DOI: 10.24892/RIJIE/202504013

Противодействие коррозии стальных трубопроводов посредством защитных покрытий для обеспечения техносферной безопасности окружающей среды*

Рябова А.В., Ткаченко В.Д., Орловский П.О., Яценко В.С., Изварин А.И.
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
Новочеркасск, Россия
tkachenko.vadik2014@yandex.ru

***Аннотация*. В статье рассматриваются методы защиты стальных трубопроводов от коррозии с помощью защитных покрытий для обеспечения техносферной безопасности окружающей среды. Основное внимание уделяется исследованию стеклоэмалевых покрытий и их модификации для повышения эффективности антикоррозионной защиты.**

Проведен анализ различных типов защитных покрытий (органических и неорганических), особое внимание уделено преимуществам силикатно-эмалевых покрытий. Представлены результаты исследования влияния модифицирующих добавок, в частности молибдена, на характеристики стеклоэмалевого покрытия.

Методология исследования включает синтез и анализ стеклоэмалевых составов, определение оптимальных параметров модификации для снижения поверхностного натяжения и повышения сплошности покрытия. Экспериментальным путем установлено, что оптимальное содержание молибдена составляет 0,2%, при котором достигается минимальное количество дефектов покрытия.

Полученные результаты могут быть использованы при производстве защитных покрытий для стальных трубопроводов различного назначения.

***Ключевые слова*: стеклоэмалевое покрытие, техносферная безопасность, модифицирующие добавки, коэффициент поверхностного натяжения, сплошность покрытия.**

Введение

В современных условиях эксплуатации промышленных объектов (энергетической инфраструктуры) проблема защиты стальных трубопроводов от коррозионных процессов приобретает особую актуальность, поскольку разрушение металлических конструкций не только приводит к значительным экономическим потерям, но и создает серьезные угрозы для техносферной безопасности окружающей среды. Коррозия трубопроводов может вызывать аварийные ситуации, сопровождающиеся загрязнением почвы, грунтовых вод и атмосферного воздуха транспортируемыми веществами, что негативно влияет на экосистему в целом.

Применение защитных покрытий является одним из наиболее эффективных методов противодействия коррозионным процессам, позволяющим значительно продлить срок службы трубопроводных систем и минимизировать риски техногенных аварий. Современные методы антикоррозионной защиты обеспечивают комплексную защиту как от наружной, так и от внутренней коррозии, создавая надежный барьер между металлической поверхностью и агрессивной средой [1].

В настоящее время существует ряд эффективных методов защиты стальных трубопроводов от коррозии, которые принято разделять на пассивные и активные (рис. 1).

Пассивный метод заключается в создании барьера между трубопроводом и грунтом путём нанесения различных защитных покрытий, ограничивающих доступ агрессивных сред к поверхности стали [2]. Выделяют органические (эпоксидные, полиуретановые, полиолефиновые покрытия) и неорганические (цинковые, никелевые, цементные, силикатно-эмалевые покрытия) покрытия.

Эпоксидная смола является эффективным материалом для антикоррозионных покрытий и может иметь один или два слоях [3]. Однако труба с эпоксидным покрытием требует особого ухода при хранении, транспортировке и монтаже, чтобы избежать повреждений.

Полиуретановые покрытия обладают хорошей химической стойкостью, гибкостью, высокой адгезией к металлической поверхности и твердостью [4]. Тем не менее, основными недостатками полиуретановых покрытий являются плохая устойчивость к механической деформации и высокотемпературным деформациям.

Полиолефиновые покрытия (полиэтилен и полипропилен) обладают высокой механической прочностью и устойчивостью к коррозии. Основным недостатком таких покрытий считается невысокая адгезия к стальным трубам. Также к недостаткам полиолефиновых покрытий можно отнести их пониженную морозостойкость.

Цинковое покрытие выступает анодом по отношению к железу и подвергается коррозии для защиты стальной подложки. Однако высокая влажность, морской среды и температурные перепады приводят к значительному ускорению коррозионных процессов цинкового покрытия [5].

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-49-00002, https://rscf.ru/project/25-49-00002/ «Принципы модификации аморфизированных неорганических покрытий с улучшенной адгезией, теплопроводностью и коррозионной стойкостью для объектов энергетической инфраструктуры» (Руководитель Е.А. Яценко). Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Строительство, архитектура и техносферная безопасность", https://iccats.org

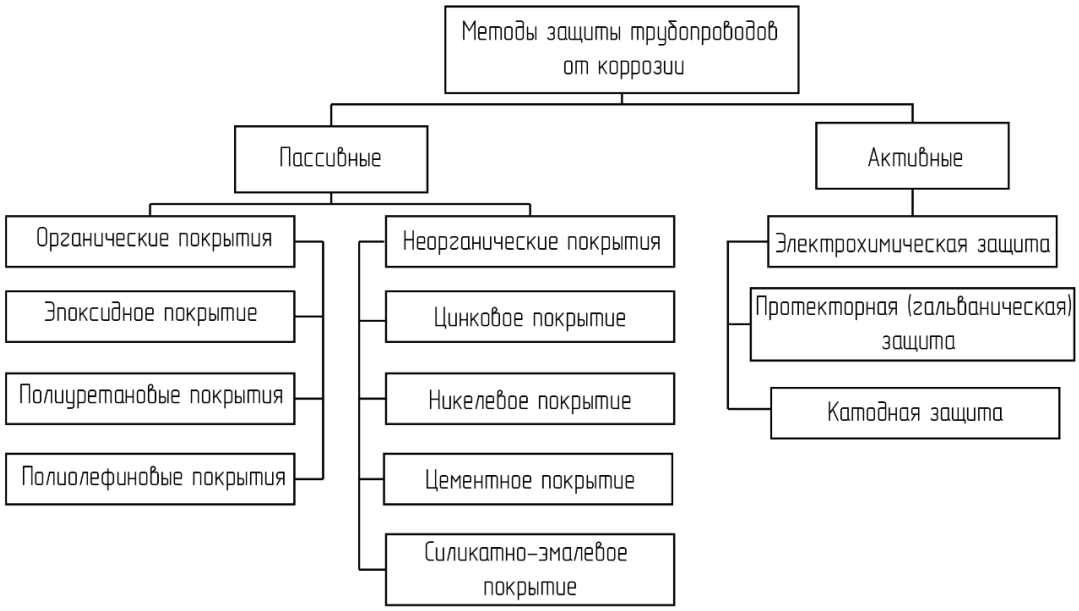


Рис. 1. Методы защиты трубопроводов от коррозии

Никелевое покрытие действует как катод, а стальная основа как анод [6]. Это означает, что при использовании никелевого покрытия провоцируется коррозия, учитывая, что электрохимический никель имеет пористую структуру. Чтобы предотвратить коррозию в порах, покрытие должно быть достаточно толстым, а поры заполнены лаком или расплавом легкоплавкого металла, например, олова.

Цементные покрытия имеют преимущество в низкой стоимости и простоте применения. Однако при большом количестве трещин и выщелачивании бетона защитные свойства покрытия снижаются. Также цементное покрытие обладает высокой водопроницаемостью, что вызывает водородное охрупчивание.

Силикатно-эмалевое покрытие широко применяется в промышленности и в быту для защиты металлов и сплавов от коррозии, оно устойчиво ко многим агрессивным средам [7]. Долговечность таких покрытий боле 50 лет. Эмаль связывается с металлической подложкой при помощи плавления стеклянных фритт при температуре 750 – 850 °С тем самым образуя прочную связь с поверхностью металла. Такое покрытие успешно предотвращает внутреннее накопление и засорение трубопроводных систем, стойкое к абразивам и обеспечивает высокую коррозионную стойкость к кислороду и кислотам. В отличие от органических веществ силикатно-эмалевое покрытие обладают хорошей устойчивостью к нагреву, прямому пламени и тепловому удару. Также с помощью силикатно-эмалевого покрытия возможно предотвратить водородное охрупчивание стали. По разным оценкам, пропускная способность труб с эмалированным покрытием на 29 % выше, чем у обычных труб и, следовательно, можно изготавливать трубопровод диаметром на 10 – 12 % меньше.

Активные методы защиты использует управление электрохимическими процессами на границе между металлом трубы и грунтовым электролитом для обеспечения комплексной защиты [8]. Существуют два вида активной защиты трубопроводов от наружной коррозии – протекторная и катодная.

Протекторная (гальваническая) защита является электрохимическим методом защиты, при котором защитный ток создаётся коррозионным элементом со вспомогательным электродом (протектором), подсоединённым к защищаемому металлу [9].

Катодной защитой называют электрохимический метод борьбы с коррозией, который заключается в приложении отрицательного электрического потенциала к защищаемому объекту [10]. Защита осуществляется путём наложения электрического поля от внешнего источника тока, что обеспечивает катодную поляризацию конструкции.

Электрохимические методы защиты требует специальных навыков, а также оборудования для установки и обслуживания. Кроме того, эти методы защиты требуют постоянного контроля и обновления, что увеличивает стоимость.

В настоящее время наибольший интерес представляют силикатно-эмалевые покрытия для защиты стальных трубопроводов. По химической стойкости эмалированные стальные трубы не уступают медным, титановым и свинцовым, а по себестоимости они в несколько раз дешевле. Применение эмалированных труб из углеродистых сталей вместо нержавеющих также дает высокую экономию средств. К числу достоинств такой продукции относится высокая механическая, химическая прочность, устойчивость к низким и высоким температурам в диапазоне от -40 до +250 ˚С, а также повышенный срок службы в сравнении с другими видами защитных покрытий [11].

Однако внутренние стенки трубопроводов контактируют не только с агрессивной средой, но и с абразивными частицами, которые содержатся в нефти, поэтому даже небольшой дефект может стать очагом возникновения коррозии. Исходя из этого необходимым требованием к эмалевым покрытиям является идеальная сплошность, которая способствует образованию равномерного защитного слоя, не допускающего проникновения кислорода, влаги и агрессивных сред к металлу, тем самым обеспечивая надежную и долговечную защиту от коррозии.

Важную роль в процессе формирования качественного эмалевого покрытия играет поверхностное натяжение (γ). Этот показатель отражает межмолекулярные силы, действующие на частицы поверхностного слоя расплава или твёрдого тела и стремящиеся уменьшить площадь их поверхности. Величина поверхностного натяжения играет решающую роль в процессе эмалирования, особенно с точки зрения смачивания расплавов эмалей и их способности тонко и равномерно распределяться по твердой поверхности металлов, а также при удалении пузырьков из расплава в ходе варки эмалей, заплавлении кратеров лопнувших пузырей при формировании эмалевых покрытий [12].

Поверхностное натяжение эмалей сравнительно велико и в зависимости от состава при температурах их обжига находится в пределах 0,180–0,350 Н/м, что сравнимо с поверхностным натяжением расплавов металлов (Pb, Bi, Sb). Чем слабее связь, тем выше поляризуемость катионов и тем больше стремление частиц снизить энергетический уровень путем их определенной перегруппировки на поверхности и тем самым ниже поверхностное напряжение [13]. В отношении влияния на поверхностное напряжение получается следующая тенденция (в направлении снижения γ):

$Li^+ > Na^+ > K^+$, $Mg^{2+} > Ca^{2+} > Ba^{2+}$, $Fe^{2+} > Co^{2+} > Ni^{2+}$.

Анализ влияния различных компонентов, входящих в состав стеклоэмали по влиянию на поверхностное натяжение расплава, классифицируются на поверхностно-неактивные (SiO_2, Al_2O_3, ZrO_2, MgO, CaO, Li_2O, Na_2O); промежуточного действия (P_2O_5, PbO) и поверхностно-активные (K_2O, B_2O_3, V_2O_5, Cr_2O_3, MoO_3, SO_3 и др.).

К первой группе относятся оксиды, отличающиеся сравнительно высокой энергией координационной связи Me–O в полиэдрах $[MeO_n]$.

К промежуточной группе относятся оксиды двоякой природы. Во-первых, это компоненты с наиболее низкой энергией связи Me–O: Rb_2O, Cs_2O, Tl_2O, PbO и др. Во-вторых, это компоненты, образующие в силикатном расплаве комплексные анионы малой прочности: $[BO_3]^{3-}$, $[AsO_4]^{3-}$, $[AsO_3]^{3-}$, $[SbO_4]^{3-}$, $[BiO_4]^{3-}$, $[BO_3]^{3-}$ и др. Могут образоваться также и молекулы As_4O_6, Sb_4O_6, B_4O_6, Bi_4O_6 и др. В обоих случаях энергия взаимодействия между структурными элементами расплава будет иметь среднее значение по сравнению с таковой компонентов первой и третьей групп. Связи Me–O хотя и слабы, но имеют химический характер и поэтому более интенсивны, чем связи между дискретными анионами третьей группы [14].

К третьей группе принадлежат оксиды, образующие разобщенные дискретные комплексные анионы $[MeO_n]^{x-}$, внутри которых связи наиболее сильны. Такие анионы, например, как $[CrO_4]^{2-}$, $[MoO_4]^{2-}$, $[WO_4]^{2-}$, $[VO_3]^-$, $[SO_4]^{2-}$, сами по себе являются прочными структурными элементами, но взаимодействие их друг с другом незначительно. Поэтому образованные ими адсорбционные слои придают расплавам низкие значения поверхностного натяжения даже при введении этих компонентов в небольших количествах. Ионы F^- и OH^- тоже снижают поверхностное натяжение.

Таким образом целью данного исследования была модификация ранее разработанного состава однослойного стеклоэмалевого покрытия для повышения его сплошности и бездефектного формирования путем снижения коэффициента поверхностного натяжения расплавов.

Материалы и методы

Для модификации стеклоэмалевого покрытия был выбран оптимальный состав, разработанный ранее на основе алюмоборосиликатной системы $RO–R_2O–B_2O_3–Al_2O_3–SiO_2–TiO_2$, так как является наиболее приемлемой в технологии однослойного эмалирования для стальных трубопроводов [15]. Химический состав однослойной стеклоэмалевой фритты представлен в табл. 1.

Модификация эмалевых покрытий проводилась посредством введения поверхностно-активного комплекса анионов $[MoO_4]^{2-}$ в количестве 0,1-0,5 % с шагом 0,1 на помол в шликерную суспензию соответственно водорастворимым соединением аммоний молибденовокислый ($(NH_4)2MoO_4$), как наиболее поверхностно активного.

Варку фритты производят из предварительно составленной в заданных пропорциях и тщательно смешанной стекольной шихты, которую загружают в алундовые тигли и помещают в холодную электрическую печь. Компоненты отвешивали на технических весах и смешивали в фарфоровых барабанах на валковой мельнице.

Варка синтезированных эмалей проводилась при температуре 1250–1350 °С с выдержкой 60 минут. Мокрую грануляцию, сваренных стекломасс, проводили путем выливания в холодную воду. После чего фритты высушивали в сушильном шкафу при температуре 80–90°С.

Синтезированные фритты измельчались в фарфоровых барабанах с фарфоровыми мелющими телами в соотношении 1:1,5 в течении 5 часов для получения тонины помола в интервале 14–30 ед., при этом загрузка фарфоровых барабанов должна производиться не более чем на 35–40 % от общего объема.

Далее исходный составы подвергался модификации посредством введения поверхностно-активного комплекса анионов $[MoO_4]^{2-}$ в количестве 0,1; 0,2; 0,3; 0,4, 0,5 % на помол в шликерную суспензию.

Для нанесения эмалевого покрытия в качестве металлической основы были выбраны пластинки стали Ст3 разме-

Таблица 1

Химический состав стеклоэмалевого покрытия

Содержание оксидов, мас. %														Сумма
SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	Li_2O	TiO_2	MnO_2	Fe_2O_3	Co_3O_4	CuO	CaO	NiO	F, сверх 100	
48,0-52,0	12,0-13,0	2,2-3,2	13,5-14,5	1,0-2,0	1,0-2,0	3,5-4,5	1,0-2,0	0,3-0,6	0,7-1.2	0,5-1,0	2,5-3,5	0,3-0,6	6,0-9,0	100,0

рами 50×50мм предварительно прошедшие процесс химической обработки (обезжиривание, промывка, травление, промывка, нейтрализация и сушка) для удаления загрязнений различного характера (окалина, жиры, грязь и т.д.). Порошки полученных фритт наносились на металлические основы мокрым способом в виде водной шликерной суспензии с влажностью 40 %, далее высушивались при температуре 105–110 °С в течение 10-15 мин и обжигались в предварительно нагретой электрической муфельной печи при температуре 850 °С в течение 3 мин.

После обжига эмалевых покрытий производился предварительный визуальный анализ с помощью металлографического микроскопа «ПОЛАР 1» для выявления оптимальных составов эмалей и наличия дефектов.

Результаты и их обсуждение

На основе модифицированных фритт получены эмалевые покрытия, поверхность которых проанализирована на наличие дефектов с помощью оптического микроскопа проходящего и отраженного света «ПОЛАР1». Количество дефектов типа кратер («булавочный укол») и прогар на единицу площади эмалированного образца представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние количества аммония молибденовокислого в модифицируемых эмалевых покрытиях на дефектообразование

Количество вводимой добавки ($(NH_4)2MoO_4$, %	Среднее количество дефектов, штук на 1 см^2	Средние размеры дефектов, мкм
0	25	7,96–18,6
0,1	16	2,02–3,93
0,2	2	0,96–3,35
0,3	19	6,35–11,30
0,4	39	7,96–12,4
0,5	45	10,56–15,91

Анализ дефектности структуры полученных эмалевых покрытий показал, что ион молибдена обладает большой поверхностной активностью, так как его количество в размере 0,2 % обеспечивает практически полное заплавление образовавшихся кратеров после лопнувших пузырей и соответственно отсутствие дефектов сплошности (рис. 2).

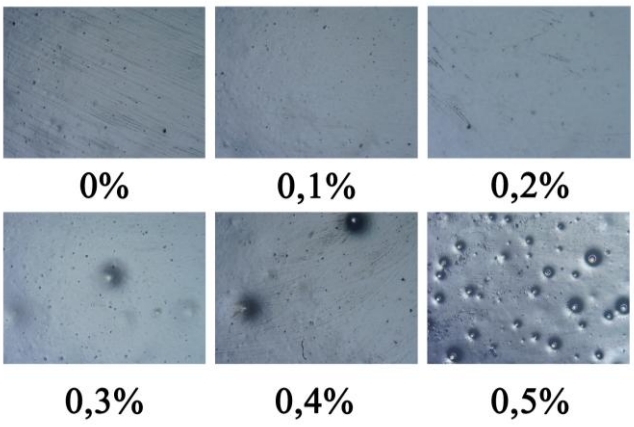


Рис. 2. Микроструктура модифицированных стеклоэмалевых покрытий (×50)

Как видно из представленных снимков основная площадь поверхности образца без модификации обладает большим количеством видимых дефектов таких как булавочные уколы и прогары, которые являются очагами для возникновения коррозии.

Образцы с добавлением модифицирующей добавки молибдена в количестве 0,1 и 0,2 % представляют собой равномерное остеклованное эмалевое покрытие без видимых дефектов даже при увеличении в 50 раз, однако на отдельных участках выявлены незначительные дефекты, которые не ухудшают свойства покрытия.

Как видно из рисунка наибольшую опасность для стеклоэмалевого покрытия является образование дефектов покрытия в виде лопнувших пузырей и прогаров, которые представляют собой газы, выделяющиеся на границе расплава со сталью и образующие пузыри, которые одновременно контактируют с эмалью и металлом [16]. При этом их конфигурация имеет очень важное значение и зависит от вполне определенных характеристик системы сталь-эмаль. В общем случае, чем выше смачивающая способность расплава, тем меньше площадь контакта пузыря с металлом. При росте пузыря возможны два варианта развития этого процесса [17]. По первому варианту пузырь может оторваться от металла раньше, чем его диаметр сравняется по величине с толщиной слоя эмали, т.е. раньше, чем его вершина достигнет поверхности расплава (рис. 3).

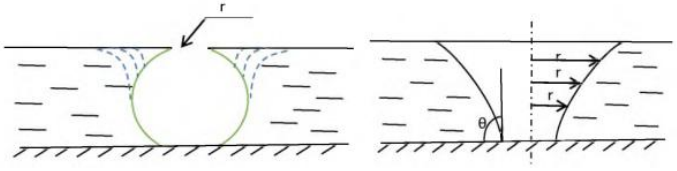
а *б*

Рис. 3 Движение пузыря через слой эмали:
а – пузырь перед отрывом от металла; *б* – оторвавшийся пузырь

В этом случае пузырь оказывается окруженным со всех сторон эмалью, а между ним и металлом присутствует слой эмали и такой механизм не приводит к образованию дефекта в покрытии.

По второму варианту пузырь достигает своей вершиной поверхности эмали, не оторвавшись от металла, разрывает пленку эмали, и площадь его контакта с металлом оказывается обнаженной (рис. 4); сталь в этом месте начинает очень интенсивно окисляться.

Таким образом, при введении модифицирующей добавки образуются комплексы анионов $[MoO_4]^{2-}$, действие межмолекулярных сил которых в поверхностном слое расплава направлено на уменьшение силы поверхностного натяжения расплава, что способствует быстрому заплавлению дефектов.



а *б*

Рис. 4. Кратер непосредственно после разрыва пузыря (*а*) и оформившийся кратер (*б*)

Однако на образцах с содержанием молибдена от 0,3-0,5 % заметно ухудшение качества покрытия, что связанно с снижением растекаемости, вследствие чего ухудшается формирование равномерного покрытия и способствует образованию дефектов.

Таким образом модификация состава путем введения поверхностно-активного комплекса анионов $[MoO_4]^{2-}$ в количестве 0,2% является наиболее оптимальным.

Заключение

В данной работе проведено исследование способов противодействия коррозии стальных трубопроводов посредством стеклоэмалевых защитных покрытий для обеспечения техносферной безопасности окружающей среды. Разработаны составы покрытий для защиты стальных трубопроводов с добавлением модифицирующих добавок на помол в виде поверхностно-активного комплекса анионов $[MoO_4]^{2-}$ водорастворимым соединением аммоний молибденовокислый ($(NH_4)2MoO_4$) для повышения его сплошности и бездефектного формирования путем снижения коэффициента поверхностного натяжения расплавов.

В результате данной работы установлено что оптимальным является состав с содержанием молибдена 0,2%. При таком процентном содержании стеклоэмалевое покрытие обладает хорошим качеством покрытия с средним количеством дефектов на 1 $см^2$ – 2 шт. и средним размером дефектов 0,96-3,35 мкм.

Таким образом, разработанный состав отвечает всем предъявляемым требованиям, а именно: идеальную сплошность, которая способствует образованию однородного слоя, не допускающего проникновения кислорода, влаги и агрессивных сред к металлу, тем самым обеспечивая надежную и долговечную защиту от коррозии

Литература

1. Канарских А.С. Способы защиты трубопроводов от коррозии и их актуальность / Канарских А.С., Л.И. Андрианова, Е.В. Огудова // Нефтегазовый терминал. – 2016. – С. 51-53.

2. Мустафин Ф.М. Обзор методов защиты трубопроводов от коррозии изоляционными покрытиями // Нефтегазовое дело. – 2003. – №. 1.

3. Иванова О.В. Управление качеством нанесения защитных макромолекулярных покрытий на трубопроводном оборудовании нефтегазовой отрасли / О.В. Иванова, Л.Н. Короткова, Р.М. Халиков // Современные материалы, техника и технологии. – 2019. – № 3(24). – С. 43-46.

4. Сухарева К.В. Защитные покрытия на основе синтетических каучуков / К.В. Сухарева и др. // Пластические массы. – 2015. – № 11-12. – С. 57-63.

5. Константинов В.М. Антикоррозионные цинковые покрытия на стальных изделиях: перспективы термодиффузионных покрытий / В.М. Константинов, Н.И. Иваницкий, Л.А. Астрейко // Литьё и металлургия. – 2013. – № 4(73). – С. 107-110.

6. Козлов И.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) / И.А. Козлов и др. //Труды ВИАМ. – 2020. – № 8(90). – С. 77-93.

7. Брагина Л.Л. Технология эмали и защитных покрытий. – Новочеркасск, 2003. – 486 с.

8. Кудрявцев А.А. Коррозия трубопроводов. современные методы защиты / А.А. Кудрявцев, О.И. Разинская // Инженерные кадры-будущее инновационной экономики России. – 2015. – № 1-1. – С. 61-64.

9. Григорьев В.П. Защита металлов от коррозии // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – Т. 5, № 6. – С. 62-67.

10. Никулин С.А. Повышение эффективности предотвращения коррозии нефтегазопроводов на основе оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты // Ухта: УГТУ, 2015.

11. Yatsenko E.A. Complex protection of pipelines using silicate materials based on local raw materials of the Far East / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, A.V. Ryabova // Materials science forum. – 2019. – vol. 945. – P. 46-52.

12. Ткачев А.Г. Технология эмали и защитных покрытий / А.Г. Ткачев, А.С. Кушнарев, А.Я. Козярский. – Новочеркасск: НГТУ, 1993.

13. Гулоян Ю.А. Поверхностные явления в технологии стекла // Стекло и керамика. – 2006. – Т. 79, № 5. – С. 10-18.

14. Химическая технология стекла и ситаллов / Под ред. Н.М. Павлушкина. – М.: Стройиздат., 1983 – 432 с.

15. Yatsenko E.A. Review of protective coatings for pipelines / E.A. Yatsenko et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – vol. 110. – P. 656-663.

16. Бакалин Ю.И. Макроструктура стеклоэмалевых покрытий. – Минск: Издательство БГУ, 1978. – 124 с.

17. Рябова А.В. Особенности формирования защитного внутреннего стеклоэмалевого покрытия для стальных трубопроводов / А.В. Рябова, В.М. Курдашов, А.С. Александрин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2023. – № 1(217). – С. 63-73.

DOI: 10.24892/RIJIE/202504013

Anti-corrosion Treatment of Steel Pipelines Using Protective Coatings to Ensure Environmental Safety

Ryabova A.V., Tkachenko V.D., Orlovsky P.O., Yatsenko V.S., Izvarin A.I.
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)
Novocherkassk, Russian Federation
tkachenko.vadik2014@yandex.ru

Abstract. **The article discusses methods of protecting steel pipelines from corrosion using protective coatings to ensure the technospheric safety of the environment. The main attention is paid to the study of glass-enamel coatings and their modification to increase the effectiveness of anti-corrosion protection.**

The analysis of various types of protective coatings (organic and inorganic) is carried out, special attention is paid to the advantages of silicate-enamel coatings. The results of a study of the effect of modifying additives, in particular molybdenum, on the characteristics of a glass-enamel coating are presented.

The research methodology includes synthesis and analysis of glass-enamel compositions, determination of optimal modification parameters to reduce surface tension and increase coating continuity. It has been experimentally established that the optimal molybdenum content is 0.2%, at which the minimum number of coating defects is achieved.

The practical significance of the work lies in the development of a protective coating composition that provides reliable protection against corrosion due to the perfect continuity and uniform distribution of the protective layer. The results obtained can be used in the production of protective coatings for steel pipelines for various purposes.

Keywords**: glass-enamel coating, technospheric safety, modifying additives, surface tension coefficient, coating continuity.**

Библиографическое описание статьи

Рябова А.В. Противодействие коррозии стальных трубопроводов посредством защитных покрытий для обеспечения техносферной безопасности окружающей среды / А.В. Рябова, В.Д. Ткаченко, П.О. Орловский, В.С. Яценко, А.И. Изварин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2025. – Т.12, №4. – С. 76-81. DOI: 10.24892/RIJIE/20250413

Reference to article

Ryabova A.V., Tkachenko V.D., Orlovsky P.O., Yatsenko V.S., Izvarin A.I. Anti-corrosion treatment of steel pipelines using protective coatings to ensure environmental safety, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2025, vol.12, no.4, pp. 76-81. DOI: 10.24892/RIJIE/20250413
