

Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22, № 2. С. 156-164. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2024. Vol. 22. No. 2. P. 156-164. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 621.793+621.762.86

DOI: 10.17122/ngdelo-2024-2-156-164

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОПИТКИ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОГРУЖНОГО НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ. Часть 1

Анна Юрьевна Поздеева^{1,2}, Александр Петрович Амосов¹,

Павел Евгеньевич Юдин^{1,2}

¹Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

²ООО «Научно-производственный центр «Самара», Самара, Россия

Автор, ответственный за переписку

Анна Юрьевна Поздеева, pozdeeva@npcsamara.ru

Аннотация. Погружное нефтепромысловое оборудование в процессе эксплуатации испытывает агрессивное коррозионное влияние нефтяного флюида, абразивное воздействие механических примесей, а также работает в условиях повышенной температуры в забое. Наиболее эффективным способом защиты наружной поверхности нефтепромыслового оборудования является использование металлизационных газотермических покрытий, в связи с чем применение технологии газотермического напыления становится все более востребованным. Однако создание покрытия из многочисленных частиц расплавленного материала в результате их частичного расплавления, разбрызгивания и неплотной упаковки приводит к образованию пор, которые являются одним из главных недостатков газотермических покрытий. Для устранения этого недостатка можно применять пропитку пористых покрытий различными составами, в таком случае покрытие становится композиционным. В зависимости от воздействующей среды, температурных условий и режима эксплуатации применяются пропиточные составы металлические, органические и неорганические, но в нефтяной среде их применение мало изучено, поэтому разработка композиционных пропиточных покрытий является актуальной для защиты погружного нефтепромыслового оборудования. В статье освещено влияние на пористость газотермического покрытия технологических режимов его нанесения и качества подготовки поверхности подложки. Изложены основные способы герметизации пористости газотермических покрытий пропитыванием. Описан механизм пропитывания (инфильтрации) пористых покрытий, применяемые методы нанесения и их классификация, подчеркнута определяющая роль смачивания покрытия пропитывающим материалом. Отмечен эффект шероховатой поверхности газотермического покрытия, заключающийся в усилении смачивающих свойств пропитывающего состава, а также влияние шероховатости на процесс формирования адгезионных связей между покрытием и пропитывающим составом.

В обзоре представлены традиционные пропиточные материалы, применяемые в промышленности и режимы их нанесения. Изложено применение металлических и неполимерных неорганических пропитывающих составов, представленных главным образом солями неорганических кислот (нитратами, фосфатами, силикатами). Приведены конкретные результаты исследований и испытаний, в том числе, на коррозионную и абразивную стойкость газотермических покрытий после применения пропиточных составов.

Ключевые слова

металлизационное покрытие; газотермическое напыление; коррозия; инфильтрация покрытий; смачиваемость; шероховатость; неорганические пропитки

For citation

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. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-2-156-164>.

Original article

REVIEW: MATERIALS FOR IMPREGNATION OF POROUS METALLIZATION THERMAL SPRAYED ANTICORROSIVE COATINGS OF SUBMERSIBLE OILFIELD EQUIPMENT. Part 1

Anna Yu. Pozdeeva^{1,2}, Aleksandr P. Amosov¹, Pavel E. Yudin^{1,2}

¹Samara state technical university, Samara, Russia

²«NPC «Samara» LLC, Samara, Russia

Corresponding author

Anna Yu. Pozdeeva, pozdeeva@npcsamara.ru

Abstract. Submersible oilfield equipment undergoes aggressive corrosive effects of petroleum fluid, abrasive effects of mechanical impurities during operation, and also operates at elevated temperatures in the bottom. The most effective way to protect the outer surface of oilfield equipment is the use of metallization thermal sprayed coatings, and therefore the application of thermal spraying technology is becoming more and more in demand. However, the formation of a coating structure from many particles of molten material, due to their spraying, incomplete melting and loose packaging, leads to the formation of porosity, and porosity is one of the main disadvantages of thermal sprayed coatings. To eliminate this disadvantage, it is possible to use impregnation of porous coatings with various compositions, in which case the coating becomes composite. Depending on the operating environment, temperature conditions and operating conditions, metal, organic and inorganic impregnating compositions are used, but their use in the oil environment has been little studied, therefore the development of composite impregnated coatings is relevant for the protection of submersible oilfield equipment. The article highlights the influence of technological modes of its application on the porosity of thermal sprayed coating and the quality of substrate surface preparation. The main methods of sealing the porosity of thermal sprayed coatings by impregnation are described. The mechanism of impregnation (infiltration) of porous coatings, used methods of application and their classification are described, the determining role of wetting the coating with an impregnating material is emphasized. The effect of the rough surface of a thermal sprayed coating is shown, which consists in enhancing the wetting properties of the impregnating composition, the influence of roughness on the formation of adhesive bonds between the coating and the impregnating composition.

The review presents traditional impregnating materials used in industry and their application modes. The application of metal and non-polymer inorganic impregnating compounds, represented mainly by salts of inorganic acids (nitrates, phosphates, silicates), is described. Specific test results are presented, including for the corrosion and abrasive resistance of thermal sprayed coatings after the application of impregnating compounds.

For citation

Pozdeeva A.Yu., Amosov A.P., Yudin P.E. Materialy dlya propitki poristyh metallizatsionnyh gazotermicheskikh antikorrozionnyh pokrytijpogruzhnogo neftepromyslovogo oborudovaniya. Chast' 1// [Review: materials for impregnation of porous metallization thermal sprayed anticorrosive coatings of submersible oilfield equipment. Part 1] // *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2024, Vol. 22, No. 2. pp. 156-164. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-2-156-164>.

Keywords

metallization coating; thermal spraying; corrosion; porosity; infiltration of coatings; wettability; roughness; inorganic impregnations

Введение

В настоящее время значительный интерес вызывает проблема обеспечения долговечности металлических конструкций. Весьма актуальной является разработка защитных, коррозионностойких материалов. Существует множество способов противодействия влиянию агрессивных сред, но основным из них является нанесение защитных покрытий. Принимая во внимание высокие температуры в нефтяных скважинах и необходимость поддержания процесса теплоотвода, а также обеспечения прочности и износостойкости компонентов погружного оборудования среди многообразия возможных покрытий требуется применение металлизационных газотермических покрытий. Металлизационные газотермические покрытия из порошков металлов предназначены для защиты стальных конструкций от коррозии под воздействием атмосферных условий, морской и пресной воды, минеральных масел, а также нефтепродуктов, повышения электропроводности и износоустойчивости. По данным зарубежных аналитиков [1], применение технологии газотермического напыления становится все более востребованным, так, например, общий рынок напыления оценивался в начале XXI века в 2 млрд евро, в 2018 году он вырос до 6,6 млрд евро, а прогноз на 2026 год составляет 12 млрд евро.

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. В процессе нанесения слоя, частицы диспергированного металла размером от 5 до 200 микрометров, находясь в жидком состоянии, ускоряются до скоростей от 50 до 1000 м/сек и сталкиваются с относительно холодной поверхностью подложки. Это приводит к их деформации и иногда к частичному разбрызгиванию. В результате, расплюснутые частицы быстро остывают с формированием кристаллической или аморфной структуры. Деформированные частицы (ламели) накладываются друг на друга, создавая слоистую структуру покрытия. Каждая чешуйка отделена от другой окисной пленкой, которая способствует формированию «керамического каркаса» покрытия. Именно благодаря этим процессам формирования и уникальному строе-

нию газотермических покрытий они обладают своими неповторимыми характеристиками. Процесс создания покрытия из многочисленных частиц расплавленного материала приводит к возникновению пористости напыленного слоя из-за неполного расплавления, разбрызгивания и неплотной упаковки частиц. Присутствие пор в структуре напыленного слоя износостойких покрытий снижает их прочность и твердость, что влечет за собой снижение износостойкости. Известно, что на пористость влияет режим нанесения газотермического покрытия. В работе [2] производилось электродуговое напыление с применением порошковой проволоки Ø2,0 мм, содержащей добавки корунда Al_2O_3 (состоящей из стальной оболочки, заполненной смесью порошков феррохрома и оксида алюминия с содержанием углерода 0,47–0,51 % масс.; хрома 2–4 % масс.; оксида алюминия 10–15 % масс.; железо — основа). Минимальная открытая пористость (1,64 %) формируется при условиях: ток $I = 280–300$ А, напряжение $U = 35$ В и дистанция напыления $L = 130$ мм. При понижении напряжения дуги до $U = 30$ В наблюдается повышение открытой пористости до 3,02 %, увеличение напряжения до $U = 40$ В также приводит к возрастанию пористости до 1,97 %.

К уменьшению пористости приводит увеличение скорости движения частиц до 143 ± 36 м/с и подогрев подложки до 100–200 °С [3]. В случае напыления на холодную подложку на границе перехода «покрытие-подложка» присутствуют поры, количество и размер которых значительно сокращаются при повышении температуры подложки свыше 100 °С. При повышении температуры подложки выше 250 °С, поры в переходной зоне практически исчезают. Это связывают с особенностями формирования границы расплеска и разрывом поверхностной пленки жидкости растекающейся капли.

Основные способы снижения пористости газотермических покрытий пропитыванием

С целью уменьшения пористости газотермические покрытия подвергают пропитыванию (инфильтрации) или пропайке [4]. В качестве пропитывающего состава применяют полимеры, неорганические растворы и иногда расплавленные металлы. Также для закрытия пор металлизационного слоя и защиты от

агрессивной коррозионной среды на него наносят слой другого антикоррозионного покрытия — создают композиционные слоистые металлизационные покрытия [5]. В качестве антикоррозионных применяют минеральные и лакокрасочные покрытия, полимерные покрытия на основе смол.

Пропитывание металлизационного слоя производится по возможности сразу после металлизации без какой-либо подготовки поверхности. В случае загрязнения металлизационного покрытия нанесению пропиточного состава должно предшествовать удаление загрязнений протиркой ветошью, смоченной бензином или уайт-спиритом. При этом обильное смачивание поверхности растворителем не рекомендуется. В качестве пропиточных рекомендуются составы с низкой вязкостью и хорошей смачиваемостью.

Методы пропитывания могут быть классифицированы в соответствии с давлением, при котором осуществляется процесс нанесения — атмосферное, низкое или избыточное. Способ пропитывания с использованием низкого и избыточного давления больше подходит для малогабаритных деталей. Пропитывание при атмосферном давлении является единственным методом, подходящим для крупногабаритных изделий, так как в этом случае модифицирующий состав можно наносить кистью, окутанием или распылением. Эффективность пропитывания при низком давлении основывается на удалении влаги и воздуха из пор и трещин, что приводит к уменьшению противодействующих сил, обусловленных капиллярным давлением. Этот метод увеличивает глубину проникновения. При этом уровень давления в камере должен быть отрегулирован относительно давления паров пропитывающего материала, чтобы избежать его чрезмерного испарения. Пропитывание при избыточном давлении используется в основном в тех случаях, когда пропитывающий состав не смачивает поверхность покрытия. Этот способ является самым медленным и наиболее сложным. Пропитывание может сопровождаться последующей термической обработкой, способствующей увеличению адгезии и гомогенизации микроструктуры покрытия.

Пропитывающие составы по происхождению можно разделить на органические и неорганические, которые в свою очередь делятся на подгруппы. Неорганические пропи-

тывающие составы, как правило, предназначены для применения на деталях, работающих в условиях высоких температур. Для применения таких пропитывающих составов необходимо проводить термическую обработку. В качестве пропитывающих составов используют фосфаты алюминия и натрия, этилсиликаты, различные золь-гель растворы и хромовую кислоту. Неорганические пропитывающие составы обычно используют для предотвращения коррозии в расплавленных солях, металлах и агрессивных газообразных веществах. Помимо физического блокирования проникновения газов и развития газовой коррозии, коррозионностойкий пропитывающий состав может вступать в реакцию с химически активными веществами для создания активного барьера. Органические пропитывающие составы — это одно- или двухкомпонентные смолы, обладающие требуемой вязкостью и поверхностным натяжением. Их, как правило, изготавливают с применением растворителей или поверхностно-активных веществ. Однокомпонентные составы отверждаются при нагреве, воздействием ультрафиолетового излучения, электронного или лазерного луча. Двухкомпонентные смолы полимеризуются в присутствии отвердителей-катализаторов. Наибольшее распространение получили органические пропитки на основе эпоксидной смолы, кремнийорганических материалов, полиуретана, перхлорвинилового смолы, фенолоформальдегидных олигомеров, фторосодержащих полимеров.

Заполнение несплошностей металлом или сплавом (инфильтрация) позволяет получить резкое повышение механических характеристик покрытий [6]. При этом значительно увеличивается общая площадь поверхности частиц, занятая связями; открытая пористость уменьшается до минимальных значений. Металлы и сплавы, в том числе припой, выбранные для инфильтрации таких покрытий, требуют высоких показателей прочности и пластичности, должны хорошо смачивать поверхность покрытия, при этом не вступая в активное химическое взаимодействие с ним [4]. Хотя главной целью пропитывания является закрытие пористости на максимально возможную глубину, но тем не менее, иногда оптимальным является получение сравнительно тонкого пропитанного слоя. Например, теплозащитные покрытия обладают относительной пористостью, необходимой для те-

плоизоляции и сопротивления термоударам. В то же время, эти характеристики делают покрытия проницаемыми для агрессивных газов и жидкостей. Также в случае, если происходит теплоотвод детали через корпус, то наносимый пропитываемый слой не должен значительно снижать теплопроводность покрытия. Таким образом, стремятся закрыть только поверхностный слой открытой пористости. Другой пример необходимости небольшой глубины проникновения — это алюминиевые покрытия, нанесенные электродуговым методом для защиты от коррозии в морской воде, когда пропитанный слой должен быть толщиной не более 25 мкм для поддержания способности катодной защиты покрытия.

Механизм пропитывания (инфильтрации) покрытий

Процесс пропитывания (инфильтрации) продолжителен. Время пропитывания зависит от температуры, вязкости пропитывающего компонента и краевого угла смачивания. Константа скорости пропитывания в большей степени зависит от краевого угла смачивания, чем от величины вязкости компонента [3].

Смачивание определяется как взаимодействие между молекулами на границе соприкосновения трех разных фаз: твердой, жидкой и газообразной, характеризующееся растеканием жидкости по поверхности твердого тела. Контактное смачивание количественно оценивается через краевой угол θ , выраженный в градусах, который образуется в точке соприкосновения трех фаз, где одна сторона угла располагается на поверхности «твердое тело — жидкость», а другая представляет касательную к поверхности смачивающей жидкости. В зависимости от величины угла θ , определяют три основных типа смачивания [7]:

— полное смачивание (растекание), при котором равновесный краевой угол стремится к нулю $\theta \rightarrow 0$. В этом случае требуется, чтобы работа адгезии превышала работу когезии жидкости $W_a > W_k$;

— ограниченное смачивание с острыми краевыми углами $0 < \theta < 90^\circ$, когда $W_a > 0,5 W_k$;

— несмачивание с тупыми краевыми углами $90^\circ < \theta < 180^\circ$, когда $W_a < 0,5 W_k$.

На угол θ оказывает влияние шероховатость поверхности. Реальные поверхности помимо шероховатости имеют локальные неоднородности, микротрещины и другие де-

фекты, которые оказывают существенное влияние на смачивание и растекание. Поэтому краевые углы в реальных условиях могут отличаться от идеальных равновесных. Первые попытки предсказать влияние шероховатости на кажущийся угол контакта ϕ были сделаны Венцелем, который ввел коэффициент шероховатости, определяющийся как отношение фактической площади твердого тела к геометрической площади плоскости, имеющей одинаковые макроскопические размеры. Фактическая поверхность и геометрическая поверхность идентичны, но на поверхности любого реального твердого тела фактическая поверхность будет больше геометрической поверхности из-за шероховатости поверхности.

Эффект шероховатой поверхности заключается в усилении смачивающих свойств твердого вещества. Твердое вещество с положительной тенденцией к смачиванию ($\theta < 90^\circ$) будет смачиваться тем легче, чем шероховатее его поверхность. Если гладкая поверхность обладает водоотталкивающими свойствами ($\theta > 90^\circ$), то шероховатая поверхность будет отталкивать воду сильнее [8].

При формировании полимерно-металлических покрытий для получения хорошей адгезии между пропитывающим составом и газотермическим покрытием необходимо обеспечить эффективное смачивание поверхности напыленного слоя пропитывающим составом. Минимальные значения угла смачивания θ (стремящиеся к нулю) увеличивают область контакта между покрытием и пропитывающим материалом. Стоит учитывать, что на поверхности покрытия, как правило, высока концентрация дефектов (впадин, пор). В связи с этим, важно контролировать распространение пропитывающего состава, чтобы предотвратить его быстрое растекание, при котором возможно «запирание» воздушных пузырьков в дефектах поверхности, что ведет к риску появления несовершенств на межфазной поверхности уже в начальной стадии формирования адгезионного соединения. Поверхностно-активные вещества (ПАВ) и их комбинации служат эффективными средствами для регулирования процесса смачивания и часто добавляются в составы полимерных пропитывающих материалов для улучшения их смачивающих свойств.

При определении свойств поверхности твердых тел важно проводить измерение краевых углов. Обычно для этого используют значения краевого угла натекания воды $\theta_a(w)$.

При значении $\theta_a(w)$ выше 90° поверхность классифицируют как гидрофобную, а при значении ниже 90° — как гидрофильную.

В работе [9] приведены экспериментальные результаты по определению краевого угла смачивания нефтяного флюида на поверхностях трубных сталей и защитных антикоррозионных покрытий.

Применение неполимерных неорганических пропитывающих составов

Из известных химических способов уплотнения в комбинации с термической обработкой заслуживает внимания пропитывание покрытия из Al_2O_3 раствором $Al(NO_3)_3$ с последующим отжигом при температуре $825^\circ C$. Для уменьшения пористости с 5–15 % до 2–3 % обработку повторяют до 25 раз [3]. Перспективным методом улучшения физико-механических характеристик напыленного оксидного слоя является пропитывание его фосфатными вяжущими с последующей термообработкой [3]. В качестве вяжущего применяют фосфорные кислоты, алюмофосфатные или слюдофосфатные связующие и т.п. Необходимым условием выбора вида вяжущего является его способность проникать в слоисто-ячеистую структуру покрытия за счет смачивания. Термообработка заключается в нагреве деталей по определенному режиму до температур, не превышающих $600^\circ C$. Взаимодействие вяжущего с оксидом покрытия приводит к образованию кислых фосфатов, которые при нагревании постепенно переходят в средние малорастворимые безводные фосфаты и их гидраты, что завершает процесс упрочнения. Образующиеся металлофосфаты заполняют поры и прочно скрепляют частицы покрытия между собой. Покрытия из оксида алюминия после пропитывания алюмофосфатным вяжущим и термообработки показали повышение износостойкости в 4,8 раза и понижение газопроницаемости в 700 раз.

В [10] показано, что применение фосфатов алюминия для герметизации структур покрытий из Al_2O_3 и Cr_2O_3 сохраняет стойкость герметичных покрытий к абразивному износу после испытаний на погружение в течение 30 дней в жидкости с pH от 0 до 10, за исключением покрытия из Al_2O_3 , которое подверглось коррозии в растворах с pH = 0 и pH = 14. При использовании фосфатов алюминия в очень кислых растворах коррозии обнаружено

не было. Фосфат алюминия является хорошим кандидатом для герметизации оксидных покрытий, подверженных воздействию агрессивных сред, за исключением сред с высоким содержанием щелочей и приблизительно равным pH = 14. В дизельных двигателях сера, содержащаяся в топливе, повышает вероятность коррозионного воздействия. В работе [11] приведены экспериментальные данные о снижении пористости на 90 % газотермического покрытия, состоящего из никелевой основы с содержанием Cr–20 %, после пропитывания фосфатом алюминия и тем самым повышения ее износостойкости в 12 раз.

В [12] авторами описывается пропитка покрытия толщиной 0,05–1,2 мм, нанесенного высокоскоростным газопламенным методом из порошка, содержащего железо, хром, никель, молибден, кремний и углерод. В качестве пропитки применяется раствор фторсодержащих поверхностно-активных веществ в специально подобранных растворителях, что способствует формированию на поверхности и в порах покрытия тонкой пленки (примерно 30–50 Å), которая обеспечивает высокую гидрофобность и обладает рядом других важных преимуществ, включая защиту контактирующих поверхностей от окисления и истирания.

В работе [13] приведены исследования по влиянию метода ультразвуковой очистки напыленного плазменного покрытия Al_2O_3 — 13 % TiO_2 (AT13) перед пропитыванием органической смолой при различных температурах. Покрытие, пропитанное при температуре $40^\circ C$, имеет наименьшую потерю веса при коррозии в среде соляного тумана, самую низкую плотность тока коррозии и самый высокий коррозионный потенциал.

В работе [14] авторами проведены сравнительные исследования влияния пропитывания ортосиликатом натрия (Na_2SiO_4), фосфатом алюминия ($AlPO_4$) и солями церия на коррозионную стойкость газопламенного покрытия. Исследования проводили на металлизационном покрытии состава Fe — 54,2 %, Cr — 18,3 %, Mo — 13,7 %, Mn — 2,0 %, W — 6,0 %, В — 3,3 %, С — 1,1 %, Si — 1,4 %, нанесенном методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF). Перед нанесением пропитывающего состава покрытие очищалось ультразвуковым методом. Контроль проникающей способности пропитывающего состава осуществлялся металлографическим методом. Пропитывающий состав $AlPO_4$

достиг пор покрытий и проник в напыленное покрытие на глубину не менее 50 мкм. Пропитывающий состав Na_3SiO_4 и соли церия присутствовали только на поверхности покрытий. Пропитывающий состав с цериевой солью образовал на поверхности очень неоднородное покрытие со слоем микротрещин и морфологией «сухой грязи». Все пропитывающие составы повышают стойкость к общей коррозии, и на порядок снижают плотность пассивного тока в сравнении с исходным покрытием без пропитывания. Пропитывание фосфатом алюминия демонстрировало наибольшую стойкость к общей коррозии и хорошую устойчивость к питтинговой коррозии, что связано с образованием более толстого слоя и создание таким образом коррозионного барьера, который ограничивает локальное коррозионное воздействие на подложку. Во время длительных выдержек пропитывающий состав AlPO_4 показал более стабильные свойства пассивирующей пленки за счет меньшей концентрации дефектов. Стоит отметить, что микротвердость покрытия за счет пропитывания AlPO_4 увеличилась с 800 до 1000 НВ. Это повышение показало, что износостойкость покрытий может быть улучшена и их можно применять в агрессивных и/или абразивных средах.

Пропитывание солью церия обладало лучшей стойкостью к питтинговой коррозии, но меньшей коррозионной стойкостью в локальных областях микротрещин. Ее применение возможно только для кратковременной защиты металлизационного покрытия от коррозии, особенно в растворе хлорид-ионов. Пропитывающий состав на основе Na_3SiO_4 показал лучшую стойкость к общей коррозии, но меньшую стойкость к питтинговой коррозии.

Для уплотнения покрытий применяют жидкое стекло, жидкий парафин, парафиновые масла и другие вещества. Для увеличения износостойкости узлов трения напыленный слой пропитывают маслом при 80–100 °С с выдержкой деталей, в зависимости от условий работы, в течение 5–10 часов [15].

Для повышения жаростойкости и коррозионной стойкости покрытий достаточно эффективно пропитывание кремнийорганическими цементами (работоспособность до 600–700 °С [3]).

Для создания композиционных металлизационно-неполимерных покрытий применяют минеральные покрытия. Первыми для целей

защиты от коррозии внутренней поверхности труб и увеличения ее гладкости в России начали применяться минеральные покрытия на основе силикатной эмали (СЭП). На данный момент распространенными в России являются органосиликатная эмаль МК-5, производитель ООО «Завод эмалированных труб» и Гиотэк-24, производитель АО «ГИОТЭК» [9, 16]. Силикатная эмаль представляет собой твердую аморфную стеклообразную неорганическую массу, основным компонентом которой является диоксид кремния (кремнезем). Данный материал образуется вследствие высокотемпературного воздействия (обжига) при 800–900 °С так называемого фритта или эмалевого шликера.

Основными преимуществами силикатно-эмалевых покрытий являются:

- низкая шероховатость поверхности, равная гладкости стекла;
- температуростойкость до 300–350 °С;
- крайне высокая стойкость к агрессивным средам в температурном диапазоне эксплуатации;
- высокая адгезия к стали;
- хорошая сопротивляемость абразивному износу.

Для СЭП характерна следующая комбинация недостатков, среди которых:

- невысокие механические свойства — высокая хрупкость, низкая ударная прочность и пластичность;
- риск получения высокопористого покрытия;
- большие температуры при нанесении, что может повлечь изменение свойств металла трубы;
- высокие энергозатраты процесса нанесения (высокая стоимость трубы).

Высокая хрупкость данного типа покрытия, которая является основным его недостатком, проявляется, например, при использовании силикатной эмали для защиты внутренней поверхности труб с муфтовыми соединениями. При закручивании муфты, превышение момента затяжки часто приводит к растрескиванию силикатно-эмалевого покрытия, находящегося под резьбой. С некоторыми недостатками данных покрытий можно успешно бороться, применяя современные эмалевые шликеры, совершенствуя технологию нанесения и применяя двухслойные покрытия.

Выводы

В работе приведены практические сведения о возможных методах и материалах для получения газотермических антикоррозионных покрытий, об их достоинствах и недостатках. В заключение заметим, что, несмотря на перспективность использования металлизационных антикоррозионных покрытий, существуют проблемы, которые необходимо решить. Это, в первую очередь, их структура (пористость, оксидные пленки) и физико-меха-

нические свойства (низкая адгезия, хрупкость). Одним из основных способов устранения этих недостатков является нанесение пропитывающих составов. В таком случае покрытие становится композиционным. Пропиточные составы могут быть металлические, органические и неорганические, но в нефтяной сфере их применение мало изучено, поэтому разработка композиционных покрытий является актуальной для защиты погружного нефтепромыслового оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Leszek Łatka, Lech Pawłowski, Marcin Winnicki. Review of Functionally Graded Thermal Sprayed Coatings // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10 (15). 5153. DOI: 10.3390/app10155153.

2. Стручков Н.Ф., Лебедев Д.И., Винокуров Г.Г. Исследование открытой пористости газотермических покрытий с модифицирующими добавками // *Природные ресурсы Арктики и субарктики*. 2018. Т. 23. №1. С. 81-86. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-23-1-81-86. EDN: YAEJHV.

3. Борисов Ю.С. Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.

4. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техника, 1986. 223 с.

5. Князева Ж.В., Юдин П.Е., Петров С.С., Максимук А.В. Исследование барьерных свойств металлизационных покрытий // *Нефтегазовое дело*. 2021. Т. 19. № 1. С. 121-130. DOI: 10.17122/ngdelo-2021-1-121-130. EDN: JZZWUDU.

6. Шехов В.Б., Бобров Г.В., Егоров В.А. Упрочнение плазменных покрытий методом инфильтрации // *Теория и практика газотермического нанесения покрытий: сб. тез. VIII всесоюз. совещ. В 2 т. Рига: Зинатне, 1980. Т. 2. С. 64-67.*

7. Тучинский Л.И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки. М.: Металлургия, 1986. 208 с.

8. Wenzel R. N. Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water // *Industrial and Engineering Chemistry*. 1936. Vol. 28. No. 8. P. 988-994. DOI: 10.1021/ie50320a024.

9. Богатов М.В., Юдин П.Е., Вережкин А.Г., Берков Д.В. Влияние гидрофильности, олеофобности на образование асфальтосмолопарафиновых отложений // *Нефтегазовое дело*. 2022. Т. 20. № 6. С. 114-123. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-6-114-123. EDN: FRFMJA.

10. Prajapati Amit Kumar, Khurana Vaibhav. A Review — Study of Thermal Spray Coatings for Corrosive Wear // *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*. 2016. Vol. 2. Issue 3.

11. Van Tuan Nguyen, Quy Le Thu, Tuan Anh Nguyen. Arc Thermal Spray NiCr20 Alloy Coating: Fabrication, Sealant, Heat Treatment, Wear, and Corrosion Resistances

// *Hindawi. International Journal of Electrochemistry*. 2019. Article ID: 8796958. 8 p. DOI: 10.1155/2019/8796958.

12. Пат. RU 65942 U1. РФ, МПК E 21 B 17/00. Корпус узла установки погружного центробежного насоса для добычи нефти / Л.Х. Балдаев, В.В. Гераськин, А.В. Быков. 2007111361/22, Заявлено 28.03.2007; Опубл. 27.08.2007. Бюл. 24.

13. Jia S., Zehua W., Liqiong S., Zehua Z., Xin Z., Shaoqun J., Gang W. The Effect of Sealing Processes on the Corrosion Behaviour of Al₂O₃-13 Wt. %TiO₂ Coating // *Ceramics-Silikáty*. 2019. Vol. 63 (2). P. 185-193. DOI: 10.13168/cs.2019.0010.

14. Wang Y., Jiang S.L., Zheng Y.G., Ke W., Sun W.H., Wang J.Q. Effect of porosity sealing treatments on the corrosion resistance of high-velocity oxy-fuel (HVOF)-sprayed Fe-based amorphous metallic coatings // *Surface&Coatings Technology*. 2011. Vol. 206. Issue 6. P. 1307-1318. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.08.045.

15. Сонин В.И. Газотермическое напыление материалов в машиностроении. М.: Машиностроение, 1973. 152 с.

16. Богатов М.В., Юдин П.Е., Амосов А.П. Применение внутренних многофункциональных покрытий насосно-компрессорных труб для защиты от образования асфальтосмолопарафиновых отложений // *Нефтегазовое дело*. 2023. Т. 21. № 3. С. 149-160. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-3-149-160. EDN: QFUTZL.

REFERENCES

1. Leszek Łatka, Lech Pawłowski, Marcin Winnicki. Review of Functionally Graded Thermal Sprayed Coatings. *Applied Sciences*, 2020, Vol. 10 (15), 5153. DOI: 10.3390/app10155153.

2. Struchkov N.F., Lebedev D.I., Vinokurov G.G. Issledovanie otkrytoj poristosti gazotermicheskikh pokrytij s modifiruyushchimi dobavkami [A Study of Open Porosity of Gas-Thermal Coatings with Modifying Additives]. *Prirodnye Resursy Arktiki i subarktiki — Arctic and Subarctic Natural Resources*, 2018, Vol. 23, No. 1, pp. 81-86. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-23-1-81-86. EDN: YAEJHV. [in Russian].

3. Borisov Yu.S. Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L., Ardatovskaya E.N. *Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov: spravochnik* [Gas Thermal Coatings Made of Powder Materials: Reference Book]. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1987. 544 p. [in Russian].

4. Borisov Yu.S., Borisova A.L. *Plazmennyye poroshkovyye pokrytiya* [Plasma Powder Coatings]. Kyiv: Technique Publ., 1986. 223 p. [in Russian].

5. Knyazeva Zh.V., Yudin P.E., Petrov S.S., Maximuk A.V. Issledovanie bar'ernykh svoystv metallizatsionnykh pokrytij [Study of Metallization Coatings Barrier Properties], *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2021, Vol. 19, No. 1, pp. 121-130. DOI: 10.17122/ngdelo-2021-1-121-130. EDN: JZZWUDU. [in Russian].
6. Shekhov V.B., Bobrov G.V., Egorov V.A. Uprochnenie plazmennyykh pokrytij metodom infil'tracii [Strengthening Plasma Coatings by Infiltration]. *Sbornik tezisev VIII vsesoyuznogo soveshchaniya: Teoriya i praktika gazotermicheskogo nanoseniya pokrytij. V 2 tomah* [Collection of theses of the VIII All-Union Meeting: Theory and Practice of Gas Thermal Coating. In 2 Volumes]. Riga: Zinatne Publ., 1980. Vol. 2. pp. 64-67. [in Russian].
7. Tuchinsky L.I. *Kompozitsionnye materialy, poluchayemye metodom propitki* [Composite Materials Obtained by Impregnation]. Moscow, Metallurgy, 1986. 208 p. [in Russian].
8. Wenzel R. N. Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1936, Vol. 28, No. 8, pp. 988-994. DOI: 10.1021/ie50320a024.
9. Bogatov M.V., Yudin P.E., Verevkin A.G., Berkov D.V. Vliyaniye gidrofil'nosti, oleofobnosti na obrazovanie asfal'tosmoloparafinovyykh otlozhenij [Effect of Hydrophilicity, Oleficity on Formation of Asphalt Resin Paraffin Deposits]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2022, Vol. 20, No. 6, pp. 114-123. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-6-114-123. EDN: FRFMJA. [in Russian].
10. Prajapati Amit Kumar, Khurana Vaibhav. A Review — Study of Thermal Spray Coatings for Corrosive Wear. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 2016, Vol. 2, Issue 3.
11. Van Tuan Nguyen, Quy Le Thu, Tuan Anh Nguyen. Arc Thermal Spray NiCr20 Alloy Coating: Fabrication, Sealant, Heat Treatment, Wear, and Corrosion Resistances. *Hindawi. International Journal of Electrochemistry*, 2019, Article ID: 8796958. 8 p. DOI: 10.1155/2019/8796958.
12. Baldaev L.Kh., Geraskin V.V., Bykov A.V. Korpus uzla ustanovki pogruzhnogo centrobezhnogo nasosa dlya dobychi nefi [Casing of Submersible Centrifugal Pump Unit for Oil Production]. Patent RF, 65942, 2007. [in Russian].
13. Jia S., Zehua W., Liqiong S., Zehua Z., Xin Z., Shaoqun J., Gang W. The Effect of Sealing Processes on the Corrosion Behaviour of Al₂O₃-13 Wt. %TiO₂ Coating. *Ceramics-Silikáty*, 2019, Vol. 63 (2), pp. 185-193. DOI: 10.13168/cs.2019.0010.
14. Wang Y., Jiang S.L., Zheng Y.G., Ke W., Sun W.H., Wang J.Q. Effect of porosity sealing treatments on the corrosion resistance of high-velocity oxy-fuel (HVOF)-sprayed Fe-based amorphous metallic coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2011, Vol. 206, Issue 6, pp. 1307-1318. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.08.045.
15. Sonin V.I. Gazotermicheskoe napylenie materialov v mashinostroenii [Gas Thermal Spraying of Materials in Mechanical Engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 152 p. [in Russian].
16. Bogatov M.V., Yudin P.E., Amosov A.P. Primenenie vnutrennih mnogofunktsional'nykh pokrytij nasosno-kompres-sornykh trub dlya zashchity ot obrazovaniya asfal'tosmolo-parafinovyykh otlozhenij [The Use of Internal-multifunctional Coatings for Pump and Compressor Pipes to Protect Against the Formation of Asphalt, Resin and Paraffin Deposits]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 3, pp. 149-160. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-3-149-160. EDN: QFUTZL. [in Russian].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анна Юрьевна Поздеева, аспирант, Самарский государственный технический университет; научный сотрудник, ООО «НПЦ «Самара», Самара, Россия

Anna Yu. Pozdeeva, postgraduate student, Samara state technical university; researcher, NPC «Samara» LLC, Samara, Russia

Pozdeeva@npcsamara.ru

Александр Петрович Амосов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Aleksandr P. Amosov, doctor of physics and mathematics sciences, professor, head of the Physical metallurgy, powder metallurgy nanomaterials department, Samara state technical university, Samara, Russia,

egundor@yandex.ru

Павел Евгеньевич Юдин, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный технический университет, Самара, Россия;

директор по науке, ООО «Научно-производственный центр «Самара», Самара, Россия

Pavel E. Yudin, candidate of technical sciences, associate professor, Samara state technical university; director of science, NPC «Samara» LLC, Samara, Russia

Yudin@npcsamara.ru

Статья поступила в редакцию 02.03.2024; одобрена после рецензирования 18.03.2024; принята к публикации 30.03.2024.

The article was submitted 02.03.2024; approved after reviewing 18.03.2024; accepted for publication 30.03.2024.