

УДК 620.16; 620.18; 620.193

DOI: 10.17122/ngdelo-2021-1-121-130

ИССЛЕДОВАНИЕ БАРЬЕРНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

STUDY OF METALLIZATION COATINGS BARRIER PROPERTIES

Ж. В. Князева
Zhanna V. Knyazeva

ООО «НПЦ «Самара»,
Самарский государственный
технический университет,
г. Самара, Российская Федерация

SPC «Samara» LLC,
Samara State Technical University,
Samara, Russian Federation

П. Е. Юдин
Pavel E. Yudin

ООО «НПЦ «Самара»,
Самарский государственный
технический университет,
г. Самара, Российская Федерация

SPC «Samara» LLC,
Samara State Technical University,
Samara, Russian Federation

С. С. Петров
Sergey S. Petrov

ООО «НПЦ «Самара»,
г. Самара, Российская Федерация

SPC «Samara» LLC,
Samara, Russian Federation

А. В. Максимук
Andrey V. Maximuk

ООО «НПЦ «Самара»,
г. Самара, Российская Федерация

SPC «Samara» LLC,
Samara, Russian Federation

Вопрос обеспечения коррозионной стойкости оборудования на сегодняшний день остается актуальным для нефтяной и газовой промышленности. Применение металлизационных покрытий является эффективным способом защиты оборудования нефтяной и газовой промышленности от коррозии, тем не менее, как и в любой области техники, имеют место случаи отказа оборудования, связанные в первую очередь с разрушением слоя защитного покрытия.

В статье представлены результаты автоклавных испытаний различных типов металлизационных покрытий, применяемых в нефтяной и газовой промышленности.

Автоклавные испытания проводились в минерализованных средах, насыщенных углекислым газом и сероводородом. Проведение автоклавных испытаний корректно моделирует разрушения, наблюдаемые в процессе эксплуатации.

Автоклавные тесты, применяемые для испытания внутренних антикоррозионных покрытий насосно-компрессорных труб, конгруэнтны по отношению к металлизационным покрытиям, применяемым в скважинных условиях, и корректно моделируют разрушения, наблюдаемые в процессе эксплуатации.

Существенное варьирование химическим составом при недостаточной толщине покрытия не приводит к ожидаемому антикоррозионному эффекту. Применение более дорогих типов покрытий (например WC-Ni (10 %)) при уменьшении толщины не целесообразно, поскольку в совокупности с проявлением пористости покрытия проникновение коррозионно-активных компонентов к субстрату не ограничивается.

Анодные покрытия на основе алюминия (в т.ч. легированные магнием) не обладают коррозионной стойкостью в средах, содержащих углекислый газ, их применение для скважинных условий эксплуатации не целесообразно.

Наилучшие результаты по коррозионной стойкости были получены для покрытия типа Ni(основа)-Cr(17 %)-B-Si, при этом толщина слоя покрытия должна составлять не менее 200 мкм.

Ключевые слова

металлизационные покрытия;
коррозия; автоклавные испытания;
катодные покрытия; структура

The issue of ensuring the corrosion resistance of equipment today remains relevant for the oil and gas industry. The use of metallization coatings is an effective way to protect the equipment of the oil and gas industry from corrosion, however, as in any field of technology, there are cases of equipment failure, primarily associated with the destruction of the protective coating layer.

The article presents the results of autoclave tests of various types of metallization coatings used in the oil and gas industry.

Autoclave tests were performed in mineralized environments saturated with carbon dioxide and hydrogen sulfide. Conducting autoclave testing correctly simulates the destruction observed in the process of operation.

Autoclave tests used to test internal anti-corrosion coatings of tubing pipes are congruent with metallization coatings used in downhole conditions and correctly simulate the fractures observed during operation.

A significant variation in the chemical composition with insufficient coating thickness does not lead to the expected anticorrosive effect. The use of more expensive types of coatings (for example, WC-Ni (10 %)) with decreasing thickness is not advisable, since in combination with the manifestation of the porosity of the coating, the penetration of corrosive components to the substrate is not limited.

Anodic coatings based on aluminum (including those doped with magnesium) do not have corrosion resistance in environments containing carbon dioxide, their use for downhole operating conditions is not advisable.

The best results in corrosion resistance were obtained for a coating of the Ni(base)-Cr(17 %)-B-Si type, while the thickness of the coating layer should be at least 200 μm .

Введение

Применение металлизационных покрытий является одним из наиболее эффективных способов защиты металлов от губительного воздействия внешних факторов: агрессивных сред, атмосферных осадков и пр. Процесс металлизации известен давно, и начиная с 50-х годов прошлого столетия широко применяется для антикоррозионной защиты металлических конструкций и изделий. Технология газотермического распыления является одной из наиболее распространенных для производства металлических покрытий ввиду своей низкой стоимости относительно других методов и возможности нанесения покрытия на изделия различной конфигурации, что, несомненно, позволяет расширить область ее применения [1–3]. В общем случае сущность процессов газотермического распыления заключается в образовании направленного потока дисперсных частиц напыляемого материала, обеспечивающего перенос их на поверхность обрабатываемого изделия и формирование слоя покрытия. Единая классификация способов газотермического напыления отсутствует, принципиальное отличие способов газотермического напыления определяется видом источника энергии [4].

Металлизационные покрытия имеют достаточно широкую область применения: медицина, авиация и космос, транспорт, металлур-

Key words

metallization coatings; corrosion; autoclave tests; cathode coatings; structure

гия, энергетика, машиностроение, нефтяная и газовая промышленность [5]. Отдельный интерес на сегодняшний день применение металлизационных покрытий представляет для нефтяной и газовой промышленности, поскольку воздействие агрессивной среды способствует ускоренному коррозионному разрушению оборудования, что влечет за собой колоссальные материальные затраты. Защита металла от коррозии особенно актуальна для промысловых трубопроводов, для погружного скважинного оборудования, бурового оборудования.

Технология газотермического напыления активно применяется для защиты сварных стыков промысловых трубопроводов с внутренним антикоррозионным покрытием, поскольку под действием высоких сварочных температур покрытие выгорает, оставляя незащищенными места стыков труб. Дефекты сварного шва и микронеоднородности околошовной зоны подвергаются преимущественному воздействию коррозионной среды, что обуславливает аварийность трубопроводов [6]. Для защиты сварных стыков на концевые участки труб наносится металлизационное покрытие, затем по всей длине трубы наносится внутреннее антикоррозионное покрытие внахлест металлизационному. Защитное покрытие сварного шва формируется при сварке труб за счет того, что расплав самофлюсующегося покрытия растекается по поверхности корня

сварного шва [6]. Для бурильного оборудования технология газотермического напыления применяется для упрочнения (новой) и восстановления (изношенной) поверхности инструмента, например для восстановления ша рошки и долота для вращательного бурения или упрочнения резьб бурильных труб. Применение металлизационных покрытий для защиты погружного скважинного оборудования (основных узлов установок электроцентробежных насосов, включая рабочие органы, погружные электродвигатели (ПЭД)) значительно повышает износо- и коррозионную стойкость, что, в свою очередь, способствует улучшению эксплуатационных свойств изделий, увеличению ресурса работы, повышению надежности изделий, снижению себестоимости их изготовления и обслуживания [7, 8].

Применение металлизационных покрытий является эффективным способом защиты оборудования нефтяной и газовой промышленности от коррозии, тем не менее, как и в любой области техники, имеют место случаи отказа оборудования, связанные, в первую очередь, с разрушением слоя защитного покрытия и последующим ускоренным разрушением металла оборудования. Как следствие, происходит колоссальное увеличение материальных затрат, связанных с простоем, а также ремонтом и заменой оборудования. При всем многообразии материалов и методов нанесения металлизационных покрытий снижение эффективности их применения зачастую обусловлено отсутствием методологии подбора материалов под конкретные условия эксплуа-

тации. В качестве примера можно привести результаты исследований, представленные в работе [7], в которой рассмотрены основные механизмы разрушения металлизационных покрытий погружных электродвигателей в процессе эксплуатации. В работе [7] наглядно продемонстрирована нецелесообразность применения материалов, заведомо не обеспечивающих стойкость к воздействию осложняющих факторов (воздействие коррозионно-агрессивной среды, воздействие абразивных частиц, механические воздействия).

Наибольший интерес представляет механизм коррозионного воздействия агрессивной среды, обусловленный проникновением агрессивных компонентов среды через слой покрытия к металлу изделия с последующим образованием и ростом продуктов коррозии. Данная статья посвящена исследованию защитных свойств металлизационного покрытия. Оценка коррозионной стойкости осуществлялась путем проведения ускоренных испытаний в лабораторном автоклаве. Исследования барьерных металлизационных покрытий различных производителей позволили оценить влияние параметров, характеризующих физические свойства покрытия, на их коррозионную стойкость.

Объекты и методы исследований

В качестве объектов исследования использовались стальные пластины с нанесенным металлизационным покрытием. Сведения о применяемых материалах представлены в таблице 1.

Микроструктуру (морфологию и элементное распределение) покрытий исследовали с

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Маркировка	Состав	Толщина, мкм
Образец № 1	Cr ₃ C ₂ -NiCr (25 %)	60–100
Образец № 2	WC (основа)-Ni (10 %)	40–70
Образец № 3	Ni (основа)-Cr (17 %)-B-Si	менее 40
Образец № 4	Ni (основа)-Cr (17 %)-B-Si	172–800
Образец № 5	«ТСЗП-Н03-ЭДМ.062» (ТСЗП-Н03-ГП.062) Al (основа), Mg (~3 %) с пропиткой	120–260
Образец № 6	Проволока «В.АМг5.Н» Al (основа), Mg (4,86 %), Ti (0,1 %), Mn (0,8 %), Fe (0,14 %), Si (0,05 %)	190–280
Образец № 7	Al (основа), Mg (~3 %) с пропиткой	250–350
Образец № 8	Fe (основа)-Cr (13 %)-Ni (8 %)-Mo (2,5 %) -Si (2,5 %) с пропиткой	293–464

помощью растрового электронного микроскопа FEI QUANTA INSPECT с приставкой для рентгеновского микроанализа EDAX.

Моделирование коррозионного воздействия осуществлялось с использованием лабораторного автоклава, оснащенного всеми необходимыми приборами для возможности

проведения испытаний в агрессивных средах при повышенных давлении, температуре. Оценка результатов испытаний проводилась по изменению внешнего вида, степень коррозионного воздействия оценивалась с помощью растрового электронного микроскопа.

Результаты исследований и обсуждение результатов

Исследуемые защитные покрытия различных производителей являются представителями сразу нескольких классов, имеющих принципиальное различие по механизму защиты стальной подложки. К первому классу относятся катодные покрытия, имеющие более высокий электрохимический потенциал по отношению к защищаемой стали, например покрытия на основе нержавеющей сталей и сплавов, сплавов никеля и других металлов. Катодные покрытия работают, используя изолирующий механизм защиты. Для катодных покрытий очень важным является условие сплошности слоя покрытия, в противном случае при воздействии коррозионной среды образуется гальванический элемент, в котором основной металл будет активно растворяться, будучи анодом. Анодные или протекторные покрытия имеют более низкий электрохимический потенциал по отношению к защищаемой стали, к ним относятся цинковое, алюминиевое, кадмиевое и др. покрытия. В случае применения анодных покрытий условие сплошности покрытия необязательно. При наличии повреждений покрытия или сквозной пористости и действии агрессивной среды возникает гальванический элемент, в котором основной металл будет катодом, а металл покрытия — анодом, поэтому защищаемое изделие не будет корродировать.

Коррозионная стойкость металлизационных покрытий определяется не только химическими свойствами композиции материалов, но и комплексным сочетанием химических, физических технологических свойств. Большое влияние на коррозионную стойкость оказывают параметры проведения испытаний: состав среды, давление и температура испытаний, время выдержки [9]. Проникновение компонентов среды через слой металлизационного покрытия имеет недиффузионный характер, способность покрытия противостоять воздействию среды, в первую очередь, определяется физическими свойствами покрытия (толщиной, плотностью, пористостью и др.). Проведение автоклавных испытаний позволило оценить влияние параметров, характеризующих физические свойства покрытия, на их коррозионную стойкость.

Существующие методы коррозионных испытаний металлизационных покрытий, прописанные в государственных стандартах, применяются для исследований образцов в средах, несоответствующих реальным условиям экс-

плуатации оборудования. На сегодняшний день наиболее близкие к реальным условиям эксплуатации модельные выдержки достигаются с помощью автоклавного теста. Сущность автоклавных испытаний заключается в выдержке подготовленных образцов в среде определенного состава (как жидкой, так и газовой фазой) с заданными температурой и давлением в течение установленного времени [10]. Испытания проводились по методике, разработанной для оценки барьерных свойств внутренних полимерных покрытий [10]. Автоклавные испытания защитных покрытий проводились с использованием стеклянного стакана, исключающего контакт металлизационных покрытий со стенками и металлической оснасткой лабораторного автоклава как непосредственно, так и через электролит. Результаты автоклавных испытаний представлены в таблице 2.

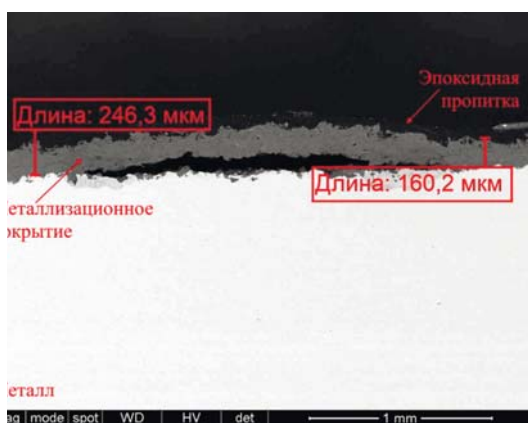
Анодные покрытия. Класс анодных (протекторных) покрытий представляют образцы № 5, № 6, № 7. Поверхность металлизационного покрытия образцов № 5 и № 7 дополнительно покрыта слоем эпоксидного материала, применяемого, как правило, для повышения плотности и снижения проницаемости металлизационного покрытия. Микроструктура покрытия образцов № 5, № 6, № 7 имеет слоистое строение и характеризуется низкой пористостью. Толщина слоя металлизационного покрытия перечисленных образцов не превышает 350 мкм.

Автоклавные испытания покрытия образцов № 5, № 6, № 7 на стойкость к воздействию CO₂-содержащих сред проводились в идентичных условиях: испытательная среда представляла собой 5 %-ый раствор NaCl в воде, насыщенный CO₂ (5 МПа) и N₂ (9 МПа); температура 150 °С, общее давление системы 14 МПа. Длительность испытаний — 240 ч.

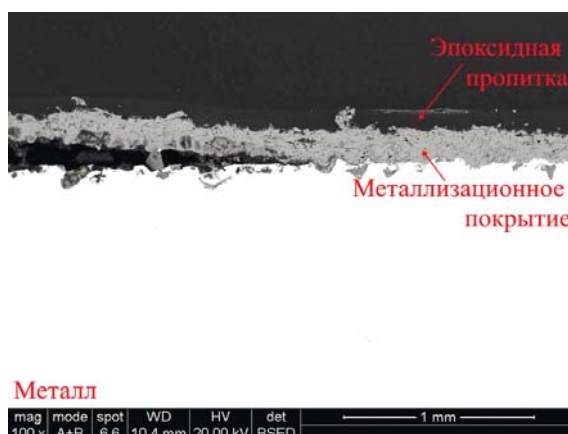
Проведение автоклавных испытаний демонстрирует недостаточный уровень защитных и барьерных свойств анодного покрытия образцов № 5, № 6, № 7. В случае покрытия образцов № 5 проведение автоклавных испытаний на стойкость к воздействию CO₂-содержащих сред способствует образованию вздутий покрытия, локализованных на границе «металлизационное покрытие – подложка» и сопровождается окислением анодного покрытия (рисунок 1). Повреждений слоя эпоксидной пропитки образца № 5 не выявлено, тем не менее, ее наличие не ограничивает доступ компонентов среды под покрытие.

Таблица 2. Результаты автоклавных испытаний на стойкость к воздействию CO₂- и H₂S-содержащей среды

№	Маркировка	Среда	Давление общее, МПа	Температура, °С	Продолжительность, ч	Результат
1	Образец № 1	3 % NaCl, насыщенный H ₂ S (1 МПа), CO ₂ (5 МПа)	10	80	240	Вздутия, коррозия. Потемнение покрытия
2	Образец № 2	3 % NaCl, насыщенный H ₂ S (1 МПа), CO ₂ (5 МПа)	10	80	240	Вздутия, коррозия. Потемнение покрытия
3	Образец № 3	3 % NaCl, насыщенный H ₂ S (1 МПа), CO ₂ (5 МПа)	10	80	240	Коррозия в местах нарушения сплошности покрытия
4	Образец № 4	3 % NaCl, насыщенный H ₂ S (1 МПа), CO ₂ (5 МПа)	10	90	240	Потемнение покрытия, без разрушения
5	Образец № 5	5 % NaCl, насыщенный CO ₂ (5 МПа)	14	150	240	Вздутия, коррозия, изменение цвета покрытия
6	Образец № 6	5 % NaCl, насыщенный CO ₂ (5 МПа)	14	150	240	Вздутия, отслаивание
7	Образец № 7	5 % NaCl, насыщенный CO ₂ (5 МПа)	14	150	240	Разрушение слоя пропитки, окисление металлизационного покрытия
8	Образец № 8	5 % NaCl, насыщенный CO ₂ 5 МПа	14	150	240	Разрушение слоя пропитки. Без разрушения металлизационного покрытия

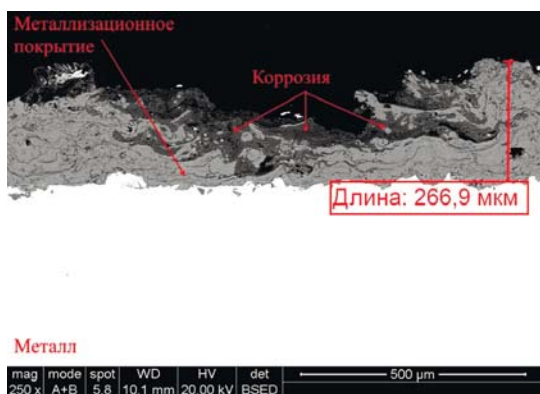


а)

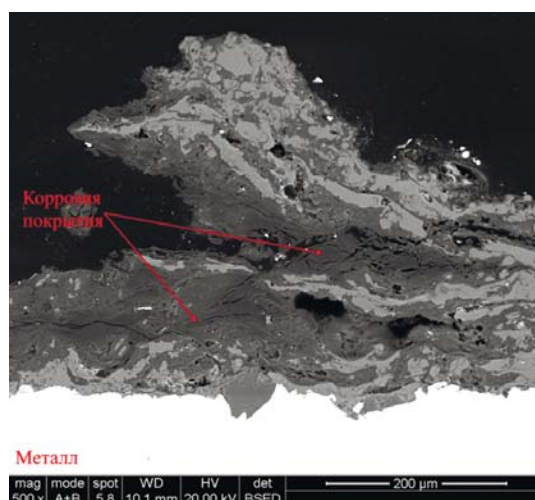


б)

Рисунок 1. Микроструктура металлизационного покрытия образцов № 5 после автоклавных испытаний на стойкость к воздействию CO₂-содержащей среды (увеличение x 100)



а)

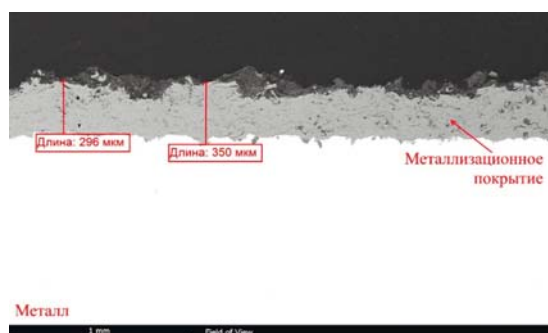


б)

Рисунок 2. Микроструктура металлизационного покрытия образцов № 6 после автоклавных испытаний на стойкость к воздействию CO₂-содержащей среды: увеличение x 250 (а), увеличение x 500 (б)

Автоклавные испытания образцов № 6 в первую очередь способствуют интенсивному окислению поверхностных слоев металлизационного анодного покрытия. Коррозионное разрушение распространяется как вглубь, к поверхности металла, так и по линии сплавления отдельных частиц в слое покрытия, способствуя нарушению когезионных связей в слое покрытия (рисунок 2).

Испытания образцов № 7 к образованию дефектов (вздутия, отслаивания) металлизационного покрытия не привели. В отличие от



а)

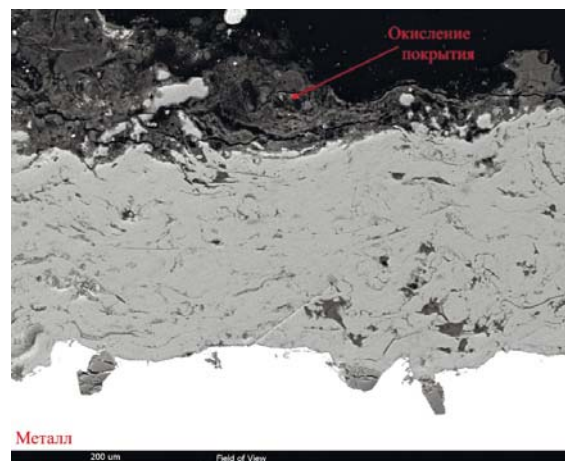
Рисунок 3. Микроструктура металлизационного покрытия образцов № 7 после автоклавных испытаний на стойкость воздействию CO₂-содержащей среды: увеличение x 100 (а), увеличение x 500 (б)

На образцах с металлизационным покрытием анодного типа можно отметить некую закономерность характера разрушения в зависимости от толщины покрытия. Максимальная интенсивность повреждений наблюдается на образцах № 5 с толщиной слоя металлизации до 200 мкм. В данном случае образование повреждений имеет адгезионный характер, область локализации дефектов находится на границе «металл – покрытие». На образцах № 6 с толщиной слоя покрытия до 300 мкм поврежденность покрытия проявляется в нарушении когезионных связей, то есть, процесс разрушения сфокусирован по границам сплавления отдельных частиц. При большей толщине слоя металлизации — до 350 мкм (образец № 7) нарушения адгезионных или когезионных связей отсутствуют. Однако в результате выдержки в агрессивной среде происходит интенсивное окисление поверхностных слоев покрытия, что может говорить о недостаточной коррозионной стойкости покрытия в заданных условиях.

Катодные покрытия. Металлизационное покрытие образцов № 1, № 2, № 3, № 4 и № 8

покрытия образцов № 5 на образцах № 7 наблюдаются многочисленные вздутия и отслаивания эпоксидной пропитки, что приводит к окислению поверхностных слоев металлизационного покрытия (рисунок 3).

Защитное покрытие образцов № 5, № 6 и № 7 действует как анод, и до полного разрушения покрытия поверхность металла является защищенной, однако, наблюдаемая интенсивность повреждений демонстрирует достаточно низкий ресурс исследуемых покрытий в заданных условиях.



б)

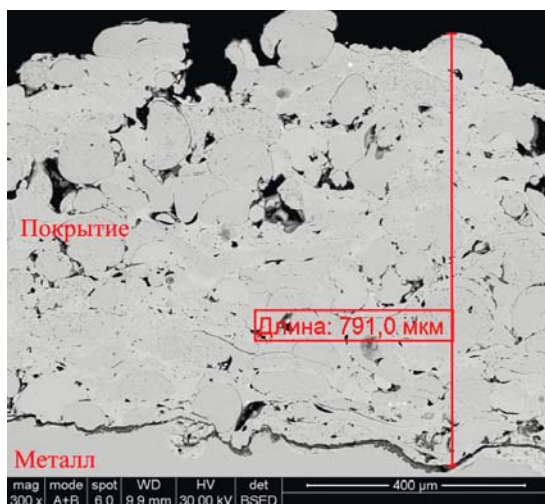
относится к классу катодных покрытий, для формирования которых применяются материалы на основе коррозионностойких сталей и сплавов.

Автоклавные испытания образцов № 4 проводились при температуре 90 °С и общем давлении системы 10 МПа. Испытательная среда представляла 3 %-ый раствор NaCl в воде, насыщенный H₂S (1 МПа), CO₂ (5 МПа), длительность испытаний составляла 240 ч. Покрытие образцов № 4 имеет классическую для газотермических покрытий структуру — слоистую, состоящую из сильнодеформированных напыленных частиц, соединенных между собой по контактным поверхностям (рисунок 4). В структуре покрытия выявлена умеренная пористость, локализованная в основном на стыках частиц. Для покрытия образцов № 4 характерна неравномерная толщина слоя покрытия, при максимальной толщине 800 мкм наблюдаются локальные участки снижения до 172 мкм. После автоклавных испытаний в CO₂- и H₂S-содержащей среде на участках локального снижения толщины наблюдается интенсивное развитие

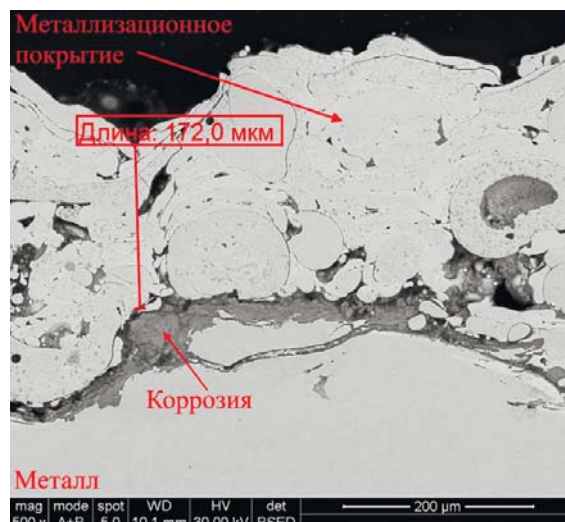
процессов коррозионного разрушения металла подложки, с последующим развитием коррозионного разрушения по механизму подпленочной коррозии (рисунок 4).

Защитное металлизационное покрытие образцов № 3 и № 4 представляют один тип материалов. Для обеих систем наиболее критичными параметрами, предопределяющими ре-

зультаты автоклавных испытаний, являются толщина и пористость слоя металлизационного покрытия (рисунки 4, 5). Полученные результаты позволяют подтвердить тот факт, что низкая толщина покрытия или ее локальное снижение вкупе с пористостью покрытия не обеспечивают необходимый уровень барьерных свойств покрытия.

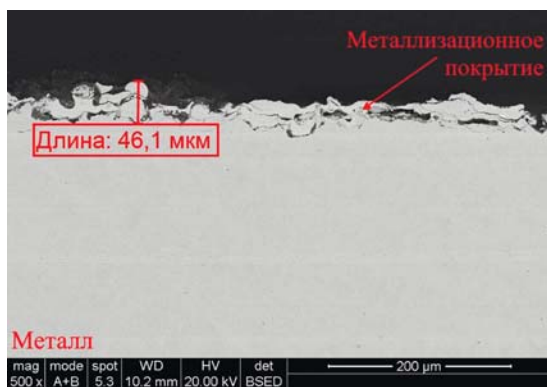


а)

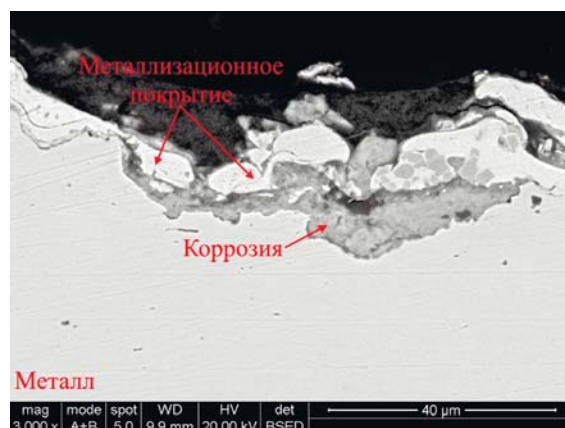


б)

Рисунок 4. Микроструктура металлизационного покрытия образцов № 4 после автоклавных испытаний на стойкость к воздействию CO₂- и H₂S-содержащих сред: увеличение x 300 (а); увеличение x 500 (б)



а)



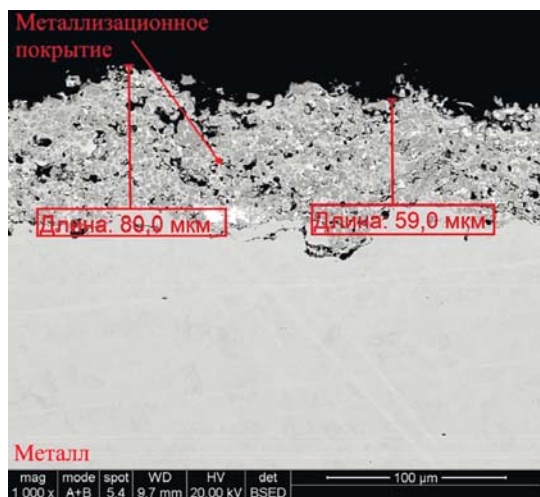
б)

Рисунок 5. Микроструктура металлизационного покрытия образцов № 3: исходное состояние, увеличение x 500 (а); после автоклавных испытаний на стойкость к CO₂- и H₂S-содержащей среде, увеличение x 3000 (б)

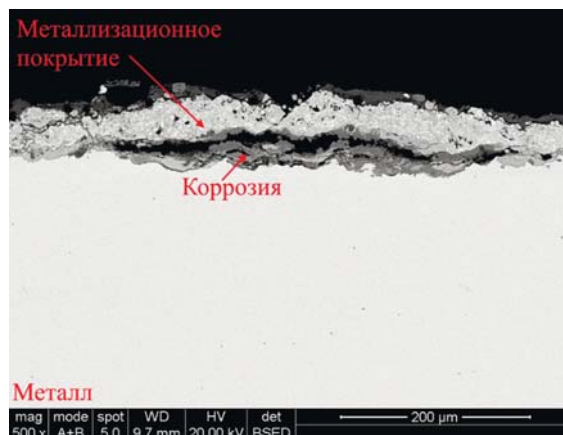
Аналогичные результаты автоклавных испытаний демонстрируют металлизационное покрытие образцов № 1, № 2. В данном случае общая толщина слоя металлизационного покрытия образцов не превышает 100 мкм, при этом в структуре покрытия может наблюдаться высокая пористость. В существующем исполнении защитное покрытие перечисленных образцов не ограничивает доступ коррозионной среды к поверхности металла подложки, спо-

собствуя ее электрохимическому растворению и отслаиванию покрытия (рисунки 6, 7).

Металлизационное покрытие образцов № 8 дополнительно покрыто слоем эпоксидной пропитки (таблица 1). Покрытие образцов № 8 имеет неоднородную структуру, в поперечном сечении расплавленные частицы имеют преимущественно лентообразный изогнутый вид. Толщина слоя покрытия находится в диапазоне 293–464 мкм. Условия про-

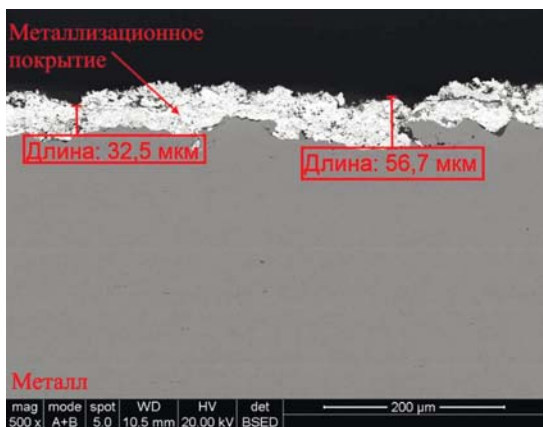


а)

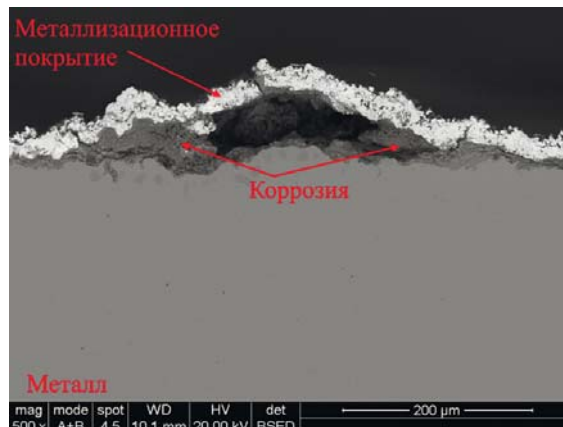


б)

Рисунок 6. Микроструктура металлизационного покрытия образцов № 1: исходное состояние, увеличение $\times 1000$ (а); после автоклавных испытаний на стойкость к CO_2 - и H_2S -содержащей среде, увеличение $\times 500$ (б)



а)



б)

Рисунок 7. Микроструктура металлизационного покрытия образцов № 2: исходное состояние (а); после автоклавных испытаний на стойкость к CO_2 - и H_2S -содержащей среде, увеличение $\times 500$ (б)

ведения автоклавных испытаний соответствуют ранее рассмотренным металлизационным покрытиям анодного типа. В отличие от предыдущих систем образцы № 8 показали удовлетворительные результаты после автоклавных испытаний на стойкость к воздействию CO_2 -содержащей среды. В процессе проведения испытаний происходит разрушение слоя эпоксидной пропитки, при этом каких-либо дефектов в структуре металлизационного покрытия (нарушений адгезионных и когезионных связей, коррозионных повреждений) не выявлено (рисунок 8).

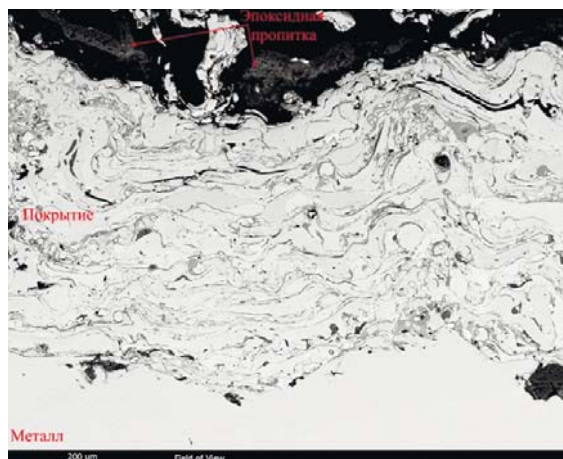
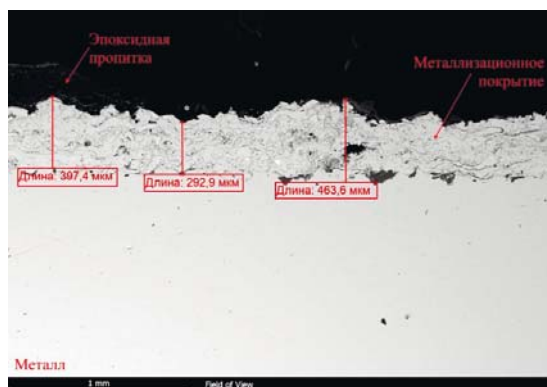
Условия проведения автоклавных испытаний являются достаточно жесткими и оказывают разрушающее воздействие для большинства покрытий. Представленные результаты исследований позволяют сделать следующие практически значимые **выводы**.

1. Автоклавные тесты, применяемые для испытания внутренних антикоррозионных по-

крытий насосно-компрессорных труб [10], конгруэнтны по отношению к металлизационным покрытиям, применяемым в скважинных условиях, и корректно моделируют разрушения, наблюдаемые в процессе эксплуатации [8].

2. Существенное варьирование химическим составом при недостаточной толщине покрытия не приводит к ожидаемому антикоррозионному эффекту. Применение более дорогих типов покрытий (например WC-Ni (10 %)) при уменьшении толщины не целесообразно, поскольку в совокупности с проявлением пористости покрытия проникновение коррозионно-активных компонентов к субстрату не ограничивается.

3. Анодные покрытия на основе алюминия (в т.ч. легированные магнием) не обладают коррозионной стойкостью в средах, содержащих углекислый газ, их применение для скважинных условий эксплуатации не целесообразно.



а)

б)

Рисунок 8. Микроструктура металлизационного покрытия образцов № 8 после автоклавных испытаний на стойкость к быстрой декомпрессии: увеличение $\times 100$ (а); увеличение $\times 500$ (б)

4. Наилучшие результаты по коррозионной стойкости были получены для покрытия типа

Ni(основа)-Cr(17%)-B-Si, при этом толщина слоя покрытия должна составлять не менее 200 мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лурье А.З. Применение газотермических покрытий для повышения ННО УЭЦН // Инженерная практика. 2011. № 4. С. 78–81.

2. Dorfman M.R. Chapter 22 — Thermal Spray Coatings // Handbook of Environmental Degradation of Materials. Norwich: William Andrew, 2018. P. 469–488. DOI: 10.1016/B978-0-323-52472-8.00023-X.

3. Oksa M., Turunen E., Suhonen T., Varis T., Hannula S.-P. Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications // Coatings. 2011. No. 1. P. 17–52. DOI: 10.3390/coatings1010017.

4. Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А., Затока А.Е., Захаров Б.М. Газотермическое напыление. М.: Старая Басманная, 2015. 540 с.

5. Газотермическое напыление // Технологические системы защитных покрытий. URL: <https://www.tspc.ru/competence/technology/thermal-spraying/> (дата обращения: 25.12.2020).

6. Димо В.В. Антискоррозионная защита концевых участков нефтегазопроводных труб // Научный журнал. 2020. № 2 (47). С. 13–16.

7. Князева Ж.В., Юдин П.Е., Амосов А.П., Петров С.С., Максимук А.В. Классификация причин разрушения металлизационного покрытия погружных электродвигателей при эксплуатации // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 9 (99). С. 25–32. DOI: 10.30987/article_5d2df0884cc457.62830322.

8. Князева Ж.В., Юдин П.Е., Петров С.С., Максимук А.В. Применение металлизационных покрытий для защиты погружных электродвигателей насосного оборудования от воздействия осложняющих факторов в нефтяных скважинах // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2020. № 1. С. 75–86. DOI: 10.17073/1997-308X-2020-75-86.

9. Фень Е.К., Пашенко В.Н. Критериальное обобщение физико-механических свойств газотермических покрытий, полученных высокоскоростными методами

// Проблемы тертя та зношування. 2013. №. 59. С. 104–111. DOI: 10.18372/0370-2197.59.5336.

10. Юдин П.Е., Князева Ж.В. Оценка барьерных свойств внутренних антикоррозионных покрытий нефтепроводных и насосно-компрессорных труб с помощью автоклавного теста // Трубопроводный транспорт: Теория и практика. 2016. № 1. С. 14–19.

REFERENCES

1. Lure A.Z. Primenenie gazotermicheskikh pokrytii dlya povysheniya NNO UETsN [Application of Thermal Gas Coatings to Increase the NNO ESP]. *Inzhenernaya praktika — Engineering Practice*, 2011, No. 4, pp. 78–81. [in Russian].

2. Dorfman M.R. Chapter 22 — Thermal Spray Coatings. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. Norwich, William Andrew, 2018. P. 469–488. DOI: 10.1016/B978-0-323-52472-8.00023-X.

3. Oksa M., Turunen E., Suhonen T., Varis T., Hannula S.-P. Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications. *Coatings*, 2011, No. 1, pp. 17–52. DOI: 10.3390/coatings1010017.

4. Baldaev L.Kh., Borisov V.N., Vakhalin V.A., Zatoka A.E., Zakharov B.M. *Gazotermicheskoe napylenie [Thermal Spraying]*. Moscow, Staraya Basmannaya Publ., 2015. 540 p. [in Russian].

5. *Gazotermicheskoe napylenie [Thermal Spraying]. Tekhnologicheskie sistemy zashchitnykh pokrytii*. Available at: <https://www.tspc.ru/competence/technology/thermal-spraying/> (accessed 25.12.2020). [in Russian].

6. Dimo V.V. Antikorrozionnaya zashchita kontsevykh uchastkov neftegazoprovodnykh trub [Anticorrosion Protection of End Sections of Oil and Gas Pipes]. *Nauchnyi zhurnal — Scientific Journal*, 2020, No. 2 (47), pp. 13–16. [in Russian].

7. Knyazeva Zh.V., Yudin P.E., Amosov A.P., Petrov S.S., Maksimuk A.V. Klassifikatsiya prichin razrusheniya metallizatsionnogo pokrytiya pogruzhnykh elektrod-

vigatelei pri ekspluatatsii [Classification of Destruction Reasons of Metalized Coatings in Submerged Electric Motors During Operation]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii — Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2019, No. 9 (99), pp. 25–32. DOI: 10.30987/article_5d2df0884cc457.62830322. [in Russian].

8. Knyazeva Zh.V., Yudin P.E., Petrov S.S., Maksimuk A.V. Primenenie metallizatsionnykh pokrytii dlya zashchity pogruchnykh elektrodvigatelei nasosnogo oborudovaniya ot vozdeistviya oslozhnyayushchikh faktorov v neftyanykh skvazhinakh [Application of Metallization Coatings for Protection of Submersible Electric Motors of Pumping Equipment from Influence of Complicating Factors in Oil Wells]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya — Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2020, No. 1, pp. 75–86. DOI: 10.17073/1997-308X-2020-75-86. [in Russian].

9. Fen E.K., Pashchenko V.N. Kriterial'noe obobshchenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv gazotermicheskikh pokrytii, poluchennykh vysokoskorostnymi metodami [Criteria Generalization of Physical and Mechanical Properties of Thermal Gas Coatings Obtained by High-Speed Methods]. *Problemi tertya ta znoshuvannya —*

Problems of Friction and Wear, 2013, No. 59, pp. 104–111. DOI: 10.18372/0370-2197.59.5336. [in Russian].

10. Yudin P.E., Knyazeva Zh.V. Otsenka bar'ernykh svoystv vnutrennikh antikorrozionnykh pokrytii nefteprovodnykh i nasosno-kompressornykh trub s pomoshch'yu avtoklavnogo testa [Evaluation of the Barrier Properties of the Oil Pipeline of Internal Anticorrosive Coatings and Tubing Using Autoclave Test]. *Truboprovodnyi transport: Teoriya i praktika — Pipeline Transport: Theory and Practice*, 2016, No. 1, pp. 14–19. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Князева Жанна Валерьевна, аспирант кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», СамГТУ, старший научный сотрудник, ООО «НПЦ «Самара», г. Самара, Российская Федерация

Zhanna V. Knyazeva, Postgraduate Student of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department, SamSTU, Senior Researcher, NPC «Samara» LLC, Samara, Russian Federation

e-mail: Knyazeva@npcsamara.ru

Юдин Павел Евгеньевич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», СамГТУ, директор по науке, ООО «НПЦ «Самара», г. Самара, Российская Федерация

Pavel E. Yudin, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department, SamSTU, Director for Science, NPC «Samara» LLC, Samara, Russian Federation

e-mail: Yudin@npcsamara.ru

Петров Сергей Степанович, канд. физ.-мат. наук, начальник аналитического отдела, ООО «НПЦ «Самара», г. Самара, Российская Федерация

Sergey S. Petrov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Analytical Department, NPC «Samara» LLC, Samara, Russian Federation

e-mail: Petrov@npcsamara.ru

Максимук Андрей Викторович, управляющий, ООО «НПЦ «Самара», г. Самара, Российская Федерация
Andrey V. Maximuk, Head Manager, NPC «Samara» LLC, Samara, Russian Federation

e-mail: Maximuk@npcsamara.ru