Научная статья
УДК 621.793
DOI: 10.36652/1813-1336-2026-22-11-508-515

Применение газотермических покрытий для защиты погружного нефтепромыслового оборудования и необходимости их герметизирующей пропитки

Анна Юрьевна Поздеева[1]✉, **Александр Петрович Амосов**[2], *д-р физ.-мат. наук*,
Павел Евгеньевич Юдин[3], *канд. техн. наук*
[1, 2, 3] *Самарский государственный технический университет, Самара, Россия, pozdeeva@npcsamara.ru*✉
[1, 3] *ООО "Научно-производственный центр "Самара", Самара, Россия*

Аннотация. Представлен комплексный обзор современных методов газотермического напыления, включая плазменное, детонационное напыление, электродуговую металлизацию, а также высокоскоростные процессы газопламенного напыления HVOF и HVAF. Проанализированы технологические принципы данных методов, их преимущества и ограничения в применении для погружного оборудования. Особое внимание уделено механизмам формирования покрытий и развитию характерной ламеллярной структуры, состоящей из расплющенных частиц (splats), оксидных прослоек, нерасплавленных частиц и пор. Показано, что пористость является критическим свойством газотермических покрытий и одним из основных факторов, ограничивающих их герметичность, коррозионную стойкость и долговечность. Наличие открытой и взаимосвязанной пористости облегчает проникновение агрессивных сред к металлу основы, что приводит к ускоренному разрушению защитного поверхностного покрытия, его отслоению и преждевременному отказу защищаемого оборудования. Рассмотрено влияние параметров напыления, включая скорость и температуру частиц, дистанцию напыления, температуру подложки, а также состав и давление газовой среды на плотность покрытия, фазовый состав и адгезионную прочность. Обобщены результаты отечественных и зарубежных исследований, подтверждающие, что последующая герметизирующая пропитка ГТП является не просто опциональной, а технологически необходимой операцией для защиты погружного оборудования. Проведено целенаправленное обобщение данных о механизмах проникновения агрессивных компонентов (H_2S, CO_2, хлоридов) через сеть открытых пор ГТП к подложке и показано, что только комбинация износостойкого напыленного слоя и герметизирующей фазы пропитки способна обеспечить долговременную защиту в условиях высокого давления и температуры.

Ключевые слова: газотермическое напыление, коррозионная стойкость, износостойкость, адгезионная прочность, структура, пористость

Для цитирования: Поздеева А.Ю., Амосов А.П., Юдин П.Е. Применение газотермических покрытий для защиты погружного нефтепромыслового оборудования и необходимости их герметизирующей пропитки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2026. Т. 22, № 11. С. 508—515. DOI: 10.36652/1813-1336-2026-22-11-508-515

Original article

Use of thermal spraying coatings to protect submersible oilfield equipment and need for their sealing impregnation

Anna Yu. Pozdeeva[1]✉, **Aleksandr P. Amosov**[2], **Pavel E. Yudin**[3]
[1, 2, 3] *Samara State Technical University, Samara, Russia, pozdeeva@npcsamara.ru*✉
[1, 3] *LLC "NPC "Samara", Samara, Russia*

Abstract. This article presents a comprehensive review of modern thermal spraying methods, including plasma spraying, detonation spraying, wire-arc spraying, and high-velocity thermal spraying processes such as HVOF and HVAF. The technological principles of these methods, their advantages, limitations, and fields of application are analyzed. Special attention is paid to the mechanisms of coating formation and the development of characteristic lamellar microstructures composed of flattened splats, oxide interlayers, unmelted particles and pores. It is demonstrated that porosity is a critical structural feature of thermal spray coatings and one of the main factors limiting their tightness, corrosion resistance, and long-term durability. Open and interconnected porosity facilitates the penetration of aggressive media to the substrate, leading to accelerated degradation of the coating and premature failure of protected components. The influence of spraying parameters, including

particle velocity and temperature, spraying distance, substrate temperature, and the composition and pressure of the spraying gas, on coating density, phase composition, and adhesion strength is discussed. The results of domestic and international studies are summarized, confirming that subsequent sealing impregnation of thermal spray coatings is not merely optional, but a technologically necessary operation for protecting submersible equipment. A targeted review of data on the mechanisms by which aggressive components (H_2S, CO_2, chlorides) penetrate the open pore network of thermal spray coatings to the substrate is conducted, demonstrating that only a combination of a wear-resistant sprayed layer and a sealing impregnation phase can ensure long-term protection under high pressure and temperature conditions.

Keywords: thermal spraying, metallization coating, corrosion resistance, wear resistance, adhesion strength, microstructure, porosity

Введение

Долговечность и безотказность погружного оборудования в нефтегазовой промышленности напрямую зависят от его стойкости к агрессивным средам. Воздействие таких сред вызывает коррозионно-эрозионные повреждения и механический износ, на долю которых приходится соответственно 23 и 22 % от общего числа отказов [1]. В состав погружного оборудования входят насосно-компрессорные трубы, установки электроцентробежных насосов, рабочие колеса и направляющие аппараты насосов, валы насосных агрегатов, газосепараторы, протекторы, элементы гидрозащиты и подвески. Все эти элементы работают в условиях воздействия пластовой продукции, содержащей нефть, воду, растворенные газы, механические примеси и различные химически активные компоненты технологических растворов. Эксплуатация погружного оборудования осуществляется в сложных гидродинамических и химических условиях. Температура в забое может достигать 120...150 °С, давление — десятков МПа. При этом пластовая продукция может содержать значительное количество агрессивных компонентов, в том числе сероводород и углекислый газ. В сероводородсодержащих средах протекают процессы электрохимической коррозии, образования сульфидных пленок, водородного наводороживания [2, 3]. Для углекислотной среды характерно разрушение по язвенному механизму. Кроме того, оборудование подвергается воздействию абразивных частиц, содержащихся в добываемой жидкости. Совокупность перечисленных факторов приводит к интенсивному разрушению поверхностных слоев металла и преждевременному выходу оборудования из строя. В этой связи актуальной задачей является разработка и внедрение эффективных методов защиты поверхности оборудования, позволяющих увеличить межремонтный период и снизить затраты на его эксплуатацию и восстановление.

Для повышения долговечности оборудования применяют различные методы защиты поверхности, включая использование коррозионно-стойких сплавов, ингибиторов коррозии и защитных покрытий. Одно из наиболее перспективных и экономически выгодных направлений — применение газотермических покрытий, позволяющих формировать на поверхности металлических деталей защитные функциональные слои с повышенной коррозионной и износостойкостью, при этом не подвергая значительному нагреву детали оборудования [4].

Цель статьи — анализ эффективности применения газотермических покрытий для защиты погружного нефтепромыслового оборудования, обоснование критического влияния пористости на их защитные свойства в жидких агрессивных средах, а также обобщение результатов исследований, доказывающих необходимость операции пропитки (инфильтрации) как неотъемлемого этапа технологии нанесения газотермических покрытий. В отличие от сложившегося подхода, рассматривающего газотермическое покрытие как самодостаточный защитный барьер, в статье на основе обобщения и анализа литературных данных показано, что в жидких агрессивных средах именно открытая пористость является первичным механизмом отказа, а пропитка представляет собой наиболее эффективный и технологически реализуемый способ его устранения. Установлено, что защитная система "напыленный металлокерамический каркас — герметизирующий наполнитель" должна проектироваться как единое целое.

Виды процессов газотермического напыления и их применение для погружного оборудования

Применение газотермического напыления обусловлено его высокой ресурсо- и энергоэффективностью. В настоящее время данная технология широко используется при изготовлении, восстановлении и ремонте изделий на предприятиях различных отраслей промышленности [5, 6]. Газотермические покрытия (ГТП) создают барьерный слой, затрудняющий или полностью исключающий доступ коррозионной среды к металлу оборудования, за счет чего многократно увеличивается срок эксплуатации оборудования. Стойкость ГТП практически не уступает коррозионной стойкости соответствующих гальванических покрытий, а за счет значительно большей его толщины повышается его коррозионная долговечность. Термин "газотермическое напыление" объединяет процессы получения покрытий, при которых исходный материал в виде порошка, проволоки или прутка подается в высокотемпера-

турную зону, где он диспергирует и распыляется струей транспортирующего газа.

Получаемые покрытия, сформированные из множества расплавленных частиц, обладают характерными особенностями, такими как шероховатость поверхности, пористость, включения нерасплавленных или посторонних частиц, неравномерность распределения фаз и т.д. Поэтому в настоящее время существует множество методов постобработки, основанных на механических, термомеханических, химических и физических процессах [7, 8].

Поскольку слой покрытия формируется из множества частиц, их скорость и время нахождения на дистанции напыления в газовой среде играют важную роль в достижении плотности и однородности покрытия: чем дольше расплавленная частица находится в среде воздуха, тем сильнее она нагревается, обезуглероживается, окисляется и покрывается оксидной пленкой, ухудшающей адгезионные свойства частиц [9]. Температура нанесения оказывает влияние на выбор материалов для напыления. Керамические покрытия в основном изготавливают методом атмосферного плазменного напыления, в то время как термочувствительные материалы, такие как металлокерамика, предпочтительнее напылять методами с более низкой температурой [10]. На рис. 1 приведены характерные диапазоны температур нанесения и скоростей частиц для основных технологий ГТН (ЭДМ — электродуговая металлизация; HVOF — высокоскоростное напыление в кислородной среде; HVAF — высокоскоростное напыление в воздушной среде).

На практике для защиты погружного оборудования применяют сплавы системы Ni—Cr с аустенитной структурой и Cu—Ni (типа Монель), а также металлокерамические покрытия, в состав которых входят твердые карбидные упрочняющие частицы (WC или Cr_3C_2), закрепленные в металлической связке Co—Cr и Ni—Cr [11, 12]. Для расплавления этих материалов требуются значительные температуры, при которых расплавленные частицы активно взаимодействуют с кислородом. Чтобы минимизировать окисление частиц на дистанции напыления, необходима высокая скорость, обеспечивающая сокращение времени контакта с окислительной средой. В связи с этим применение холодного газодинамического (не предполагающего плавления) и классического дозвукового газопламенного напыления (характеризующегося низкой кинетической энергией частиц) не позволяет обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики покрытия для погружного оборудования. Практически наибольшее промышленное распространение для защиты погружного оборудования получили процессы электродуговой металлизации и высокоскоростного газопламенного напыления [11]. Плазменное и детонационное напыление применяют преимущественно для наиболее ответственных и высоконагруженных деталей и узлов. Каждый из этих процессов обладает уникальными технологическими особенностями, определяющимися экономической целесообразностью, качеством покрытия и ресурсом работы узлов оборудования.

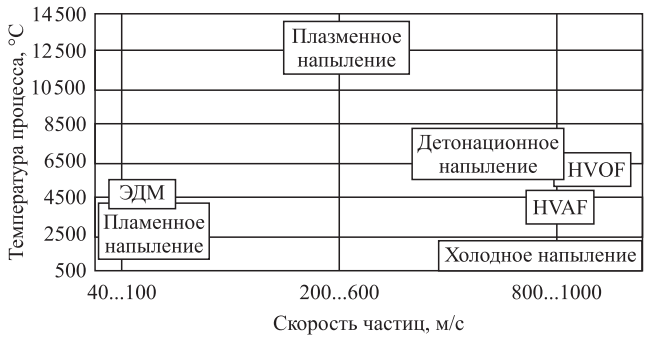


Рис. 1. Характерные диапазоны температур нанесения и скоростей частиц для основных технологий газотермического напыления [10]

Электродуговая металлизация (wire-arc spraying)

Физика процесса электродуговой металлизации (ЭДМ) состоит в образовании электрической дуги между двумя проволоками, их плавлении и распылении расплавленных частиц сжатым воздухом или газом на поверхность изделия. Широкое распространение метода ЭДМ для защиты погружного оборудования обусловлено высокой производительностью, относительной простотой оборудования и экономичностью процесса, достаточным уровнем физико-механических свойств получаемого покрытия, а также мобильностью оборудования [11, 13].

Недостатки ЭДМ, критичные для эксплуатации в жидких средах: возможность перегрева и окисления напыляемого материала; формирование покрытий с большим количеством оксидов и высокой пористостью, что делает покрытия рыхлыми и негерметичными, снижая их коррозионную стойкость; значительные потери напыляемого материала из-за выгорания легирующих элементов (хром, кремний, марганец и др.); средние значения адгезионной прочности 15...20 МПа [14]. Поэтому данный метод ограниченно применим для защиты погружного оборудования, работающего в особо агрессивных средах, и требует последующей обработки и пропитки герметизирующими составами. Для снижения влияния кислорода на расплавленные частицы, применяют инертную среду аргона, что способствует значительному снижению количества оксидных прослоек в слое покрытия [15].

Разновидностью ЭДМ является процесс распыления расплавленных проволок струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси — активированная дуговая металлизация (АДМ). Теплота сгорания топливной смеси обеспечивает разгон частиц

распыляемого металла до высокой дозвуковой скорости, что позволяет получить более высокие значения адгезионной прочности (до 40 МПа) и снизить пористость, но не устраняет ее полностью [16]. Таким образом, применение метода ЭДМ для защиты оборудования, работающего в особо агрессивных средах, напрямую связано с необходимостью последующей герметизации пор.

Высокоскоростное газопламенное напыление (high velocity thermal spraying)

В основе технологии высокоскоростного газопламенного напыления (ВСГПН) лежит способ напыления порошкового материала на высокой (сверхзвуковой) скорости в результате сжигания топливной смеси в камере сгорания [17, 18]. Частицы, обладающие высокой кинетической энергией, формируют покрытие с исключительной плотностью (до 99 %), низкой пористостью и высокой адгезией (от 80 МПа). Твердость покрытий на основе карбидов вольфрама или хрома может превышать 70 HRC [19]. Технология является экологически более безопасной альтернативой гальванике.

Разновидностями ВСГПН являются процессы HVOF (High-Velocity Oxygen Fuel) и HVAF (High-Velocity Air Fuel), отличающиеся применяемым видом топлива и, соответственно, скоростью распыления частиц. Основная функция термически напыляемых твердосплавных покрытий — обеспечить хорошую износостойкость при повышенных и высоких температурах, а также защиту от различных видов износа, включая абразивный, адгезионный износ, эрозию, фреттинг и коррозионный износ [20—22]. ВСГПН обеспечивает надежную работу корпусов погружных электродвигателей, штоков компрессоров, втулок, шибера, шаров и седел задвижек и позволяет увеличить наработку оборудования до отказа [23, 24]. Научные исследования продемонстрировали стойкость ВСГПН покрытий к жидким средам при атмосферном давлении [25, 26].

Недостатки ВСГПН: высокая стоимость оборудования по сравнению с ЭДМ; необходимость "прямой видимости" поверхности вследствие прямолинейного направления потока распыляемых частиц, ограничение по температуре напыляемых материалов, формирование растягивающих напряжений в покрытии, в результате чего существуют ограничения по толщине слоя. Несмотря на то, что пористость покрытий, нанесенных методом ВСГПН, значительно ниже, чем у ЭДМ, она не является нулевой. В особо агрессивных средах, содержащих H_2S и CO_2 под высоким давлением, даже минимальная открытая пористость может стать путем для проникновения коррозионно-активных компонентов к подложке, что ставит вопрос о дополнительной герметизации актуальным и для этого типа покрытий.

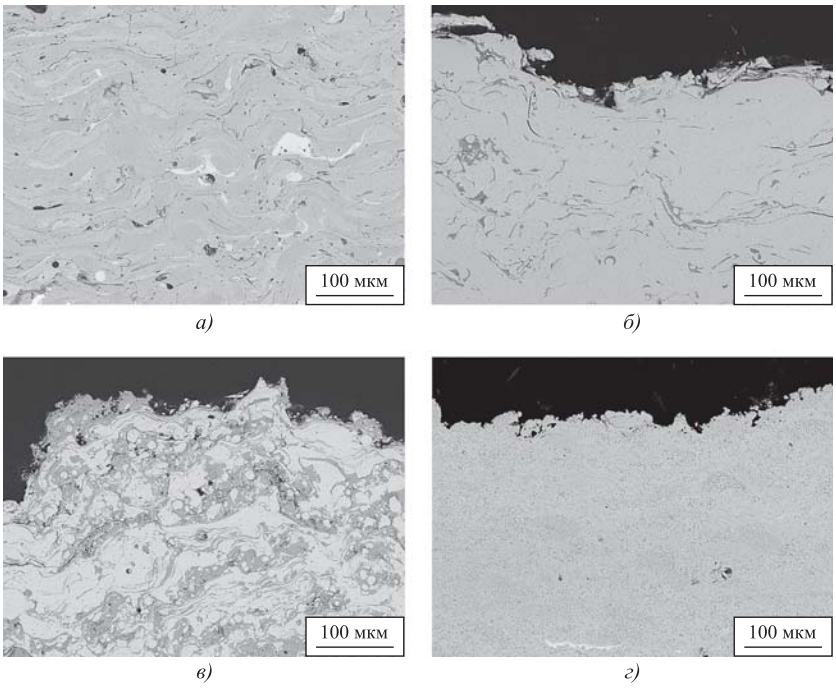
Структура газотермических покрытий как фактор, лимитирующий их защитную способность

Ключевым фактором, определяющим защитные свойства ГТП в жидких средах, является их структура. В связи с этим важно оценить влияние технологических параметров напыления на структуру покрытия.

Оптические, механические, электрические, тепловые и другие характеристики газотермических покрытий заметно отличаются от характеристик, свойственных металлам с литой структурой, благодаря их уникальной структуре и процессу формирования. Как правило, прилегание покрытия к подложке достаточно плотное, покрытие в целом копирует рельеф поверхности детали, несплошности на границе служат показателем ошибок при проведении процесса напыления (избыточная масса напыляемого материала, недостаточная скорость и температура частиц, некачественная подготовка поверхности). В процессе нанесения слоя частицы диспергированного металла размером 5...200 мкм ускоряются до скоростей 50...1000 м/с и сталкиваются с относительно холодной поверхностью подложки. В результате деформированные частицы быстро остывают с формированием кристаллической или аморфной структуры. Частицы (ламели, чешуйки, сплэт — от англ. *splat*) накладываются друг на друга, создавая слоистую структуру покрытия, состоящую из чередующихся очень тонких волнообразных прослоек. Каждая чешуйка отделена от другой окисной пленкой, которая способствует формированию "керамического каркаса" покрытия. Присутствуют отдельные частицы металла более округлой формы, вплоть до глобулярной — нерасплавленные частицы порошка.

Процесс создания покрытия из многочисленных частиц приводит к возникновению пористости напыленного слоя из-за неполного расплавления, разбрызгивания и неплотной упаковки частиц. Имеются поры глобулярной формы, образованные в результате недостаточного заполнения затвердевающего слоя, и дискообразной формы, формирующиеся между слоями вследствие недостаточного послойного смачивания капель [16]. Присутствие пор в структуре напыленного слоя износостойких покрытий снижает их прочность и твердость, что влечет за собой снижение износостойкости. На рис. 2 приведены структуры покрытий, нанесенных на наружную поверхность корпусов погружного электродвигателя: электродуговой металлизацией на воздухе, в среде аргона, в воздушно-пропановой среде (активированная дуговая металлизация) и HVOF.

Значительное влияние на формирование структуры покрытия оказывают состав и давление технологической газовой среды при напылении. В случае использования сжатого воздуха, повышение давления способствует измельчению структуры покры-



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 2. Структура покрытий, нанесенных на наружную поверхность корпусов погружного электродвигателя методами газотермического напыления:
а — ЭДМ на воздухе; *б* — ЭДМ в среде аргона; *в* — ЭДМ в воздушно-пропановой среде (АДМ); *г* — HVOF

тия, при этом увеличивается степень выгорания частиц напыляемого материала [27, 28]. Повышение давления сжатого воздуха приводит к увеличению скорости потока частиц, что способствует снижению пористости покрытия за счет их глубокого проникновения в микронеровности на поверхности и более тесному контакту молекул материалов покрытия и подложки, что усиливает адгезионные и химические связи [29, 30]. Покрытие, сформировавшееся из мелких частиц, более гетерогенно, имеет больше границ раздела (оксидных пленок) и более плотное строение с меньшей пористостью [31]. Образование качественного покрытия определяется параметрами напыления, включая угол и дистанцию расположения горелки. Недостаточное расстояние вызывает перегрев основы, а чрезмерное — снижение энергии частиц, что ухудшает плотность покрытия и прочность его сцепления с подложкой [32].

Перспективно использование инертного газа, в частности аргона [33, 34]. Исследования хромникелевых газотермических покрытий, нанесенных в защитной среде аргона, демонстрируют преобладание металлических фаз никеля и хрома в то время, как в покрытиях того же материала, нанесенных с использованием сжатого воздуха, отмечается преобладание оксидных фаз. Структура покрытий, нанесенных с использованием аргона, более плотная, по коррозионной стойкости такие покрытия находятся на уровне с покрытием, нанесенным плазмой низкого давления [35].

Пористость — основная причина негерметичности газотермических покрытий, что является одним из самых критичных факторов для погружного оборудования. Само понятие "герметичность" по справочным и энциклопедическим данным, сформулировано как "способность оболочки (корпуса) и отдельных ее элементов и соединений препятствовать газовому или жидкостному обмену между средами, разделенными этой оболочкой". При этом отмечается, что герметичность есть условие работоспособности многочисленных систем, аппаратов и приборов, по количественной характеристике которой (газовый или жидкостный обмен через оболочку) определяются надежность и долговечность устройства [36]. Для погружного оборудования, постоянно контактирующего с жидкой агрессивной средой под давлением, герметичность является основным условием работоспособности. Жидкость, проникая по сети сообщающихся пор к границе "покрытие—подложка", вызывает подпленочную коррозию, отслаивание покрытия и ускоренный выход оборудования из строя. Таким образом, физический принцип защиты ГТП — создание барьерного слоя — нарушается самой природой формирования покрытия. Это противоречие делает стадию герметизации пор не просто желательной, а технологически обязательной операцией.

Пути повышения эффективности ГТП: роль постобработки и пропитки

Для устранения главного недостатка ГТП — открытой пористости — применяются методы постобработки, среди которых наиболее технологичным и распространенным для погружного оборудования является пропитка (инфильтрация) [37, 38]. Цель пропитки — заполнить сообщающиеся поры материалом, непроницаемым для агрессивной среды, тем самым восстановив сплошность барьерного слоя.

Опыт эксплуатации показывает, что нанесение ГТП без постобработки не всегда гарантирует надежную защиту. Несмотря на успешный опыт применения газотермических покрытий, ввиду своих структурных особенностей, данный способ защиты не полностью исключает случаи отказа погружного оборудования, связанные с разрушением слоя защитного покрытия из-за наличия в нем пористости и последующим ускоренным разрушением металла оборудования [3, 4]. В таблице обобщены результа-

Эффективность газотермических покрытий в условиях, моделирующих работу погружного оборудования

Материал покрытия / Исходный материал / Метод нанесения покрытий	Условия испытания	Основной результат и ограничения
WC—Ni/Monel K500/ HVOF [39]	Коррозионная стойкость в морской/пластовой воде	Высокая стойкость покрытия HVOF, превосходящая плазменное, но точечная коррозия может развиваться в порах
NiCrSiB/Al_2O_3 NiCrSiB/WC/ SS304/HVOF [40]	Устойчивость к коррозии и эрозии в шламе	Композитное покрытие показало высокую эрозионную стойкость. Для гарантированной коррозионной защиты в статической жидкости требуется пропитка
WC—10Co/Сталь 35CrMo/ HVOF [41]	Коррозионно-эрозионный износ в буровом растворе	Повышение износостойкости на 35 % по сравнению с непокрытой поверхностью
NiCrBSi/WCCoCr/Сталь/ HVOF [42]	Коррозионная стойкость в морской/пластовой воде	Плотность коррозионного тока возрастает с увеличением добавления карбидных включений, которые повышают его пористость
WC—Co/Cr_3C_2—Ni/ AlSi 316L/HVOF [43]	Коррозионная стойкость в морской/пластовой воде	Высокая стойкость покрытия HVOF, превосходящая сталь 316L, но отмечено растрескивание покрытий и последующее глубокое проникновение электролита по истечении времени

ты изменения функциональных свойств различных покрытий при взаимодействии с жидкой коррозионной средой.

Для герметизации ГТП применяют пропитку полимерными, неорганическими или металлическими материалами. Наибольшее распространение для погружного оборудования получила пропитка полимерными составами (эпоксидные, фенольные, кремнийорганические смолы), которая обеспечивает заполнение пор на всю глубину покрытия.

Механизм защиты пропитанного покрытия становится комплексным: каркас из напыленного металла или кермета обеспечивает высокую механическую прочность и износостойкость, а полимерный наполнитель в порах блокирует диффузию агрессивных ионов к подложке, полностью исключая возможность подпленочной коррозии. Такой подход позволяет нивелировать недостатки исходной структуры ГТП и реализовать их защитный потенциал в полной мере, что подтверждается успешным опытом эксплуатации пропитанных покрытий в жидкой агрессивной среде, в том числе в составе погружного оборудования [44, 45].

Заключение

В результате проведенного анализа установлено, что газотермическое напыление является одним из наиболее эффективных и технологически гибких методов защиты и восстановления погружного оборудования, эксплуатируемого в условиях интенсивного коррозионного и механического воздействия. Наиболее массовый и экономически целесообразный метод нанесения покрытий для нефтепромыслового оборудования — ЭДМ и ВСГПН, тогда как плазменное и детонационное напыление преимущественно применяется для небольших, высоконагруженных и наиболее ответственных деталей оборудования, что связано с существенно более высокой стоимостью оборудования, порошковых материалов и технологического процесса, меньшей производительностью, более сложной подготовкой поверхности, точного контроля параметров процесса и квалифицированного технологического сопровождения по сравнению с ЭДМ и ВСГПН методами, которые можно проводить даже в полевых условиях.

В силу особенностей формирования слоистой структуры, все ГТП обладают открытой пористостью, являющейся главным фактором, лимитирующим их долговечность в жидких агрессивных средах. Наличие сети пор создает прямой путь для проникновения коррозионного флюида к подложке, что приводит к подпленочной коррозии и разрушению покрытия. Таким образом, нанесение покрытия — первый этап в создании надежного барьера. Обязательной и ключевой технологической операцией, обеспечивающей герметичность покрытия, является последующая пропитка. Именно комбинация механически прочного напыленного каркаса и герметизирующего материала в порах позволяет реализовать комплексную защиту, сочетающую износостойкость с непроницаемостью для среды. Такой подход значительно повышает ресурс и надежность погружного оборудования, что подтверждается лабораторными исследованиями и промышленным опытом.

Перспективными исследованиями в этой области является оптимизация режимов напыления для формирования структуры с контролируемой пористостью, оптимально подходящей для конкретных

пропиточных составов, а также разработка новых нанокомпозитных материалов для пропитки, способных работать в экстремальных условиях сверхглубоких скважин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Определение** скорости локальной коррозии насосно-компрессорных труб как необходимый элемент коррозионного мониторинга / Е.А. Вторенко, И.В. Валекжанин, О.А. Латыпов, А.М. Хакимов // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 4. С. 40—44. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-4-40-44.

2. **Коррозия** внутрискважинного оборудования в сероводородсодержащих средах / В.Э. Ткачева, А.Н. Маркин, Д.В. Кшнякин [и др.] // Практика противокоррозионной защиты. 2021. Т. 26, № 2. С. 7—26. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2021.100.2-1.

3. **Промысловый опыт** эксплуатации внутрискважинного оборудования в сероводородсодержащих средах / Д.А. Лунин, Д.А. Минченко, А.Б. Носков [и др.] // Сетевое издание "Нефтегазовое дело". 2023. № 3. С. 47—92. DOI: 10.17122/ogbus-2023-3-47-92.

4. **Классификация** причин разрушения металлизационного покрытия погружных электродвигателей при эксплуатации / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин, А.П. Амосов [и др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2019. № 9. С. 25—32. DOI: 10.30987/article_5d2df0884cc457.62830322.

5. **Валиев М.Р., Шакиров Ю.И.** Способы нанесения покрытий газотермическим напылением и их особенности // Символ науки, 2017. № 5. С. 22—23.

6. **Константинов В.М., Губанов А.С.** Электродуговое напыление диффузионно-легированными сплавами в ремонтном производстве // Вестник полоцкого государственного университета. 2003. Т. 2, № 2. С. 18—21.

7. **Tailored** surfaces by means of thermal spraying and post-treatment / B. Wielage, T. Grund, H. Pokhmurska [et al.] // Key Engineering Materials. 2008. Vol. 384. P. 99—116. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.384.99.

8. **Carbide-based** thermal spray coatings: A review on performance characteristics and post-treatment / A. Govande, A. Chandak, B. Sunil, R. Dumpala // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2022. Vol. 103. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105772.

9. **Erne M., Kolar D.** Thermal spraying of oxide ceramic and ceramic metallic coatings// Ceramic Coatings — Applications in Engineering 2014. P. 167—194. DOI: 10.5772/29739.

10. **Optimization** and characterization of high velocity oxy-fuel sprayed coatings: techniques, materials, and applications / M. Oksa, E. Turunen, T. Suhonen [et al.] // Coatings. 2011. No. 1. P. 17—52. DOI: 10.3390/coatings1010017.

11. **Применение** металлизационных покрытий для защиты погружных электродвигателей насосного оборудования от воздействия осложняющих факторов в нефтяных скважинах / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин, С.С. Петров, А.В. Максимук // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2020. № 1. С. 75—86.

12. **Сопротивление** эрозионно-коррозионному кавитационному воздействию WC—Co—Cr и WC—NiCr покрытий, полученных методом HVAF / Ю.С. Коробов, Х.Л. Алван, М. Барбоза [и др.] // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2019. № 1. С. 20—27.

13. **Кременский И.Г.** Современные технологии восстановления поверхностного слоя деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 10. С. 3—5.

14. **Коробов Ю.С., Бороненков В.Н.** Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности: монография. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. 264 с.

15. **Влияние** газовой среды напыления на свойства газотермических металлизационных покрытий / Д.И. Андриянов, П.Е. Юдин, Ж.В. Князева [и др.] // Нефтегазовое дело. 2024. № 22. Т. 4. С. 115—125. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-4-115-125.

16. **Структура** и свойства стальных покрытий, нанесенных методом активированной дуговой металлизации / Ю.С. Коробов, А.М. Полякова, И.Л. Яковлева [и др.] // Сварочное производство. 1997. № 1. С. 4—6.

17. **Keshavamurthy R., Naveena B.E. Dayananda, Sekhar N.** Thermal spray coatings for erosion-corrosion protection // United States of America by IGI Global Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global), Production, Properties, and Applications of High Temperature Coatings, 2018. P. 246—267.

18. **Thermal spray** coatings on high-temperature oxidation and corrosion applications — A comprehensive review / V. Lakkannavar, K.B. Yogesha, C.D. Prasad [et al.] // Results in Surfaces and Interfaces, 2024. Vol. 16. No. 100250. 12 p. DOI: 10.1016/j.rsurfi.2024.100250.

19. **Рахадилов Б.К., Муктанова Н., Журерова Л.Г.** Применение технологии HVOF для получения износостойких покрытий на основе WC. Обзор // Вестник НЯЦ РК, 2023. № 1. С. 4—14. DOI: 10.52676/1729-7885-2023-1-4-14.

20. **Wood R.J.K., Thakare M.R.** Abrasion-corrosion of thermal spray coatings// Materials Science and Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. 2017. P. 28. DOI: 10.4018/978-1-5225-1798-6.ch050.

21. **Effect** of addition of Al_2O_3 on the high-temperature solid particle erosion behaviour of HVOF sprayed Inconel-718 coatings / H. Vasudev, L. Thakur, H. Singh, A. Bansal // Materials Today Communications, 2022. Vol. 30, no. 103017. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.103017.

22. **Vuoristo P.** High velocity sprays boost hardmetal industrial coatings // Metal Powder Report. 2007. P. 22—29. DOI: 10.1016/S0026-0657(07)70063-2.

23. **Современная практика** применения противокоррозионной защиты оборудования нефтедобывающих скважин / А.А. Даминов, В.В. Рагулин, А.И. Волошин, А.Г. Телин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. № 6. С. 30—44. DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-6-30-44.

24. **Тарасов В.П.** Применение технологии высокоскоростного газопламенного напыления для восстановления корродированных корпусов ПЭД // Инженерная практика. 2014. № 2. С. 84—85.

25. **Corrosion** behavior of HVOF sprayed 304 stainless steel coating on 6061 substrates in 3.5 wt% NaCl solution / J. Liang, T. Zhang, W. Li [et al.] // Materials Today Com-

munications. 2024. Vol. 39, 108974. P. 1—7. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.108974.

26. **Kumari J.N., Jegadeeswaran N.** Development of CNT mixed HVOF coating for water tube boiler material to improve the degradations // Materials Today: Proceedings, 2022. Vol. 54, part 2. P. 444—447. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.177.

27. **Исследование** диспергирования разнородных проволочных материалов в процессе электродугового напыления / Ю.С. Борисов, Н.В. Вигилянская, И.А. Демьянов [и др.] // Автоматическая сварка. 2013. № 2. Т. 718. С. 25—31.

28. **Соловьев Р.Ю., Литовченко Н.Н.** Металлокарботермические методы снижения окисления диспергированного металла при электродуговой металлизации // Сварочное производство. 2012. № 3. С. 43—47.

29. **Исследование** влияния режимов электродугового напыления на структуру и свойства псевдосплавных покрытий / Ю.С. Борисов, Н.В. Вигилянская, И.А. Демьянов [и др.] // Автоматическая сварка. 2013. № 12. Т. 727. С. 11—17.

30. **Анализ** факторов, влияющих на адгезионную прочность электрометаллизационных покрытий / А.В. Коломейченко, И.Н. Кравченко, В.Н. Логачев [и др.] // Вестник ФГОУ ВПО "МГАУ имени В.П. Горячкина". 2019. № 4 (92). С. 35—41. DOI: 10.34677/1728-7936-2019-4-35-41.

31. **Влияние** режимов электродуговой металлизации и составов, применяемых порошковых проволок на структуру и абразивную износостойкость покрытий / В.И. Похмурский, М.М. Студент, И.А. Рябцев [и др.] // Автоматическая сварка. 2006. № 7. С. 31—36.

32. **Эффективные технологические методы** нанесения покрытий газопламенным напылением / И.Н. Кравченко, В.М. Корнеев, А.А. Коломейченко, И.Е. Пупавцев [и др.] // Агроинженерия. 2015. № 1 (65). С. 36—41.

33. **Брусило Ю.В., Тамаргазин А.А.** Оптимизация технологии восстановления деталей двигателя электродуговым напылением // Вестник двигателестроения. 2015. № 2. С. 138—142.

34. **Снижение** воздействия кислорода на жидкий металл электродов при электродуговом напылении пульсирующей распыляющей струей воздуха / В.А. Роянов, И.В. Захарова, Н.С. Крючков, Е.В. Пугачев // World Science. 2019. Т. 1, № 5 (45). С. 13—21. DOI: 10.31435/rsglobal_ws/31052019/6508.

35. **Takemoto M., Ueno G.** Characteristics and corrosion performance of 80Ni—20Cr coating deposited by on-site thermal spraying // Journal of Thermal Spray Technology. 1993. Vol. 2. P. 59—68. DOI: 10.1007/BF02647424.

36. **Пшеничный В.В., Иванов Ю.Ф.** Герметичность высоконагруженных алюминиевых литых деталей. Москва: Мир, 2002. 200 с.

37. **Поздеева А.Ю., Амосов А.П., Юдин П.Е.** Материалы для пропитки пористых металлизационных газотермических антикоррозионных покрытий погружного нефтепромыслового оборудования. Часть 1 // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22, № 2. С. 156—164. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-2-156-164.

38. **Поздеева А.Ю., Амосов А.П., Юдин П.Е.** Материалы для пропитки пористых металлизационных газотермических антикоррозионных покрытий погружного нефтепромыслового оборудования. Часть 2 // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22, № 3. С. 113—122. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-3-113-122.

39. **Corrosion** and mechanical performance of HVOF WC-based coatings with alloyed nickel binder for use in marine hydraulic applications / M.A. Javed, A.S.M. Ang, C.M. Bhadra [et al.] // Surface and Coatings Technology, 2021. Vol. 418, no. 127239. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127239.

40. **Praveen A.S., Arjunan A.** High-temperature oxidation and erosion of HVOF sprayed NiCrSiB/Al_2O_3 and NiCrSiB/WC—Co coatings // Applied Surface Science Advances, 2022. Vol. 7, no. 100191. DOI: 10.1016/j.apsadv.2021.100191.

41. **Experimental investigation** of erosion corrosion performance and slurry erosion mechanism of HVOF sprayed WC-10Co coatings using design of experiment approach / D.C. Ribu, R. Rajesh, D. Thirumalaikumarasamy [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 18. P. 293—314. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.01.134.

42. **An investigation** on microstructural and electrochemical characteristics of NiCrBSi/WCCoCr composite coatings in 3.5 wt.% NaCl solution / F. Tabatabaei, B. Ghasemi, O. Mirzaee [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. 2023. Vol. 33, no. 9. P. 4408—4421. DOI: 10.1007/s11665-023-08263-z.

43. **Corrosion** behavior of high velocity oxy-fuel sprayed composite Ni-Fe-based self-fluxing alloy cermet coatings / H. Sarjas, A. Surzhenkov, J. Baroninš [et al.] // Journal of Mineral, Metal and Material Engineering. 2018. Vol. 4. P. 1—9.

44. **Revealing** the role of sealing treatment on the electrochemical corrosion properties of HVOF-sprayed WC—20Cr_3C_2—7Ni/MWCNTs coating / J. Qin, Z. Wei, Z. Wei [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 25. P. 2486—2497. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.05.267.

45. **Effect** of sealing treatments on erosion—corrosion of a Fe-based amorphous metallic coating in 3.5 wt.% NaCl solution with 2 wt.% sand / M. Liu, Z. Wang, H. Hu [et al.] // Metals. 2022. Vol. 12, no. 4: 680. P. 1—17. DOI: 10.3390/met12040680.

Статья поступила в редакцию 19.08.2026;
одобрена после рецензирования 08.09.2026;
принята к публикации 08.09.2026.