DOI: 10.24892/RIJIE/20260310

Аморфизированные неорганические покрытия для стальных трубопроводов с повышенной адгезией и коррозионной стойкостью*

Яценко Е.А., Рябова А.В.,
Курдашов В.М., Изварин А.И.
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
г. Новочеркасск, Российская Федерация
viktorkurdashov@yandex.ru

Wensheng Li
Северо-западный педагогический университет
Ланьчжоу, Ганьсу, Китай

Аннотация. **В статье представлены результаты исследования аморфизированных неорганических покрытий для стальных трубопроводов с целью повышения их адгезионных свойств и коррозионной стойкости. Для решения данной проблемы было исследовано влияние различных модифицирующих добавок на адгезию (оксиды меди (CuO) и сурьмы (Sb_2O_3)) и коррозионную стойкость (оксид циркония (ZrO_2) и стронцианит ($SrCO_3$)). Проведен синтез стеклофритт модифицированных составов и на их основе получены покрытия на стальных образцах Ст3. Проведены комплексные испытания адгезионных свойств полученных покрытий с использованием стандартных методик оценки ударной прочности и относительной прочности сцепления. Установлено, что оптимальной модифицирующей добавкой является оксид меди в количестве 2 %, обеспечивающий максимальную относительную прочность сцепления, при которой ток в электрической цепи отсутствует (0 А), что указывает на наличие после деформации сцепляющего слоя или самого покрытия на металле. Проведены исследования коррозионной стойкости модифицированных покрытий в соответствии с ГОСТом 24788-2018 посредством воздействия 4 %-ной уксусной кислоты. Установлено, что наибольшей коррозионной стойкостью характеризуется покрытие модифицированное 6 % оксида. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых составов аморфизированных неорганических покрытий для защиты трубопроводов с улучшенными защитными характеристиками.**

***Ключевые слова*: стальной трубопровод, аморфизированные неорганические покрытия, модифицирующие добавки, адгезия, коррозионная стойкость.**

Введение

В Российской Федерации стальные трубопроводы являются одним из важных элементов энергетической инфраструктуры страны. Стальные трубы широко используются для монтажа трубопроводов, по которым транспортируют на большие расстояния техническую, минеральную и питьевую воду, растворы кислот, солей и щелочей, нефть, нефтепродукты, газ и другие вещества, которые оказывают коррозионное воздействие на металл [1]. В настоящее время протяжённость трубопроводов составляет около 250 000 км, при этом пятая часть труб предназначена для транспортировки нефти и нефтепродуктов – 50 000 км [2].

Для трубопроводов различают внешнюю и внутреннюю коррозию, причиной которых являются различные факторы и условия эксплуатации. Внешняя коррозия происходит из-за воздействия атмосферных, почвенно-грунтовых и других факторов окружающей среды. При данной коррозии, окружающей средой могут быть грунтовые воды или влажная почва для береговых трубопроводов и морская вода для морских трубопроводов. Для защиты от данного типа коррозии используются следующие методы защиты такие как катодная, протекторная и анодная защита, а также органические и неорганические покрытия [3-6]. При внутренней коррозии транспортируемой средой могут быть жидкие агенты, содержащие воду с хлоридом натрия (NaCl), сероводородом (H_2S) и углекислым газом (CO_2), воздействие которых приводит к активной коррозии поверхности стали. Этот процесс представляет собой серьезную угрозу для целостности трубопроводов и их эффективной работы.

Также, при эксплуатации стальных нефтепроводов могут возникнуть асфальтосмолопарафиновые отложения, которые представляют собой сложную углеводородную смесь, состоящую из твердых метановых углеводородов [7]. Они откладываются на внутренних поверхностях стальных трубопроводов, снижая их пропускную способность и увеличивая риск закупорок и других негативных последствий. Шероховатость поверхности труб служит очагом образования парафиновых отложений и увеличивается вследствие коррозионного разрушения стали.

Для предотвращения образования данных отложений могут использоваться ингибиторы, а также металлические, органические и неорганические покрытия [8-13], из которых наиболее эффективными являются аморфизированные неорганические стеклоэмалевые покрытия.

Данный вид покрытий представляет собой стекловидный слой, который наносится на металлическую поверхность путём плавления. Аморфизированные неорганические стеклоэмалевые покрытия в зависимости от химического состава обладают рядом преимуществ, таких как: большим сроком службы (более 20 лет), высокой коррозионной стойкостью к некоторым видам реагентов, долговечностью, механической прочностью и устойчивостью к истиранию. Однако

* 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 "Пром-Инжиниринг", https://icie-rus.org

для улучшения других различных свойств таких как, адгезионная способность и коррозионная стойкость, необходимо изменить структуру стеклоэмали [14].

Модификация сырьевой шихты для варки эмалевой фритты является одним из наиболее эффективных способов улучшения свойств аморфизированного покрытия. Шихта представляет собой смесь исходных сырьевых материалов, которая при плавлении формирует расплав, на основе которого в дальнейшем получают аморфизированное покрытие для стали.

При выборе способа и механизма модификации необходимо установить механизм воздействия различных модифицирующих добавок на адгезионную способность и коррозионная стойкость. Так адгезию можно повысить двумя способами: использованием оксидов сцепления: никеля (NiO), кобальта (CoO), меди (CuO), сурьмы (Sb_2O_3), молибдена (MoO_3) и др. [15-18], которые улучшают адгезионные свойства покрытий за счет формирования специальных переходных слоев между покрытием и основой и использование окислительных добавок: натриевая ($NaNO_3$) и калиевая (KNO_3) селитра, пиролюзит (MnO_2) и др. [21], обеспечивающие окисление поверхности основы и формированию прочного соединения между эмалью и подложкой. Сведений о влиянии на прочность сцепления модифицирующих добавок в литературе мало, а имеющиеся данные весьма противоречивы.

Коррозионная стойкость для стальных трубопроводов является также критически важным эксплуатационным свойством, определяющим долговечность и надёжность конструкции в агрессивных средах. При этом требования к коррозионной стойкости аморфизированного покрытия регламентируются действующими стандартами: согласно ГОСТ 24788–2018 «Посуда хозяйственная стальная эмалированная» коррозионная стойкость покрытия ограничена значением 0,25 мг/см².

Для повышения коррозионной стойкости необходимо использовать модифицирующие добавки, повышающие коррозионную стойкость покрытия. Современные исследования показывают, что эффективными добавками в состав стекломатрицы являются оксиды: алюминия (Al_2O_3), кремния (SiO_2), бария (BaO), кальция (CaO), хрома (Cr_2O_3), циркония (ZrO_2) и др. [22, 23] и минеральные добавки: циркон ($ZrSiO_4$), муллит ($3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$), хромит ($FeCr_2O_4$), каолин ($Al_2O_3{\cdot}2SiO_2{\cdot}2H_2O$) и стронцианит ($SrCO_3$) [24,25]. Эффективность добавок зависит от подбора их количества, так как избыточное количество некоторых компонентов может привести к обратному эффекту – снижению защитных свойств покрытия.

Таким образом целью данного исследования является модификация неорганических аморфизированных неорганических покрытий для стальных трубопроводов, которая направлена на устранения ключевых недостатков традиционных составов, а именно повышении адгезии и коррозионной стойкости.

Материалы и методы

Для получения аморфизированного неорганического покрытия на основании анализа литературных данных была выбрана алюмоборосиликатная система $RO–R_2O–B_2O_3–Al_2O_3–SiO_2–TiO_2$, как наиболее приемлемая в технологии однослойного эмалирования для стальных трубопроводов. В данной системе ранее авторами был разработан состав однослойной стеклоэмалевой фритты [26], химический состав которой представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав аморфизированного неорганического 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	
52,0-56,0	12,0-14,0	2,5-3,5	13,0-16,0	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	100

Для увеличения адгезии были выбраны оксиды сцепления: оксиды меди (CuO) и сурьмы (Sb_2O_3). Данные добавки добавлялись в шихту в количестве от 1 до 3 % с шагом 1 %. Для увеличения коррозионной стойкости в качестве модифицирующих добавок были выбраны оксид циркония (ZrO_2) и минеральная добавка стронцианит ($SrCO_3$) в количестве от 0 до 6 % с шагом 2 %. Данные добавки были выбраны благодаря своим физико-химическим свойствам, а также из-за низкой стоимости и широкой доступности.

Все компоненты шихты для варки стеклоэмалевых фритт (кварцевый песок, борная кислота, полевой шпат, кальцинированная сода, поташ, углекислый литий, оксид титана, оксид марганца, оксид железа, оксид кобальта, оксид меди, известняк, оксид никеля, криолит, оксид меди, оксид сурьмы, оксид циркония и стронцианит) были измельчены и просеяны: природные материалы – через сито № 08, а технические – через сито № 1.

Для составления шихты компоненты взвешивались на технических весах DL-1002 и смешивались в фарфоровых барабанах шаровой мельницы. Полученные сырьевые смеси помещали в шамотные тигли, которые предварительно загружали в холодную высокотемпературную элеваторную печь ТК.4.1600.Э.ДМ.1Ф с дисилицид молибденовыми нагревателями. Температуру печи постепенно увеличивали, а её контроль и регулирование процесса варки проводили с помощью платиново-родиевой термопары.

Степень провара стекломассы определяли методом «пробы на нить», для чего пруток из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т погружался в расплав, после чего из него вытягивалась нить. Отсутствие пузырей, узелков и гладкая блестящая поверхность нити свидетельствовали о проваре шихты и полном переходе ее в аморфизированное стеклообразное состояние.

В ходе варки стеклоэмалевых фритт установлен оптимальный режим стекловарения: максимальная температура варки 1400 °С с выдержкой 60 мин. Охлаждение и грануляцию жидкотекучего расплава проводили по "мокрому" способу согласно ГОСТу Р

52569–2018 «Фритты. Технические условия», затем ее высушивали в сушильном шкафу при температуре не более 100 °С до влажности не более 3%. Полученную эмалевую фритту измельчали в шаровой мельнице (micropomol BM-5) в течение 4 часов, с последующим просеиванием через сито с размером ячейки №0,05.

Для исследования адгезии и коррозионной стойкости использовались круглые пластины стали марки Ст3 диаметром 90 мм. Данная сталь подвергалась химической обработке (обезжиривание, промывка, травление, промывка, нейтрализация и сушка) для удаления загрязнений различного характера (окалина, жиры, грязь и т.д.). Полученные порошки фритт размерами 250 мкм и менее, наносились на металлические основы тонким слоем 300-500 мкм, мокрым способом в виде водной шликерной суспензии с влажностью 40 %. Количество нанесенной шликерной суспензии на металлическую основу составило 1,6-1,8 кг/м^2. Далее шликер высушивался при температуре 105–110 °С в течение 10-15 мин и обжигались в предварительно нагретой электрической муфельной печи при температуре 850 °С.

Для изучения адгезии аморфизированного покрытия со сталью проводились исследования на ударную прочность согласно ГОСТ Р 52569-2006. Для исследования использовался боек массой 1 кг, который с помощью фиксатора устанавливался на высоту 0,2 м, затем освобождался поворотом фиксатора. Баек при этом свободно падал на покрытие и производил удар. Удар производили на трех произвольно выбранных участках наружной поверхности образца, находящихся друг от друга не менее чем 60 мм. Далее проводился визуальный осмотр покрытия.

Параллельно проводилось исследование относительной прочности сцепления путем пропускания тока после деформации образца испытаний на ударную прочность с использованием прибора ЛЭЭМ НПИ. Главным рабочим элементом для измерения относительной величины обнаженного металла является головка-датчик, содержащая 129 игл-зондов с пружинами. Количество игл-зондов, входящих в электрический контакт с металлической основой образца при испытании, практически пропорционально величине поверхности, лишенной покрытия со сцепляющим слоем. Каждая игла при вхождении в контакт с металлом включает в цепь соединенный с ней резистор постоянного сопротивления. Чем большая площадь поверхности сплошного аморфизированного неорганического покрытия образца лишена сцепляющего слоя, тем большее количество резисторов постоянного сопротивления будет включено в электрическую цепь и, следовательно, большим будет ток в цепи, что соответствует более низкой прочности сцепления покрытия с металлом.

Испытания коррозионной стойкости проводились в соответствии с требованиями ГОСТа 52569-2006. Полученные аморфизированные неорганические покрытия предварительно были обезжирены органическим растворителем, промыты дистиллированной водой, высушены при температуре (110 ± 10) °С в течение 2 ч в сушильном шкафу и охлаждены в эксикаторе в течение 2 ч. Далее эмалированные стальные образцы были взвешены на аналитических весах и подвергались испытанию на коррозионную стойкость.

Исследование коррозионной стойкости проводилось следующем образом: образец был закреплен в данной установке, нагрет в сушильном шкафу до температуры 110 ˚С в течение 30 мин, затем в установку была залита на 2/3 высоты (7,39 см) кипящий раствор уксусной кислоты (СН3СООН) массовой доли 4,0 %. Далее установка закрывалась резиновой пробкой с холодильником и термометром и устанавливалась на нагретую песчаную баню. Испытание проводилось при температуре 110±10С в течение 1 часа. После испытания из установки вынималась пробка с холодильником и термометром, сливался раствор, образец с испытуемым аморфизированным неорганическим покрытием извлекался, промывался дистиллированной водой, высушивался при температуре 110 ˚С в течение 2 часов, охлаждался в эксикаторе в течение 2 часов и взвешивался на аналитических весах. Для сходимости результатов проводили 3 параллельных опыта.

Средняя коррозионную стойкость X (мг/см^2·ч) рассчитывалась по формуле:

$$X=\Delta m/(S\cdot t), \quad (1)$$

где Δm – потеря массы образца, мг; S – площадь испытуемой поверхности образца, см2; t – продолжительность испытания, ч.

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты сплошности покрытий после испытаний на ударную прочность представлены на рис. 1.

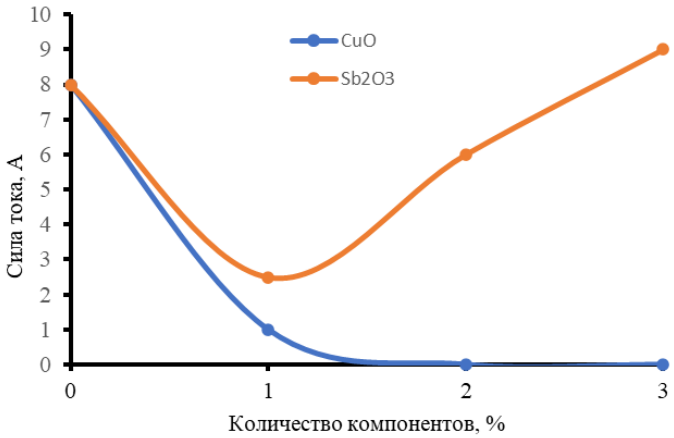

Рис. 1. Результаты исследования сплошности аморфизированных неорганических покрытий

Как видно из полученных результатов исследования сплошности покрытий, состав без модифицирующих добавок пропускает ток (8,0 А), что указывает на плохую относительную прочность сцепления покрытия с металлом. При введении оксида меди и сурьмы, снижение тока в электрической цепи, посредством повышения прочности сцепления металл-эмаль. Было выявлено, что применение оксида сурьмы в качестве модифицирующей добавки при 1 % повышает адгезию, пропускной ток уменьшился и составил (2,5 А), однако при увеличении содержания Sb_2O_3 (2-3%), значительно ухудшается прочность сцепления и пропускной ток увеличивается (6-9 А). На основании полученных результатов установлено, что оксид меди в количестве от 1 до 3 % является оптимальной модифицирующей добавкой для покрытия, обладает высокой адгезией сталь-стеклоэмаль, низким количеством пропускания тока (от 1 до 0 А).

Полученные результаты расчета коррозионной стойкости аморфизированных неорганических покрытий сведены и представлены на рис. 2.

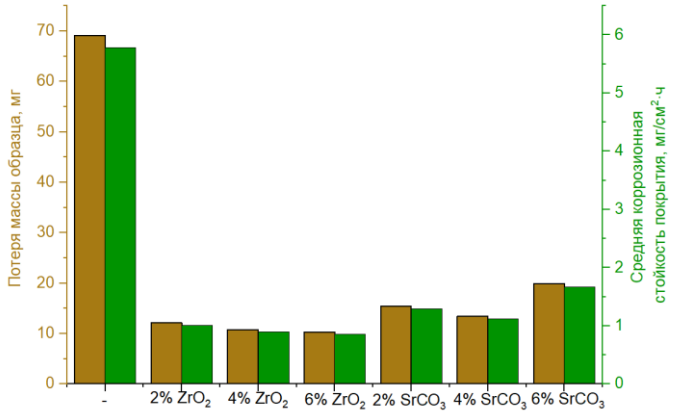

Рис. 2. Результаты определение коррозионной стойкости

Анализируя результаты исследования, можно сделать вывод, что модифицирующие добавки положительно влияют на коррозионную стойкость к действию 4 % уксусной кислоты. Без модифицирующих добавок исследуемая эмаль обладает большой потерей массы, показывая низкую коррозионную стойкость – 5,78 мг/см^2·ч. При увеличении количества оксида циркония наблюдается уменьшение потерь массы, и повышение коррозионной стойкости. Так при введении 2 % ZrO_2 потеря массы в сравнении с исходным составом уменьшилась на 82,5 %, при 4 % ZrO_2 – на 84,4 %, при 6 % ZrO_2 – на 85,1 %.

При добавлении стронцианита в исходный состав наблюдается уменьшение потери массы при введении до 4 %, но при дальнейшем увеличении содержании $SrCO_3$ до 6 % потеря массы увеличивается, что негативно сказывается на коррозионной стойкости аморфизированного покрытия. При добавлении 2 % $SrCO_3$ потеря массы в сравнении с исходным составом уменьшилась на 77,7 %, при 4 % $SrCO_3$ – на 80,6 %, при 6 % $SrCO_3$ – на 71,1 %.

Заключение (Выводы)

В результате исследования установлено, что добавление модифицирующих добавок в шихту повышает адгезию и коррозионную стойкость. Наиболее эффективным модификатором для повышения адгезии является оксид меди (CuO), в количестве 2 %, который обеспечивает высокую прочность сцепления покрытия с металлом. При этом достигается оптимальная относительная прочность сцепления, о чем свидетельствует отсутствие тока в электрической цепи (0 А). В результате исследования модифицирующих добавок на повышения коррозионной стойкости, установлено, что оксид циркония является более эффективной модифицирующей добавкой в сравнении со стронцианитом, а наибольшую коррозионную стойкость показывает состав с содержанием 6 % ZrO_2, которая составила 0,86 мг/см^2·ч. При добавлении 2 % модифицирующих добавок наблюдается резкий скачок увеличения коррозионной стойкости с 5,78 до 1,01 и 1,29 мг/см^2·ч, что требует проведения дополнительных исследований в интервале концентраций от 0 до 2 %. Эти исследования будут проведены в дальнейшем для более детального изучения данного эффекта.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых составов неорганических аморфизированных покрытий для защиты трубопроводов с улучшенными защитными характеристиками.

Литература

1. Крапивский Е.И. Надежность нефтегазовых объектов в арктических условиях: Учеб. пособие / Е.И. Крапивский, Н.С. Вишневская Н., Е.Е. Яворская. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 216 с.

2. Калабеков И.Г. Российские реформы в цифрах и фактах. – М.: Русаки, 2010. – 696 с.

3. Farh H.M.H. Comprehensive Review of Corrosion Protec-tion and Control Techniques for Metallic Pipelines / H.M.H. Farh, M.E.A.B. Seghier, T.A. Zayed // Engineering Failure Analysis. – 2023. – Vol.143. – Art. 106885.

4. Mirza M.M. Surface Coatings on Steel Pipes Used in Oil and Gas Indus-tries-A Review / M.M. Mirza, E. Rasu, A. Desilva // American Chemical Science Journal. – 2016. – Vol.13. – P. 1-23.

5. Ryndin V.V. Analysis of Passive Methods of Protection from Corrosion of Main Oil and Gas Pipelines / V.V. Ryndin, G.G. Abdullina, A.T. Abdullin // Science and Technology of Kazakhstan. – 2018. – Vol.2. – P. 91-100.

6. Manian L. Galvanic Protection of an Offshore Loading Pipeline in the Baltic Sea. In Proceed-ings of the Baltic Sea // Nace corrosion. – 2000. – Art. NACE--00668.

7. Коробов Г.Ю. Механизмы образования асфальтосмолопа-рафиновых отложений и факторы интенсивности их формирования / Г.Ю. Коробов, Д.В. Парфенов, В.Т. Нгуен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т.334. – №4. – С. 103-116.

8. Ce N. Thermally Sprayed Aluminum Coatings for the Protection of Subsea Risers and Pipelines Carrying Hot Fluids / N. Ce, S. Paul // Coatings. – 2016. – Vol.6. – 58 p.

9. Артюшкин В.Н. Применение силикатно-эмалевых покрытий для нефтепромысловых трубопроводов / В.Н. Артюшкин, В.М. Авдеев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2015. – №4. – С. 101-106.

10. Bardakjian H. Corrosion Protection of Large Diameter Weld-ed Steel Pipelines with Cement Mortar Coatings / H. Bardakjian, M. McReynolds, D. Hausmann // In Pipelines 2007: Advances and Experiences with Trenchless Pipeline Projects. – 2007. – P. 1-10.

11. Ha H.M. On the Role of Water, Temperature, and Glass Transition in the Corrosion Protection Behavior of Epoxy Coatings for Underground Pipelines / H.M. Ha, A. Alfantazi // Journal of Coatings Technology and Research. – 2015. – Vol.12. – P. 1095-1110.

12. Samimi A. An Analysis of Polyethylene Coating Corrosion in Oil and Gas Pipelines // A. Samimi, S. Zarinabadi / J. Am. Sci. USA. – 2011. – P. 1032-1136.

13. Богатов М.В. Предотвращение образования асфальтосмолопарафиновых отложений на поверхности насосно-компрессорных труб путем нанесения внутренних покрытий / М.В. Богатов и др. // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т.20. – №1. – С. 74-81.

14. Yatsenko E.A. Influence of fluorine-containing additive on flowability of a glass enamel coating for steel pipelines / E.A. Yatsenko et al. // CIS Iron and Steel Review. – 2025. – Vol.30. – P. 79-83.

15. Брагина Л.Л. Технология эмали и защитных покрытий / Л.Л. Брагина и др. – 2003, 484 с.

16. Berdzenishvili I. Functional corrosion-resistant enamel coatings and their adherence strength // Acta Physica Polonica A. – 2012. – Vol.121, №1. – P. 178-180.

17. Боровой В.Ю. Рациональное использование сырьевых материалов для получения силикатной эмали с заданными свойствами // Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности: сборник научных трудов X Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых" Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее", 9-11 ноября 2021 г., г. Томск. – Томский политехнический университет, 2022. – С. 39-42.

18. Денисова В.С. Стеклоэмалевые покрытия для защиты коррозионностойких сталей от высокотемпературной газовой коррозии: свойства и области применения (обзор) / В.С. Денисова, С.С. Солнцев, Г.А. Соловьева // Труды ВИАМ. – 2015. – №5. – С. 27-32.

19. Артамонова М.В. Химическая технология стекла и ситталов / М.В. Артамонова, М.С. Асланова, И.М. Бужинский и др.; под ред. Н.М. Павлушкина – М.: Стройиздат, 1983. – 432 С.

20. Rossi S. Durability of vitreous enamel coatings and their resistance to abrasion, chemicals, and corrosion: a review / S. Rossi, F. Russo, M. Calovi // Journal of Coatings Technology and Research. – 2021. – Т.18. – P. 39-52.

21. Rossi S. Influence of mill additives on vitreous enamel properties / S. Rossi, C. Zanella, R. Sommerhuber // Materials & Design. – 2014. – Vol.55. – P. 880-887.

22. Брагина Л.Л. Технология эмали и защитных покрытий / Л.Л. Брагина, А.П. Зубехин, И.Я. Белый и др. – Харьков: НТУ ХПИ, 2003. – 483 с/

23. Яценко Е.А. Исследование способов модификации аморфизированных неорганических покрытий для повышения коррозионной стойкости стальных трубопроводов / Е.А. Яценко и др. // Черные металлы. – 2025. – №11. – С. 85-90.

24. Yatsenko E.A. Review of protective coatings for pipelines / E.A. Yatsenko et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Т. 110. – С. 656-663.

DOI: 10.24892/RIJIE/20260310

Amorphized Inorganic Coatings for Steel Pipelines with Increased Adhesion and Corrosion Resistance

Yatsenko E.A., Ryabova A.V.,
Kurdashov V.M., Izvarin A.I.
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)
Novocherkassk, Russian Federation
viktorkurdashov@yandex.ru

Wensheng Li
Northwest Normal University
Gansu, Lanzhou, China

Abstract. **The article presents the results of a study of amorphized inorganic coatings for steel pipelines in order to improve their adhesive properties and corrosion resistance. To solve this problem, the influence of various modifying additives on adhesion (copper oxide (CuO) and antimony oxide (Sb_2O_3)) and corrosion resistance (zirconium oxide (ZrO_2) and strontianite ($SrCO_3$)) was investigated. The synthesis of glass frit modified compositions was carried out, and coatings were obtained on steel samples of St3 based on them. Comprehensive tests of the adhesion properties of the obtained coatings were conducted using standard methods for assessing impact strength and relative adhesion strength. It was found that the optimal modifying additive is copper oxide at a concentration of 2%, which provides the maximum relative adhesion strength of the coating to the metal with no current in the electrical circuit up to 0 A, indicating the presence of an adhesive layer or the coating itself on the metal after deformation. The corrosion resistance of modified coatings was studied in accordance with GOST 24788-2018 by exposing them to 4% acetic acid. It was found that the coating modified with 6% oxide has the highest corrosion resistance. These results can be used in the development of new compositions of amorphized inorganic coatings for protecting pipelines with improved protective properties.**

Keywords: **Steel pipeline, amorphized inorganic coatings, modifying additives, adhesion, and corrosion resistance.**

Библиографическое описание статьи

Яценко Е.А. Аморфизированные неорганические покрытия для стальных трубопроводов с повышенной адгезией и коррозионной стойкостью / Е.А. Яценко, А.В. Рябова, В.М. Курдашов, А.И. Изварин, W. Li // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2026. – Т.13, №3. – С. 60-64. DOI: 10.24892/RIJIE/20260310

Reference to article

Yatsenko E.A., Ryabova A.V., Kurdashov V.M., Izvarin A.I., Li W. Amorphized inorganic coatings for steel pipelines with increased adhesion and corrosion resistance, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2026, vol.13, no.3, pp. 60-64. DOI: 10.24892/RIJIE/20260310