои антикоррозионные свойства на многих километрах теплопроводов. Основным критерием разработки МПП послужило отсутствие на рынке покрытий, отвечающих единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям и работающих в диапазоне от -60°C до $+180^{\circ}\text{C}$, а также позволяющих увеличить нормативный срок службы трубопровода на 50 и более лет.

Основные механизмы защитного действия покрытия

МПП – это покрытие на минеральной основе, которое состоит из двух компонентов – жидкой и порошковой фракции.



Рис. 1. Инженерно-технический центр

Fig. 1. Engineering and Technical Center

Механизм защитного действия МПП основан на синергии минеральных и полимерных компонентов, обеспечивающей комплексную защиту материала. Вот ключевые его аспекты.

1. Барьерный эффект

- Минеральные компоненты (алюминат кальция, кварцевая мука, кварцевый песок, оксиды металлов) формируют плотный, износостойкий слой, блокирующий проникновение агрессивных сред (влаги, солей, химикатов).

- Полимеры (водная дисперсия полимера с присадками) заполняют микропоры и трещины, снижая проницаемость покрытия. Это предотвращает коррозию, карбонизацию бетона или окисление металла.

2. Химическая стойкость

- Полимерная матрица устойчива к действию кислот, щелочей, растворителей и

УФ-излучения, защищая основу от химической деградации.

- Минеральные наполнители могут содержать ингибиторы коррозии, замедляющие электрохимические реакции на поверхности металла.

Порошковый компонент, в состав которого входят различные согласованные друг с другом высококачественные природные минералы, имеет pH 2,5...14,0.

3. Механическая прочность и эластичность

- Минералы придают покрытию твёрдость и устойчивость к абразивному износу.

- Полимеры обеспечивают гибкость, предотвращая растрескивание при вибрациях, температурных деформациях или ударных нагрузках.

Каучук, содержащийся в готовом растворе, сохраняет упругость при температурах

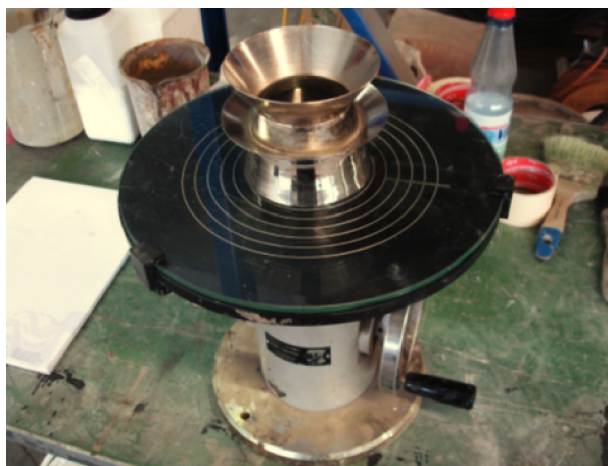


Рис. 2. Проведение лабораторных испытаний

Fig. 2. Conducting laboratory tests

до -60 °С, он не стареет и позволяет постоянно поддерживать смесь в стабильном состоянии.

4. Адгезия и герметизация

- Полимеры улучшают сцепление покрытия с подложкой, даже на неровных или влажных поверхностях.

- Минеральные частицы усиливают структурную целостность слоя, препятствуя отслоению.

Кроме того, покрытие устойчиво к деминерализованной и технической воде и обладает свойствами герметика и заполнителя. Его адгезионная способность к стенкам труб не ослабевает даже при многократных сменах температурного режима.

5. Термостойкость и огнезащита

- Минеральные компоненты выдерживают высокие температуры и замедляют распространение пламени.

- Полимеры могут быть модифицированы для устойчивости к термоокислительным процессам.

6. Самовосстановление микротрещин

- Состав минеральных компонентов способен восстанавливать целостность при появлении дефектов, например, трещин или разрывов.

Кроме того, покрытие устойчиво к деминерализованной и технической воде и обладает свойствами герметика и заполнителя.

7. Преимущества комбинации минералов и полимеров

- Минералы обеспечивают прочность и огнестойкость, полимеры – эластичность и герметичность. Эластичное покрытие без труда адаптируется к линейному расширению труб, причем никаких трещин на нем не образуется. Покрытие отличается эластичностью и термоустойчивостью при температурах -60... +180 °С.

- Универсальность. Покрытие адаптируется для защиты бетона, металла, древесины в условиях повышенной влажности, химических сред или механических нагрузок.

- Долговечность. Сочетание свойств продлевает срок службы конструкции, снижая затраты на обслуживание.

Таким образом, МПП действуют как multifunctional shield, сочетая физическую изоляцию, химическую инертность и способность адаптироваться к внешним воздействиям.

Сегодня с помощью МПП восстановлено более 95 000 п.м. теплотрасс. Покрытие рекомендовано к применению на объектах ПАО «МОЭК», ГУП «ТЭК СПб», ПАО «Мосэнерго», АО «Теплосеть СПб», ООО «Петербургтеплоэнерго» и других теплоснабжающих компаний. МПП прошло испытание в НИИ систем центрального отопления, ОАО «ВНИПИэнергопром», АНО «ЦНИИКС», ЗАО «НЦ ВНИИГС», имеет заключения, сертификаты и разрешения Ростехнадзора по применению материала на сетях теплоснабжения. Дальнейшее применение МПП сегодня рассматривается не только в плане санации старых (действующих) трубопроводов, но и для нанесения внутреннего или наружного антикоррозионного минерально-полимерного покрытия МПП на новые трубы в заводских условиях.

Несколько слов о проектах. Проекты были представлены на НТС Ростехнадзора и рекомендованы к ознакомлению персоналу поднадзорных организаций с включением информации о проектах с МПП в программы учебно-методического центра Ростехнадзора.

Антикоррозионная защита внутренней поверхности стальных трубопроводов тепловых сетей

Основная причина повреждений тепловых сетей – коррозионные разрушения металла труб. По информации Росстата, общий износ тепловых сетей составляет более 60%, более 30% (50 тыс. километров из 167 тыс. километров) тепловых сетей нуждаются в замене. Ветшание теплотрасс приводит к росту аварийных ситуаций, при этом масштабы аварий в системе централизованного теплоснабжения (до 80 %) наибольшие именно на тепловых сетях, происходят и выходы из строя котельных, квартальных тепловых сетей, связанных с административной ответственностью местного самоуправления. Что касается финансирования современной системы централизованного теплоснабжения, то в целом по стране необходимо инвестировать от 3 до 4,5 трлн. рублей. Найти на это средства в региональных и муниципальных бюджетах в системе существующего тарифного регулирования малореально [3]. На сегодня

нышний день, на рынке антикоррозионной защиты представлено очень много различных покрытий, начиная от лакокрасочных и заканчивая металлизационными, но для антикоррозионной защиты тепловых сетей, особенно внутренней поверхности трубопровода, сегодня, применяются только минерально-полимерные покрытия (МПП).

Вопрос, почему? Потому, что в процессе эксплуатации трубопроводы тепловых сетей подвержены воздействиям, которые приводят к снижению нормативного срока службы, а именно:

- наличие внутренней и внешней коррозии;
- напряженное состояние трубопровода;
- наличие блуждающих токов;
- повышенная температура/давление;
- циклический характер нагрузок вследствие постоянного изменения температуры теплоносителя и др.;
- отсутствие на рынке покрытий, отвечающих единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям и работающих в диапазоне +180 °С.

На трубопроводах, предназначенных для тепловых сетей, отсутствует в заводском исполнении внутреннее и наружное антикоррозионное покрытие, и коррозионные повреждения на трубах появляются при неблагоприятных условиях уже через 12...15 лет. К амортизационному сроку (25 лет) трубопроводы становятся аварийными, и борьба с локальными повреждениями здесь уже бесполезна – требуется полная их замена. В результате безаварийный период жизни тепловых сетей редко превышает 10 лет [4].

В 2013 г., в рамках сотрудничества с Некоммерческим партнерством «Российское Теплоснабжение», был проведен опрос, призванный выяснить, существует ли внутренняя коррозия стальных трубопроводов в системе теплоснабжения организаций-респондентов. 24 организации из 26 опрошенных ответили утвердительно, что составило (92,3%).

Ранее считалось, что основные повреждения связаны с наружной коррозией трубопроводов, и данные нашего опроса это подтвердили (65,4%). Однако в последнее время все более обостряются проблемы внутренней коррозии трубопроводов. Что бы ни говорили управляющие организации, внутренняя коррозия наблюдается практи-

чески во всех тепловых сетях, независимо от физико-химических параметров сетевой воды и прочих условий. Даже при надежном, в целом, водно-химическом режиме теплосети часты случаи кратковременного увеличения концентрации кислорода в сетевой воде. Причинами последнего являются, во-первых, некачественная работа деаэраторов, во-вторых, кратковременные отключения деаэраторов, в-третьих, присосы водопроводной воды в абонентских подогревателях (для закрытой теплосети), наконец, завоздушивание обратных трубопроводов (рис. 3).

Бытует мнение, что повышение концентрации кислорода в сетевой воде на короткое время не представляет опасности с точки зрения коррозии. Однако проведенные электрохимические исследования, а также многократные обследования внутренней поверхности трубопроводов с помощью ультразвуковой панорамной дефектоскопии показали, что даже кратковременные «проскоки» кислорода в сетевую воду приводят к появлению питтингов на поверхности металла труб, которые могут развиваться в язвы и свищи в деаэрированной воде после ликвидации «проскока», резко увеличивая повреждаемость трубопроводов теплосети от внутренней коррозии.

Причиной увеличения доли внутренней коррозии является уменьшение толщины стенок трубопроводов теплосети самых распространенных в тепловых сетях труб (Ду 200... 800 мм, 16...8 мм) в среднем на 25...50%.

Второй фактор – изменение качества металла, используемого для трубопроводов теплосети, что подтверждается проведенным НП «РТ» опросом. 84,6% респондентов ответили, что на внутреннюю коррозию оказывает влияние не только качество выполненных работ по прокладке нового трубопровода, но и качество выпускаемых труб. На сегодняшний день стальная труба, выпущенная в 1936 г. оказалась по коррозионной стойкости выше, чем стальная труба выпуска 70-80 годов прошлого века. В среднем по России, 28% всех повреждений тепловых сетей обусловлены внутренней коррозией. В тепловых сетях Мосэнерго доля этих повреждений в 1985-1990 гг. достигала 35...37% [5].

Краткая методика нанесения МПП на внутреннюю поверхность стальной трубы на действующем трубопроводе

Для выполнения работ по нанесению антикоррозионного минерально-полимерного покрытия на внутреннюю поверхность стальных трубопроводов действующих тепловых сетей необходимо провести ряд мероприятий, включая раскопку котлованов, демонтаж плит перекрытия и вырезку технологических латок в верхней части трубопровода.

Основные работы по проведению санации МПП

- Телеинспекция внутренней поверхности трубопровода с помощью телевизионного робота на предмет наличия в трубопроводе посторонних предметов, заужения проходного сечения диаметра трубопровода, опуска, подъема и т.д., мешающих процессу чистки трубопровода.

- Чистка внутренней поверхности трубопровода с помощью комплекса механизмов для подготовки поверхности (метод «КМПП – 87»), который включает:

- механическую чистку трубопровода посредством скребкового или манжетного снаряда;
- гидродинамическую чистку трубы сверхвысоким давлением до 2500 атм;
- чистку высоким давлением до 500 атм.

с помощью каналопромывочной машины.

- Нанесение покрытия на внутреннюю поверхность трубы при помощи разбрызгивающей головки с электрическим или пневматическим приводом. С помощью тяговой лебёдки с плавным регулированием подающий шланг и распыляющая головка вытягивается из трубы «методом на себя» со скоростью, которая определяется заранее в зависимости от толщины покрытия и диаметра трубы. Через 24...48 часов после санации производится телеконтроль и оценка качества нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубопровода.

- Заварка технологических латок, восстановление плит перекрытий и благоустройство участка санации (рис. 4).

Первый опыт нанесения МПП в 2001 году был получен в тепловых сетях филиала № 10 «Зеленоградский» ОАО «МОЭК» на участке от ТК №47 до ТК №77 путем санации внутренней поверхности трубопровода 2Ду400 мм (год прокладки трубопровода 1985 г.) с помощью антикоррозионного минерально-полимерного покрытия «ТЮКОН» (МПП «ТЮКОН»), общая протяженность объекта составила 3000 метров. Применение антикоррозионной защиты на данном объекте было обусловлено наличием внутренней коррозии трубопровода. Трубопровод на данном участке находился в

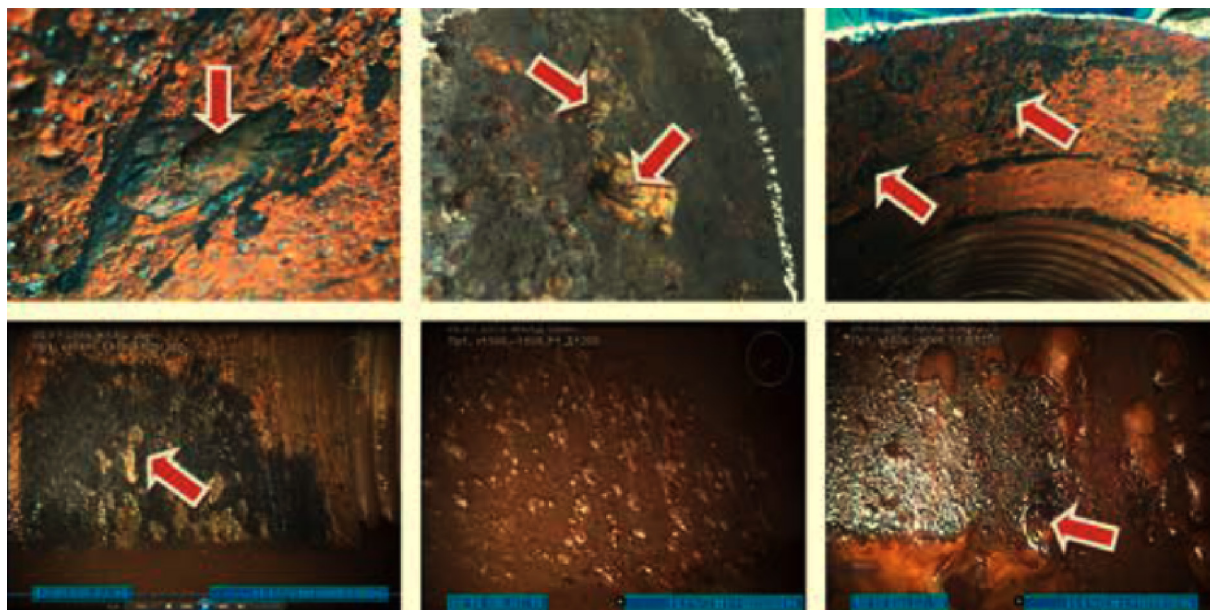


Рис. 3. Коррозия внутренней поверхности трубопроводов

Fig. 3. Corrosion of the inner surface of pipelines

проходном коллекторе. Для нанесения антикоррозионного минерально-полимерного покрытия «ТЮКОН» через каждые 100 метров необходимо было вскрыть плиту перекрытия и вырезать технологические окна. П-образные компенсаторы были вырезаны и демонтированы, нанесения покрытия на них осуществлялось на поверхности. В то время с помощью применяемого оборудования по нанесению МПП пройти 4 угла поворота не представлялось возможным.

В 2019 году в рамках мониторинга МПП на данном объекте был проведён визуальный и телевизионный контроль внутренней поверхности трубопровода, а также измерения толщины покрытия и его адгезионной прочности после 18 лет эксплуатации в системе теплоснабжения. Мониторинг проводился в проходном коллекторе: г. Зеленоград, Сосновая аллея ПК261 – 261. Обследуемый участок ТК47 – ТК77 – подающий (Р1 нижняя труба) и обратный (Р2 верхняя труба) трубопровод 2Ду400 мм длиной 2 x 30 метров. По результатам проведённого мониторинга внутренней поверхности подающего Р1 и обратного Р2 трубопровода на участке ТК 47 – ТК 77 можно сделать следующие выводы.

1. Визуальный и телевизионный контроль показал, что покрытие после 18 лет эксплуатации в системе теплоснабжения находится в удовлетворительном состоянии (рис. 5).

2. Покрытие нанесено по всей длине трубопровода Р1 и Р2. Внутренние сварные швы на трубах закрыты покрытием, это говорит о том, что нанесение покрытия осуществлялось в соответствии с технологическим регламентом по нанесению МПП для действующих трубопроводов.

3. На покрытии не обнаружено, каких-либо растрескиваний, отложений и наростов.

4. Наличие волнистости покрытия по всей длине трубопровода обусловлено особенностью технологического оборудования по нанесению МПП.

5. Отсутствие покрытия на внутреннем сварном шве основной трубы Р1, Р2 и отводами обусловлено отсутствием в 2001 году технологии по защите сварных швов на действующих трубопроводах.

6. Визуальный контроль внутренней поверхности трубопровода без антикоррозионного МПП показал, что в этом месте труба

и отвод имеют следы коррозионного износа и отложений.

7. Средняя толщина покрытия на трубопроводах Р1 5,577 мм и Р2 5,862 мм, что соответствует заявленным требованиям технологической инструкции и технологической карты по нанесению антикоррозионного минерально-полимерного покрытия. Данный показатель говорит о стойкости покрытия к истиранию и вымыванию в условиях влияния эксплуатационных факторов.

8. Показатели адгезионной прочности покрытия на трубопроводах Р1 и Р2 минимальный показатель – 1,83 МПа, максимальный показатель – 4,57 МПа, что соответствует заявленным требованиям на МПП не менее 1 МПа. Наличие остаточной толщины покрытия на участках отрыва «грибка» говорит о когезионном характере прочности покрытия.

9. Рекомендуется проведение повторного мониторинга и телеинспекционное обследование контрольного участка трубопровода ТК 47 – ТК 77 через 5 лет, с целью получения дополнительных сведений по дальнейшему применению и улучшению качества МПП.

В результате полученного многолетнего опыта и с целью дальнейшего применения антикоррозионного покрытия МПП на объектах теплоснабжающих компаний, мы предложили заказчикам (ПАО «МОЭК», ОАО «Теплосеть СПб» и др. т/снабжающие компании) инновационный комплексный подход (ИКП) для восстановления и защиты трубопроводов тепловых сетей.

В чём же заключается ИКП?

На первом этапе после предварительного натурного обследования объекта проводится внутритрубная диагностика для определения критических мест, препятствующих безаварийной эксплуатации.

На втором этапе по результатам диагностики осуществляется локальный ремонт трубопровода с заменой аварийных и предаварийных участков.

Третий этап включает в себя нанесение на внутреннюю поверхность труб антикоррозионного минерально-полимерного покрытия (рис. 6).

Решение о проведении реновации принимается на основе технических отчетов



МПП «ТЮКОН» поступает в герметичной упаковке

/ MPP "TYUKON" is supplied in sealed packaging



Гидродинамическая очистка трубы сверхвысоким давлением до 2500 атм

/ Hydrodynamic cleaning of pipes with ultra-high pressure up to 2500 atm



Нанесение покрытия на внутреннюю поверхность трубы

/ Application of coating to the inner surface of the pipe



Внутренняя поверхность трубы после нанесения

/ The inner surface of the pipe after application

Рис. 4. Краткая методика нанесения МПП на внутреннюю поверхность трубы

Fig. 4. A brief procedure for applying MPP to the inner surface of the pipe

внутритрубной диагностики, содержащих данные о наличии коррозии на внутренней поверхности труб. По итогам выполненного комплекса работ срок безаварийной эксплуатации трубопровода может быть увеличен до двадцати пяти лет.

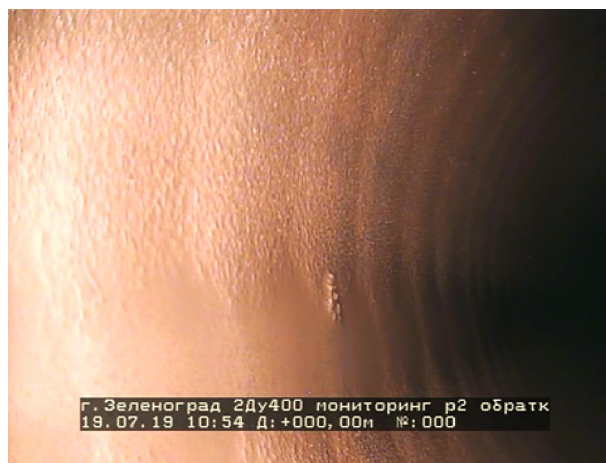
Накопленный нами опыт показывает наличие 7% участков, которые действительно требуют немедленного ремонта. Из 65 000 метров сетей, продиагностированных нами

начиная с 2015 года, замене подлежат лишь 4 550 метров труб. Адресное проведение реновации позволяет высвободить более 70% денежных средств, выделяемых на «слепую» перекладку тепловых сетей. Таким образом, возникающие дополнительные расходы на диагностику и реновацию переходят из статьи затрат в область рационального и эффективного финансирования.

За 25 лет реконструкции и модернизации



a



b

Рис. 5 Внутреннее МПП после 18 лет эксплуатации

Fig. 5 Internal MPG after 18 years of operation

коммуникаций мы изучили и опробовали различные технологии диагностики и восстановления трубопроводов в условиях высокого процента износа трубопроводов и ограниченного финансирования эксплуатации и ремонта.

Преимущества комплексного подхода:

- снижение потерь;
 - отсутствие необходимости «слепой» замены больших участков трубопроводов;
 - снижение раскопок и демонтажа, большая часть работ производится без вскрытия и замены;
 - сбережение материалов и энергии;
 - сохранение существующего стального (или другого) оборудования, продление срока службы;
 - повышение надёжности, предотвращение утечек и проливов;
 - защита окружающей среды;
 - компактность воздействия, снижение нагрузки на окружающую среду от отходов и выбросов;
 - меньше углеродный след за счёт экономии топлива на транспортировку и работу механизмов;
- Определяющие наш подход задачи:
- объективно оценить состояние трубопроводов и ёмкостей,
 - бережно восстановить поврежденные участки для надёжной работы,
 - защитить оборудование от разрушающих факторов, увеличив срок службы.

В результате сложился уникальный комплексный подход к повышению надёжности оборудования. Как пример, предполагаемые затраты на строительство участка теплосети до проведения внутритрубной диагностики (Ду 1000 мм и протяжённостью 4 км) составили 1116,25 млн. руб. Срок выполнения работ по данному проекту перекладки трубопровода составлял 24 месяца. При комплексном подходе сроки выполнения работ составили 8...10 месяцев, а экономия средств от проведения внутритрубной диагностики участка теплосети, локального ремонта и последующей его санации с помощью МПП 76% или 845,03 млн. руб. Как говорится, результат налицо. На сегодняшний день продиагностировано и защищено от внутренней коррозии более 95 000 п.м. трубопроводов на объектах теплоснабжающих компаний, что подтверждается актами выполненных работ и отзывами.

Стальные трубы для тепловых сетей с внутренним и/или наружным антикоррозионным МПП в заводском исполнении

Дальнейшее продвижение минерально-полимерных покрытий сегодня рассматривается не только в сфере санации старых трубопроводов, но и в других направлениях, в частности, при изготовлении в заводских условиях стальных труб с внутренним и/или наружным антикоррозионным минерально-полимерным покрытием МПП в ППУ/ППМ изоляции с целью их применения при новом строитель-



**Рис. 6. Инновационный комплексный подход (ИКП)
для восстановления и защиты трубопроводов тепловых сетей**

**Fig. 6. Innovative integrated approach (ICP)
for restoration and protection of pipelines of heating networks**

стве тепловых сетей, реконструкции, замене участка тепловой сети под проезжей частью, при закрытой и/или открытой системе теплоснабжения.

Большая часть тепловых сетей построена методом подземной бесканальной прокладки в тепловой изоляции, подвергается активной коррозии, физическому преждевременному износу по причинам возникновения наружной и внутренней коррозии. Анализ статистических данных причин появления повреждений на трубопроводах тепловой сети коммунальных теплоснабжающих компаний, полученных в результате осмотра дефектных труб линейным персоналом филиалов, показал, что около 23...27% повреждений были вызваны внутренней коррозией. Однако необходи-

мо отметить, что около 45...50% отказов на тепловых сетях связаны с трубопроводами, которые на поверхности металла труб имели явные признаки совместного действия внутренней и наружной коррозии. Но, поскольку наружная коррозия была проявлена более активно, чем внутренняя коррозия трубопровода, причиной появления отказа была определена первая из них. Повреждения, вызванные внутренней коррозией, обычно имеют вид небольших сквозных отверстий, при которых дно коррозионной лунки достигает внешней поверхности трубы или щели в сварочном шве. Протечки через такие повреждения не велики, но их трудно обнаружить, потому их своевременно не устраняют. Сетевая вода, выходя под давлением из сквозного отверстия, увлаж-

няет и разрушает гидро- и теплоизоляцию. В результате на наружной поверхности трубы создаются благоприятные условия для интенсивного развития наружной коррозии (рис. 7).

В отличие от внутренней коррозии, наружная коррозия реализуется как сплошное утонение металла на большой площади. Когда толщина стенки трубы уменьшается до критической величины, она разрушается, приводя к интенсивной протечке теплоносителя. Таким образом, можно сделать вывод, что наличие внутренней коррозии в данном случае является первопричиной возникновения отказа на трубопроводе из-за наружной коррозии.

Повреждаемость внутриквартальной тепловой сети можно характеризовать следующим образом:

- внутренняя коррозия трубопроводов (60...70 %);
- наружная коррозия (23...27%);
- низкое качество проведения строительных и ремонтных работ (5...7%) [7].

Одним из важных факторов, влияющих на надежность работы тепловой сети, является внутренняя коррозия трубопроводов. Разрушение металла является одним из проявлений внутренней коррозии, которая приводит не только к снижению надежности транспортировки тепловой энергии, но и ухудшает качество теплоснабжения. Внутренняя коррозия приводит к образованию на стенках трубопроводов слоев железистых отложений, которые увеличивают гидравлическое сопротивление трубопроводов, в результате чего, для поддержания необходимого гидравлического режима в системе теплоснабжения, эксплуатационный персонал вынужден повышать давление в подающем трубопроводе. Из-за повышенного давления в трубопроводах вероятность появления свищей возрастает, а надежность транспортировки тепловых сетей снижается. Циркулирующие в системе продукты коррозии, попадая в домовые системы, накапливаются в отопительных приборах и уменьшают обогрев помещений (рис. 8).

Такие действия не только ухудшают режимы работы системы отопления в целом, но и увеличивают количество используемой подпиточной воды, а, следовательно,

способствуют попаданию дополнительного кислорода и увеличению внутренней коррозии трубопроводов. Эксплуатационный персонал, обслуживающий трубопроводы горячего водоснабжения от групповых котельных, которые не имеют деаэрационной обработки подпиточной воды, утверждает, что внутренние поверхности трубопроводов спустя 3-4 года “зарастают” железистыми отложениями. Поэтому эксплуатационному предприятию приходится экстренно проводить замену трубопроводов [7]. Мы не будем подробно останавливаться на тех факторах, которые приводят к коррозионным отложениям и как с этим борются теплоснабжающие компании. Но проблема коррозии внутренней/ или наружной поверхности на трубопроводах тепловых сетей продолжает существовать. Наша компания предлагает решить эту проблему с помощью антикоррозионной защиты внутренней и/или наружной поверхности стальных труб для тепловых сетей в заводском исполнении при перекладке и новом строительстве. Правильность выбранного направления подтверждается проведенным в 2015 г. в рамках сотрудничества с Некоммерческим партнерством «Российское Теплоснабжение» опросе: «Считаете ли Вы целесообразным в Вашей системе теплоснабжения применить новые стальные трубы с внутренним и/или наружным антикоррозионным покрытием в заводском исполнении при устройстве тепловых сетей» среди 22-х теплоснабжающих компаний, принявших участие в опросе, 14 организаций ответили утвердительно, что составило (62%).

С целью определения влияния применения антикоррозионного минерально-полимерного покрытия на эксплуатационные характеристики трубопроводов, а именно, на срок их службы при расчетной толщине стенки трубопроводов тепловых сетей с параметрами теплоносителя $T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=1,6\text{ МПа}$, институтом ОАО «ВНИПИэнергопром» был проведен технико-экономический расчет, который установил следующее.

1. Применение в качестве антикоррозионной защиты минерально-полимерного покрытия приводит к увеличению срока

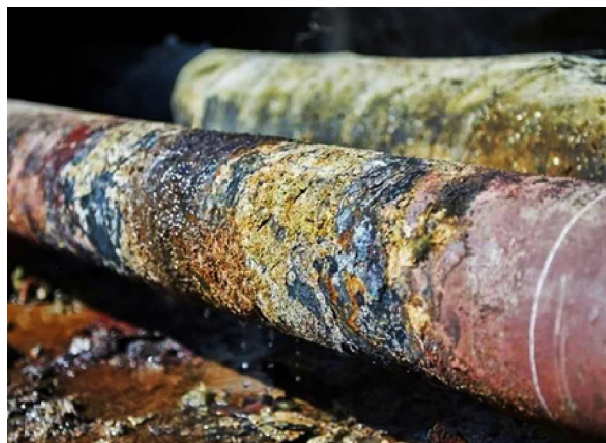


Рис. 7. Дефекты наружной коррозии на тепловых сетях [6]

Fig. 7. Defects of external corrosion on heating networks [6]

службы трубопроводов за счет снижения скорости наружной коррозии. Увеличение срока службы трубопроводов составляет от 12 до 50 лет.

2. Расчет приведенных затрат, определенных настоящим технико-экономическим обоснованием, показывает, что применение антикоррозионного МПП снижает их в зависимости от диаметра трубопровода на 12...21% относительно обычных трубопроводов, не использующих антикоррозионную защиту.

3. Применение антикоррозионного МПП приводит к снижению эксплуатационных затрат на ремонт трубопроводов, в связи с отсутствием затрат на замену стальных трубопроводов, а сводится только к обновлению изоляционного слоя.

4. Расчеты срока службы трубопроводов могут служить основанием для снижения нормативной толщины стенки за счет отсутствия прибавки на коррозию на 15...20% и, соответственно, снижению капитальных затрат на строительство.

5. Сравнение математических моделей трубопроводов при применении МПП и уменьшении толщины стенки трубопровода с моделью с нормативной толщиной стенки без применения МПП показало, что эквивалентное число полных циклов в обоих вариантах соответствует безаварийной работе трубопроводов на протяжении 30 лет, а использование МПП приводит к продлению ресурса и соответственно к снижению приведенных затрат настоящего обоснования.

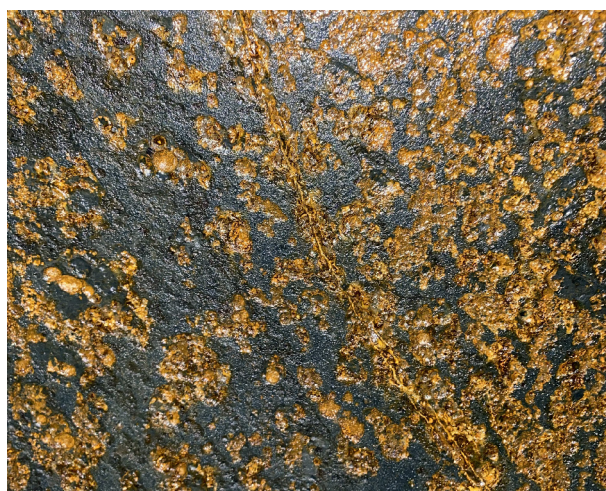


Рис. 8. Внутренняя коррозия на тепловых сетях [6]

Fig. 8. Internal corrosion on heating networks [6]

Зачем нужно антикоррозионное покрытие труб?

Одной из важнейших задач эксплуатации тепловых сетей является защита тепловых сетей от коррозии. Незащищенные трубопроводы подвержены коррозии независимо от того, где они находятся: зарыты они под землей, установлены над поверхностью или, тем более, под водой, они будут терять свои эксплуатационные характеристики. Коррозия трубопроводов – явление, обусловленное, главным образом, электрохимическими реакциями окисления металла при взаимодействии с влагой.

Металл постепенно видоизменяется на ионном уровне и, распадаясь, исчезает с поверхности трубы. Окисление, характеризующее феномен коррозии металлических трубопроводов, может происходить по различным причинам и, следовательно, возникает на основе различных механизмов. В этой связи при выборе наиболее подходящих способов противодействия механизмам коррозии необходимо учитывать особенности ситуации, в которой она наблюдается.

Для защиты труб тепловых сетей от наружной коррозии в зависимости от способа прокладки и температуры теплоносителя применяют пассивную защиту с помощью изолирующих антикоррозионных покрытий, защищающих стальные трубы от внешнего воздействия. Кроме антикоррозионных свойств, покрытие должно обладать термостойкостью при максимальной температуре теплоносителя.

Надёжная защита трубопроводов является гарантией длительной, безаварийной эксплуатации. Поэтому важно создавать такие трубы, которые были бы защищены антикоррозионным покрытием, предотвращающим разрушение стенок труб и продлевающие срок их эксплуатации (*рис. 9*).

В рамках продвижения данного направления совместно с теплоснабжающими компаниями ПАО «МОЭК», ГУП «ТЭК СПб» и ООО «Петербургтеплоэнерго» были выполнены пилотные проекты и проведены соответствующие НИОКР.

Цели проведения работ

1. Повышение надежности и долговечности тепловых сетей за счёт применения пре-

дизолитированных труб с внутренним и/или наружным антикоррозионным минерально – полимерным покрытием в заводском исполнении при новом строительстве, реконструкции и замене участка тепловой сети под проезжей частью, а также при открытой и закрытой системах теплоснабжения.

2. Определение целесообразности и эффективности применения в тепловых сетях стальных труб и фасонных изделий с наружным минерально-полимерным покрытием «ТЮКОН» (МПП «ТЮКОН») под тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой.

Повысить надежность и долговечность трубопроводов в ППУ-изоляции можно путем введения в конструкцию предварительно изолированных стальных труб с антикоррозионным покрытием.

Коррозия на трубах с ППУ-изоляцией может возникнуть несмотря на наличие пенополиуретанового слоя на трубопроводе. Увлажнение ППУ-изоляции – наиболее распространённая причина наружной коррозии стальной трубы. Это может происходить вследствие нарушения ее герметичности в местах расположения муфт, стыков, прочих узлов конструкции, при механических повреждениях оболочки. Помимо вышеперечисленного, коррозия труб в пенополиуретановой оболочке может происходить по следующим по причинам:

- некачественный монтаж изоляции,
- низкоккачественные материалы,
- низкая адгезия пенополиуретана к трубе.
- скопление жидкости в низинах, в месте расположения участков трубопровода,
- при резких перепадах температуры образующаяся конденсация может привести к коррозии.

Этапы эволюции покрытий трубопроводов показаны на *рис. 10*.

Подытоживая все вышесказанное, можно сформулировать задачи работы организации ООО «Су-87». Создание образцов труб с наружным минерально-полимерным покрытием «ТЮКОН» (МПП «ТЮКОН») и индустриальной ППУ-изоляцией, проведение испытаний на соответствие ГОСТ 30732-2020, определение величины изменения стоимости труб с наружным МПП «ТЮКОН» и индустриальной ППУ-изоляции.

ей по сравнению с трубами в ППУ-изоляции без наружной антикоррозионной защиты, определение возможности нанесения МПП «ТЮКОН» на стыки в процессе строительно-монтажных работ, определение величины увеличения продолжительности выполнения строительно-монтажных работ и их стоимости. Общий вывод о целесообразности и эффективности применения в тепловых сетях стальных труб и фасонных изделий с наружным МПП «ТЮКОН» под тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой.

Применение и использование результатов работы

Результаты проведенных исследований будут рассматриваться на заседании технического совета АО «Газпром теплоэнерго». В случае положительного решения будут проведены опытно – конструкторские работы в рамках постановки продукции в производство, а также для разработки приспособлений для монтажа труб с наружным МПП «ТЮКОН» под тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой. После этого будет рекомендовано применение стальных труб и фасонных изделий МПП «ТЮКОН» под тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой

на объектах АО «Газпром теплоэнерго», а также на объектах ДЗО АО «Газпром теплоэнерго».

Область применения

Результаты работ будут использованы заказчиком в качестве методики монтажа и ремонта труб с наружным МПП «ТЮКОН» покрытием под ППУ-изоляцией в заводском исполнении, а также необходимых для монтажа и ремонта приспособлений.

Работа в АО «Газпром теплоэнерго» проводится впервые. Новизна работы заключается в получении новых научных знаний о целесообразности и эффективности нанесения антикоррозионного МПП «ТЮКОН» на наружную поверхности стальных трубопроводов тепловых сетей с учетом его технических характеристик и различных условий эксплуатации, основанных на результатах натурных испытаний и технико-экономических критериях эффективности, определенных по разработанным методикам. По результатам проведенного мониторинга представленных объектов после 2-х лет эксплуатации можно сделать следующие выводы.

1. При проведении визуального и инструментального контроля объекта ООО «Петербургтеплоэнерго» (г. Санкт-Петербург)



Трубы с наружным антикоррозионным покрытием МПП

/ Pipes with external anti-corrosion coating MPP



Трубы с наружным антикоррозионным покрытием МПП под ППУ-изоляцией

/ Pipes with external anti-corrosion coating MPP under PPU insulation

Рис. 9. Стальные трубы с антикоррозионным МПП

Fig. 9. Steel pipes with anticorrosive MPP

бург г. Зеленогорск, ул. Ленина, д.16 ТК-3), где расположены опытные образцы труб с наружным антикоррозионным МПП «ТЮКОН» под ППУ-изоляцией структурных изменений, влияющих на характеристики наружной поверхности трубопровода, не обнаружено. Результаты мониторинга подтверждают заявленные физико-химические характеристики минерально-полимерного покрытия.

2. В целом состояние МПП на объектах ООО «Петербургтеплоэнерго» после года работы в эксплуатационном режиме оценивается как удовлетворительное.

3. Предлагаемая компанией ООО «СУ-87», технология антикоррозионной защиты и восстановления деаэраторов и наружной поверхности стальных труб в тепловых камерах позволяет на длительный срок продлить их эксплуатацию.

Также, в соответствии с программой испытаний в рамках НИОКР, завершились исследования по определению целесообразности и эффективности применения в тепловых сетях стальных труб и фасонных изделий с наружным минерально-полимерным покрытием «ТЮКОН» под тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой со сроком службы 50 и более лет. Испытания проводила испытательная лаборатория ООО «КАРТЭК» (Ассоциации разработчиков и производителей средств противокоррозионной защиты для топливно-энергетического комплекса России). По результатам испытаний МПП «ТЮКОН» может эксплуатироваться в условиях теплоснабжения на протяжении 50 лет, причем, как само защитное покрытие ТЮКОН, так и система «стальная труба – слой МПП «ТЮКОН» – слой ППУ теплоизоляции».

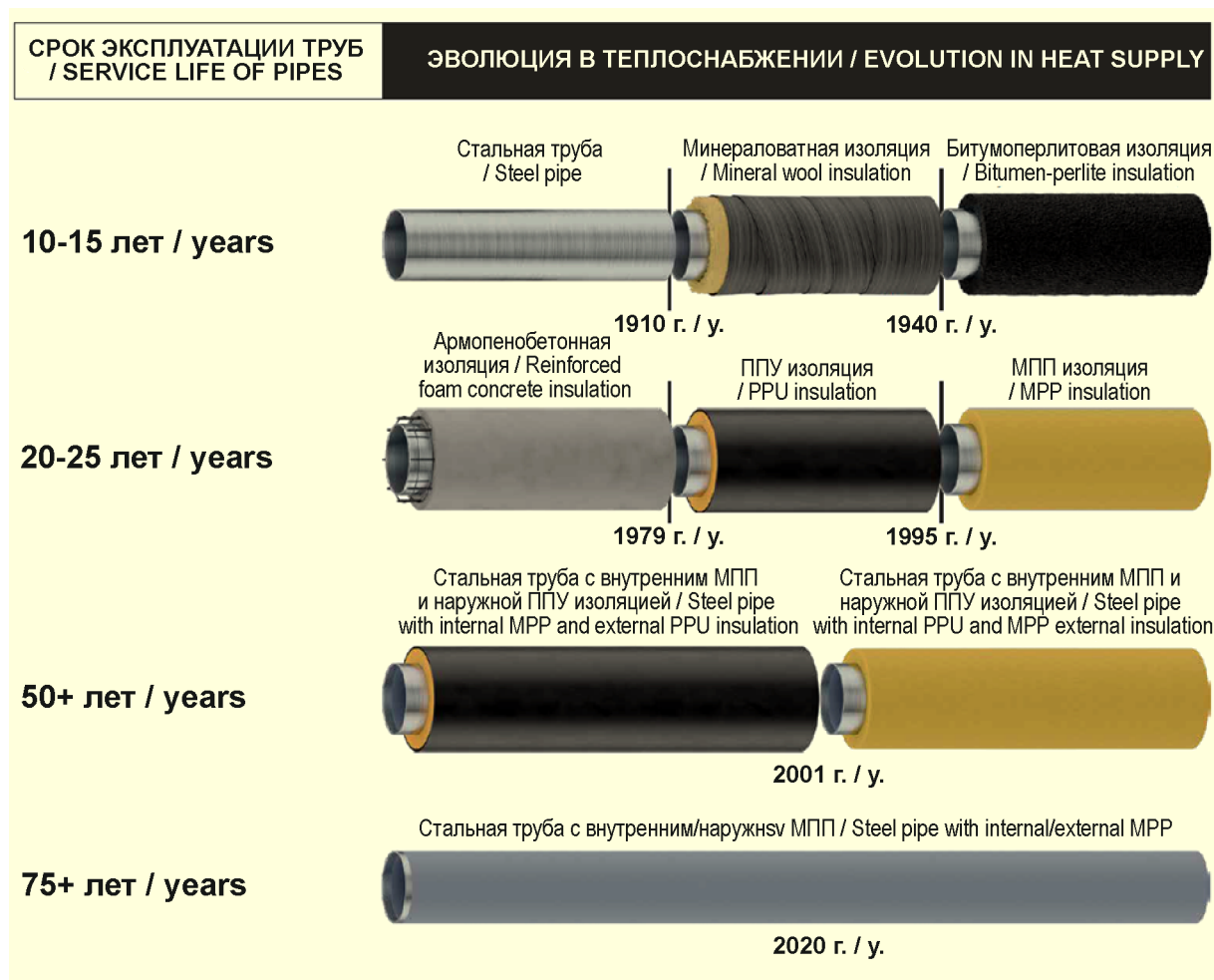


Рис. 10. Эволюция в теплоснабжении

Fig. 10. Evolution in heat supply

Основные преимущества МПП покрытия и их обоснование

Как показали испытания и многолетний опыт применения МПП на объектах теплоснабжения, на сегодняшний день преимущества МПП перед ЛКП в этом направлении неоспоримы, особенно внутреннего покрытия трубопроводов тепловых сетей. МПП имеет сертификат на применение в качестве антикоррозионного покрытия для защиты металлических изделий и сооружений, емкостей и другого оборудования в практике централизованного холодного и горячего хозяйственно-питьевого водоснабжения отвечающих единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям и работающих в диапазоне от -40...+180 °С.

Основные преимущества МПП

1. Высокая прочность и износостойкость.

Минерально-полимерное покрытие содержит до 70...80% различных минеральных составляющих, которые формируют жесткую структуру материала. Полимерная составляющая связывает частицы, обеспечивая устойчивость к механическим нагрузкам. Благодаря высокой плотности (1800...2100 кг/м³) материал имеет адгезионную прочность от 1,0...9,0 МПа.

2. Водо- и влагостойкость.

МПП практически не впитывает воду, это достигается за счет отсутствия в составе гигроскопичных компонентов и плотной структуры, в котором полимерная составляющая блокирует доступ влаги. Такие свойства позволяют использовать МПП в различных областях и средах без риска деформации или отслоения.

3. Устойчивость к температурным перепадам.

Коэффициент линейного теплового расширения МПП соответствует аналогичному показателю по стали, причем никаких трещин на нем не образуется.

4. Долговечность и экологичность.

Срок службы МПП достигает 20...35 лет благодаря устойчивости к УФ-излучению, химическим веществам и микроорганизмам. В составе отсутствуют токсичные компоненты (формальдегид, фенолы), а полимеры используются в первичной форме, что соответ-

ствует классу экологичности Е0/Е1. Минеральные наполнители (например, карбонат кальция) также безопасны для здоровья.

5. Простота монтажа и ремонта.

Нанесение окрасочного состава может осуществляться вручную (с применением кистей или валиков), пневматическим или безвоздушным распылением. Ремонт дефектных мест (отслоений, вздутий, подтеков, непрокрашенных мест) покрытия исправляют следующим образом: дефектные участки покрытия удаляют, зашкуривают, обезжиривают растворителем и сушат. На дефектное место наносят рабочие покрытия при помощи кисти по полной технологии.

6. Пожаробезопасность.

Материал относится к группе горючести Г1 по ГОСТ 30244-94 (слабогорючий), группа воспламеняемости В1 по ГОСТ 30402-96 (трудновоспламеняемый) группа распространения пламени РП 1 по ГОСТ Р 51032-97 (нераспространяющий).

Заключение

Преимущества МПП достигаются за счет уникальной комбинации минеральных наполнителей и полимерной составляющей. Минеральные наполнители обеспечивают прочность и стабильность, а полимеры – гибкость, влагостойкость и долговечность. Эти свойства делают материал универсальным для коррозионной защиты внутренней/наружной поверхности стальных и железобетонных оснований превосходя традиционные решения по многим параметрам.

В связи с вышеизложенным, мы готовы к всестороннему и долгосрочному сотрудничеству с подрядными и управляющими компаниями работающих в сфере ЖКХ. Наш опыт и качества наших покрытий позволит Вам расширить сферу Вашей деятельности и обеспечить возможность продвижения на рынке ЖКХ. Компания приглашает все заинтересованные организации к сотрудничеству в создании производства предизолированных труб для теплоснабжения.

Литература

1. Кашеев В., Поляков В. Повышение надежности и долговечности трубопроводов тепловых сетей // Коммунальный комплекс



России. – 2022. – № 1 (211). – С. 38-41.

2. Трубопровод. РФ. Все о прокладке трубопроводов и инженерных коммуникаций в России. <http://трубопровод.рф/статьи/все/трубопроводы-прокладка-трубопроводов/>

3. Павел Завальный. Проблемы теплоснабжения имеют глубокие исторические корни. <http://komitet-energo.duma.gov.ru/novosti/5f76f914-ba3f-4bcc-8db7-b76049a17744> (Дата публикации 10.01.2024 г.)

4. Злобин В.Н. Минерально-полимерные покрытия для защиты трубопроводов // Коммунальный комплекс России. – 2017. – № 6 (156). – С. 44-46.

5. Балабан-Ирменин Ю.В., Липовских В.М., Рубашов А.М. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей. – М.: Издательство «Новости теплоснабжения», 2008. – 288 с.

6. Москалёв И.Л., Литвак В.В. Повреждаемость основных узлов сетей теплоснабжения городов российской Федерации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 7. – С. 70-80.

7. Брусов К.Н., Сlepchenok В.С. 15 лет применения технологии коллоидного ингибирования коррозии/отложений веокросол. // Вестник комитета по тарифам Санкт-Петербурга. Комментарии специалистов. – 2008. – № 1. – С. 1-34.

References

1. Kashcheev, V., Polyakov, V. (2022). Im-

proving the reliability and durability of heating network pipelines. *Communal complex of Russia*, (1), 38-41. (in Russ.)

2. Pipeline. RF. All about laying pipelines and utilities in Russia. <http://truboprovod.rf/articles/all/truboprovody-prokatka-truboprovodov-kommunalnoe-khozyaistvo-Rossii>

3. Pavel Zavalny. The problems of heat supply have deep historical roots. <http://komitet-energo.duma.gov.ru/novosti/5f76f914-ba3f-4bcc-8db7-b76049a17744> (Publication date 01.10.2024)

4. Zlobin, V. N. (2017). Mineral-polymer coatings for pipeline protection. *Communal complex of Russia*, (6), 44-46. (in Russ.)

5. Balaban-Irmenin, Yu. V., Lipovskikh, V. M. & Rubashov, A. M. (2008). *Protection against internal corrosion of water heating network pipelines*. Moscow: Publishing house «Novosti Teplosnabzheniya». (in Russ.)

6. Moskalov, I. L., Litvak, V. V. (2015). Damageability of the Main Nodes of Heat Supply Networks in Cities of the Russian Federation. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, (7), 70-80. (in Russ.)

7. Brusov, K. N., Slepchenok, V. S. (2008). 5 years of application of the technology of colloidal inhibition of corrosion/deposits Veokrosol. *Bulletin of the Committee on Tariffs of St. Petersburg. Comments of specialists*, (1), 1-34. (in Russ.)

Информация об авторах

Злобин Виктор Николаевич, заместитель генерального директора, ООО «Специализированное управление – 87», г. Москва, Российская Федерация

Information about authors

Victor N. Zlobin, Deputy General Director, Limited Liability Company Specialized Management – 87, Moscow, Russian Federation



СЕРТИФИКАЦИЯ

Сертификаты, выданные Центральным НИИ коррозии и сертификации и ООО «КАРТЭК» в I квартале 2025 г.

Предприятие-изготовитель	Наименование продукции
Сертификаты соответствия	
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Добавка для приготовления бурового раствора «GERTEKS-EK-3»
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Реагент «GERTEKS-Lig»
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Реагент «GERTEKS-FL»
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Модификатор реологии буровых растворов «GERTEKS-MR-8», «GERTEKS-MR-8S»
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Реагент для буровых растворов «GERTEKS СУХАЯ СМАЗКА»
АО «НГ Кемикалз», г. Москва	Синтетические гелеобразователи NG FX-1, NG FX-2, NG FX-3
ООО «2С», г. Москва	Полимерминеральный состав 2С-Полимин
ООО «ТД «ЭКОНО-ТЕХ», г. Москва	Водный сшиватель WXL-1
ООО «ТД «ЭКОНО-ТЕХ», г. Москва	Инкапсулированный деструктор WBCap-SB
ООО «ВАДИС-Центр», г. Дубна	Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной обо- лочкой
ООО «Бизнес-Групп», г. Самара	Реагенты универсальные нефтяные РУН
ООО ПТФ «ЭРА», г. Самара	Реагент для подготовки нефти - «ЭРА-ПН-1» (марки А, О, В)
ООО «СПЕКТР», г. Самара	Полиакриламид модифицированный «ГЕОПОЛ» (марок ГЕОПОЛ-СВ, ГЕОПОЛ-ВВ)
ООО «СПЕКТР», г. Самара	Силикат натрия (калия) модифицированный «ГЕОСИЛ»
ООО «Медиум-Строй», г. Дубна	Трубы и фасонные изделия стальные в пенопо- лимерминеральной изоляции
ООО «АПИ Транзит», г. Екатеринбург	Утяжелитель карбонатный кислоторастворимый



СЕРТИФИКАЦИЯ
ПРОДОЛЖЕНИЕ

Сертификаты на применение химпродукта в технологических процессах добычи и транспорта нефти	
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Добавка для приготовления бурового раствора «GERTEKS-EK-3»
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Реагент «GERTEKS-Lig»
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Реагент «GERTEKS-FL»
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Модификатор реологии буровых растворов «GERTEKS-MR-8», «GERTEKS-MR-8S»
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Реагент для буровых растворов «GERTEKS СУХАЯ СМАЗКА»
АО «НГ Кемикалз», г. Москва	Синтетические гелеобразователи NG FX-1, NG FX-2, NG FX-3
ООО «ТД «ЭКОНО-ТЕХ», г. Москва	Водный сшиватель WXL-1
ООО «2С», г. Москва	Полимерминеральный состав 2С-Полимин
ООО «ТД «ЭКОНО-ТЕХ», г. Москва	Инкапсулированный деструктор WBCap-SB
ООО ПТФ «ЭРА», г. Самара	Реагент для подготовки нефти - «ЭРА-ПН-1» (марки А, О, В)
ООО «СПЕКТР», г. Самара	Полиакриламид модифицированный «ГЕОПОЛ» (марок ГЕОПОЛ-СВ, ГЕОПОЛ-ВВ)
ООО «СПЕКТР», г. Самара	Силикат натрия (калия) модифицированный «ГЕОСИЛ»
ООО «АПИ Транзит», г. Екатеринбург	Утяжелитель карбонатный кислоторастворимый

ИЛ «Центр физхимэкспертизы»

Испытательная лаборатория «ЦЕНТР СУДЕБНЫХ И НЕСУДЕБНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТИЗ И ИССЛЕДОВАНИЙ» (ИЛ «Центр физхимэкспертизы», Аттестат аккредитации ТЭК RU. 03 ЮЛ22-Кор-019), созданная совместно Центральным научно-исследовательским институтом коррозии и сертификации и Институтом физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, проводит **все виды физико-химических анализов, экспертиз, обследований материалов и оборудования, в том числе для арбитражных процессов**. По результатам работы оформляются официальные протоколы и заключения.

ИЛ «Центр физхимэкспертизы» проводит также **анализы химических продуктов, нефти и нефтепродуктов на содержание легких хлорорганических соединений (ЛХОС) и четвертичных аммонийных соединений (ЧАС)**.

+7 985 776 10 21

+7 916 233 96 59

e-mail: cartec-com@mail.ru





ЗАО «ЭЛЕКТРОХИМЗАЩИТА»

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОДОВ АНОДНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ СЕРИИ «ЭЛЭР» ИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО ЭЛАСТОМЕРА ДЛЯ УСТАНОВОК КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ В ГРУНТЕ, ПРЕСНОЙ И МОРСКОЙ ВОДЕ

Собственная оригинальная, согласованная с ОАО «ГАЗПРОМ» и ОАО «ВНИИСТ» нормативно-техническая документация по проектированию, монтажу и эксплуатации эластомерных электродов.

Продукция аттестована к серийному производству и применению в 1999 году Межведомственной комиссией ОАО «ГАЗПРОМ», сертифицирована органами Госстандарта РФ, разрешена к применению Ростехнадзором РФ.

Продукция эксплуатируется БОЛЕЕ 20 ЛЕТ

**ШИРОКИЙ
СПЕКТР
СЕРИЙНО
ВЫПУСКАЕМЫХ
МОДИФИКАЦИЙ
ЭЛЕКТРОДОВ**

- ЭЛЕКТРОДЫ АНОДНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО ТИПА
- МОДУЛИ АНОДНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ
- ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ГЛУБИННЫХ АНОДНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ
- КОМПЛЕКТНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ВСЕХ МОДИФИКАЦИЙ В ЗАВОДСКОЙ КОКСОВОЙ УПАКОВКЕ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КПД ЗАЩИТЫ 85–90 %

www.anod-er.ru

ЗАО «ЭХЗ»

Тел./факс (4872) 26-77-76, 70-01-33

E-mail: ehz@tula.net; ehz-eler@mail.ru