

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 3. С. 241–254.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (3): 241–254.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 667.6:620.197.6

<https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-3-241-254>



EDN: INPNDZ

АНТИКОРРОЗИОННЫЕ СОСТАВЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ И ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Владислав Александрович Дебелов, Юрий Алексеевич Власов,
Николай Петрович Горленко, Наталья Николаевна Дебелова,
Юлия Юрьевна Сильман

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Коррозия металлических и железобетонных конструкций остается одной из самых серьезных проблем, влияющих на прочность и долговечность изделий. Она вызвана преимущественно такими факторами окружающей среды, как воздействие хлоридов, сульфатов и углекислого газа. Для защиты от коррозии широко применяются методы нанесения защитных слоев на поверхность металла. Анализ практического применения покрытий различной природы показывает, что использование полимерных матриц в сочетании с химическими добавками и наполнителями имеет явные преимущества в эффективности защиты, экономической целесообразности и экологической устойчивости.

Цель работы заключается в синтезе композиций на основе ряда полимерных матриц и химических добавок неорганической природы и оценке их антикоррозионных свойств.

Результаты. В работе представлены экспериментальные результаты синтеза композиций на основе металл-фосфатных связок, введенных в полиуретановую, поливинилацетатную или алкидную полимерную матрицу. Проведена сравнительная оценка адгезионных и антикоррозионных свойств предложенных композиций. Показано, что они могут применяться в качестве комплексного защитного покрытия. Установлено, что введение в полимерную матрицу полиуретана смеси оксидов железа переменной валентности приводит к существенному снижению скорости коррозии в хлорид-содержащей среде за счет протекания вторичных окислительно-восстановительных процессов в объеме защитного слоя. На основании определения краевого угла смачивания и адгезионной прочности композиции к поверхности стали, а также анализа диаграммы Пурбе приведено теоретическое обоснование представленным экспериментальным результатам.

Ключевые слова: коррозия, скорость коррозии, антикоррозионные покрытия, полимерные матрицы, металл-фосфатные связки, адгезия, диффузия, диаграмма Пурбе

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет-2030».

Для цитирования: Дебелов, В.А., Власов, Ю.А., Горленко, Н.П., Дебелова, Н.Н., Сильман, Ю.Ю. Антикоррозионные составы на основе полимерных

матриц и химических добавок неорганической природы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 3. С. 241–254. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-3-241-254>. EDN: INPNDZ

ORIGINAL ARTICLE

CORROSION-RESISTANT COMPOUNDS BASED ON POLYMER MATRICES AND INORGANIC ADDITIVES

**Vladislav A. Debelov, Yury A. Vlasov, Nikolay P. Gorlenko,
Nataliya N. Debelova, Yulia Yu. Sil'man**
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Corrosion of metal and reinforced concrete structures remains one of the most serious problems affecting strength and durability of products. It is primarily caused by environmental factors such as chloride, sulfate, and carbon dioxide exposure. Various methods are widely used to apply corrosion-resistant coatings onto metal surface.

Purpose: The aim of this work is to synthesize corrosion-resistant compounds based on polymer matrices and inorganic additives and investigate their corrosion-resistant properties.

Methodology/approach: It is shown that proposed compositions can be used as a complex protective coating. The introduction of a mixture of iron oxides with variable valence into the polyurethane polymer matrix significantly reduces the corrosion rate in chloride-containing environments due to secondary redox processes in the protective layer. The contact angle, adhesive strength are calculated, and the Pourbaix diagram is analyzed.

Research findings: Synthesized are corrosion-resistant compounds based on metal-phosphate binders incorporated into polyurethane, polyvinyl acetate or alkyd polymer matrix.

Practical implications: Polymer matrices combined with chemical additives and fillers have advantages in the protection efficiency, cost-effectiveness, and environmental sustainability, and such compounds can be used for corrosion protection.

Keywords: corrosion rate, corrosion-resistant coatings polymer matrix, metal-phosphate binder, adhesion, diffusion, Pourbaix diagram

Funding: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and carried out within the Strategic Academic Leadership Program 'Priority 2030'.

For citation: Debelov, V.A., Vlasov, Yu.A., Gorlenko, N.P., Debelova, N.N., Sil'man, Yu.Yu. Corrosion-Resistant Compounds Based on Polymer Matrices and Inorganic Additives. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28(3): 241–254. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-3-241-254>. EDN: INPNDZ

Введение

Проблемы, связанные с коррозией металла металлических конструкций в строительстве, транспорте, инфраструктуре, стали одним из основных факторов, вызывающих значительные экономические потери и угрозы безопасности во всем мире [1–3]. Прямые глобальные экономические потери от коррозии оцениваются в триллионы долларов в год [2]. Так, только в США финансовые потери от коррозии металлов обходятся в 276 млрд долл. в год. А общий ущерб от коррозии металлов в промышленно развитых странах составляет от 2 до 4 % валового национального продукта.

Воздействие многочисленных факторов внешней среды, таких как перепады температур, ультрафиолетовое излучение, химическое загрязнение окружающей среды, в частности, хлоридами, сульфатами, оксидами азота, углерода и др., значительно ускоряет разрушение металлических конструкций и изделий. Особенно ощутимые потери наблюдаются в строительной индустрии и на транспорте.

Железобетон является наиболее широко используемым конструкционным материалом в мире, поскольку его механическая прочность и высокая щелочность среды обеспечивают естественную защиту стальной арматуры. Однако, несмотря на эти преимущества, коррозия арматурной стали остается одной из самых серьезных проблем, влияющих на долговечность, срок службы и стоимость жизненного цикла изделия [4–6]. Вызванное коррозией разрушение приводит к образованию трещин, расслоению и преждевременному выходу конструкции из строя, что создает значительные экономические и экологические проблемы, связанные с ремонтом, восстановлением и заменой. Что касается транспорта, то ежегодно коррозии подвергаются миллионы автомобилей. Согласно данным Международной ассоциации по защите металлов, около 60 % автомобилей старше 5 лет демонстрируют признаки ржавчины на кузове или днище. В регионах с влажным климатом или частым использованием антигололедных реагентов этот показатель может достигать 80 % [7].

В настоящее время наиболее широко используются антикоррозионные покрытия на основе полимерных связующих и наполнителей различной природы, в частности, активно применяется эпоксидная смола с высоким содержанием цинка [8–10]. Смесь эффективно обеспечивает первоначальную защиту металла, однако ее подверженность старению, ограниченная устойчивость к атмосферным воздействиям и плохая совместимость с окружающей средой существенно снижают его долговечность.

В последние годы полимеры становятся актуальными многофункциональными материалами для защиты металла от коррозии. Полимеры можно добавлять в виде примесей, покрытий или гибридных модификаторов для повышения водонепроницаемости, улучшения уплотнения микроструктуры и формирования защитных межфазных пленок на поверхности стали. Их способность ингибировать коррозию связана с наличием многочисленных функциональных групп, таких как $-\text{OCH}_3$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{COOH}$, $-\text{O}-$ и др., которые способствуют координации с катионами металлов и образованию стабильных металлополимерных комплексов [11]. По сравнению с низкомолекулярными ингибиторами, полимеры обеспечивают более полное покрытие поверхности и высокую совместимость с поверхностью металла.

На основании вышесказанного можно утверждать, что разработка стратегии защиты от коррозии материалов различной природы является одной из актуальных задач, в частности, в строительной, транспортной и промышленной сферах.

Цель работы заключается в синтезе композиций на основе ряда полимерных матриц и химических добавок неорганической природы и оценке их антикоррозионных свойств.

В качестве связующих матриц были выбраны полимеры, отвечающие наиболее высоким эксплуатационным требованиям к условиям действия агрес-

сивных факторов внешней среды. Отдельные характеристики полимеров приведены в табл. 1.

Таблица 1

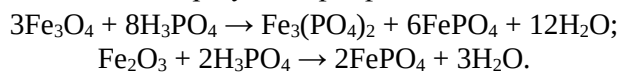
Эксплуатационные характеристики используемых полимеров

Table 1

Operating properties of polymers

Эксплуатационные характеристики полимерных матриц	Поливинилацетат (ПВА)	Алкидная эмаль (АЭ)	Полиуретан (ПУ)
Прочность при разрыве, кг/см ²	300	–	312
Прочность при растяжении, МПа	30–35	10–40	35–55
Водопоглощение, %	3	1–2	1–3
Плотность, г/см ³	1,19	1,1–1,35	5–6
Морозостойкость, количество циклов	35	30	50
Термическая стойкость, °С	–38 °С до +110 °С	–35 °С до +60 °С	–60 °С до +120 °С

Известно, что металл-фосфатные связки широко используются в практике защиты металла от коррозии [12–15]. Это обусловлено их эффективной способностью преобразовывать продукты коррозии на поверхности металла с образованием прочных химических соединений, обладающих высокими адгезионными свойствами [16, 17]. Металл-фосфатные связки синтезировали путем смешивания ортофосфорной кислоты с оксидом хрома(III), оксидом меди(II) или оксидом магния. Ортофосфорная кислота в концентрации 60 %, взятая в небольшом избытке по отношению к эквивалентному количеству оксида, смешивалась с одним из компонентов и для ускорения реакции нагревалась до 80 °С. После 40–60 мин синтеза смесь охлаждалась до комнатной температуры. Небольшой избыток кислоты необходим, во-первых, в целях химического преобразования следов или тонких слоев ржавчины. При взаимодействии продуктов коррозии с ортофосфорной кислотой образуются фосфаты железа



Во-вторых, небольшой избыток кислоты нужен для получения средних солей преимущественно в виде фосфатов металлов, т. к. гидро- и дигидрофосфаты металлов обладают, как правило, повышенной растворимостью в воде по сравнению с фосфатами.

Таким образом, выбор металл-фосфатных связок в качестве добавок обусловлен их повышенной адгезионной способностью к поверхности металлов и способностью в составе полимерных матриц представлять собой комплексное защитное покрытие, которое объединяет в себе функции грунтовочного слоя и финишной обработки защищаемых конструкций и изделий.

Полученные смеси с оксидами меди и хрома представляют собой цветные суспензии синего и зеленого цвета соответственно, а с оксидом магния – бесцветную вязкую жидкость коллоидного типа.

Полученные составы смешивались с полимерными матрицами поливинилацетата, алкидной эмалью и полиуретаном в соотношениях, указанных в табл. 2.

Таблица 2

Составы металл-фосфатных связующих и полимеров

Table 2

Compositions of metal-phosphate binders and polymers

Наименование компонентов	Состав композитов, г		
	№ 1	№ 2	№ 3
Поливинилацетат	1,5	1,5	1,5
Хром-фосфатное связующее (ХФС)	0,5	–	–
Медно-фосфатное связующее (МеФС)	–	0,5	–
Магний-фосфатное связующее (МФС)	–	–	0,5
Алкидная эмаль	1,5	1,5	1,5
Хром-фосфатное связующее (ХФС)	0,5	–	–
Медно-фосфатное связующее (МеФС)	–	0,5	–
Магний-фосфатное связующее (МФС)	–	–	0,5
Полиуретан	1,5	1,5	1,5
Хром-фосфатное связующее (ХФС)	0,5	–	–
Медно-фосфатное связующее (МеФС)	–	0,5	–
Магний-фосфатное связующее (МФС)	–	–	0,5

Методы и результаты

Вязкий состав наносили на поверхность стали марки Ст 09Г2С и после отверждения в естественных условиях изучали физико-химические, адгезионные и антикоррозионные свойства композитов.

Физико-химические свойства композитов исследовали с помощью ИК-спектрометра марки WQF-530A FTIR. Гидрофобные свойства композитов определяли путем нанесения капли воды объемом 0,03 мл на поверхность композита и измерения угла краевого смачивания. Адгезионные свойства изучали методом отрыва по ГОСТ 28574–90¹. Толщину пленки определяли с помощью прибора толщиномера МЕГЕОН 19230. Поверхностное сопротивление композитов измеряли с помощью прибора ЭСО202/2-5.

Первоначально были исследованы гидрофобные и адгезионные свойства синтезированных композитов. Результаты экспериментов приведены на рис. 1 и в табл. 3.

¹ ГОСТ 28574–90. Защита от коррозии в строительстве. Конструкции бетонные и железобетонные. Методы испытаний адгезии защитных покрытий: утвержден Постановлением Государственного строительного комитета СССР от 10.05.1989 № 74: дата введения 1991-01-01. Москва: Стандартинформ. 7 с.

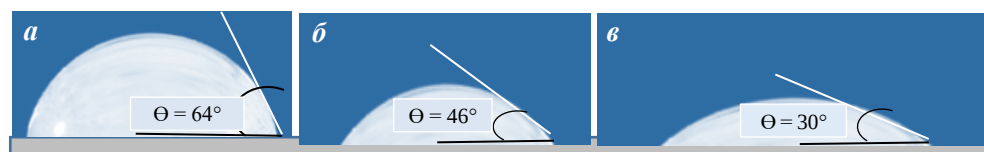


Рис. 1. Формы капель на поверхности композитов на примере составов № 1 с хром-фосфатной связкой и полимерными матрицами:

a – полиуретан; *б* – поливинилацетат; *в* – алкидная эмаль

Fig. 1. Droplet shapes on the surface of composites with chromium-phosphate binder and polymer matrices:

a – polyurethane; *b* – polyvinyl acetate; *c* – alkyd enamel

Рисунок демонстрирует, что наибольшими гидрофобными свойствами обладают составы с углом краевого угла смачивания $\Theta = 64^\circ$ (рис. 1, *a*); наименьшими – композит с $\Theta = 30^\circ$ (рис. 1, *в*). Аналогичные направленности гидрофобных свойств композиций характерны и для фосфатных связок с оксидами меди и магния.

В табл. 3 представлены результаты адгезионной и когезионной прочности покрытия, рассчитанные по значениям краевых углов смачивания и толщины защитных слоев (табл. 4).

Таблица 3

Результаты расчетов параметров адгезии пленки композита различного состава к поверхности стали марки Ст 09Г2С

Table 3

Adhesive parameters of composite films of various compositions to the surface of St 09G2S steel

Параметры	$F_{отр} \cdot 10^{-3}, \text{ Н}$	$W_{адг} \cdot 10^{-3}, \text{ Дж/м}^2$	$W_A \cdot 10^{-2}, \text{ Дж/м}^2$	$W_{кор} \cdot 10^{-2}, \text{ Дж/м}^2$	$f, \text{ Дж/м}^2$
Состав № 1					
Поливинилацетат	$1,91 \pm 0,2$	$9,60 \pm 0,2$	$29,13 \pm 0,2$	$98,75 \pm 0,2$	$-69,62$
Состав № 2					
Поливинилацетат	$1,87 \pm 0,2$	$10,03 \pm 0,2$	$16,92 \pm 0,2$	$61,65 \pm 0,2$	$-44,73$
Состав № 3					
Поливинилацетат	$1,98 \pm 0,2$	$9,90 \pm 0,2$	$23,17 \pm 0,2$	$81,84 \pm 0,2$	$-58,67$
Состав № 4					
Поливинилацетат (исходный)	$1,79 \pm 0,2$	$8,95 \pm 0,2$	$11,99 \pm 0,2$	$44,75 \pm 0,2$	$-32,76$
Состав № 1					
Алкидная эмаль	$1,70 \pm 0,2$	$8,50 \pm 0,2$	$11,39 \pm 0,2$	$42,50 \pm 0,2$	$-31,11$
Состав № 2					
Алкидная эмаль	$1,67 \pm 0,2$	$8,35 \pm 0,2$	$11,82 \pm 0,2$	$41,76 \pm 0,2$	$-29,94$
Состав № 3					
Алкидная эмаль	$1,74 \pm 0,2$	$8,70 \pm 0,2$	$12,20 \pm 0,2$	$43,52 \pm 0,2$	$-31,86$

Окончание табл. 3

End of table 3

Параметры	$F_{отр} \cdot 10^{-3}$, Н	$W_{адг} \cdot 10^{-3}$, Дж/м ²	$W_A \cdot 10^{-2}$, Дж/м ²	$W_{ког} \cdot 10^{-2}$, Дж/м ²	f , Дж/м ²
Состав № 4					
Алкидная эмаль (исходная)	$1,59 \pm 0,2$	$7,91 \pm 0,2$	$10,65 \pm 0,2$	$39,75 \pm 0,2$	$-29,1$
Состав № 1					
Полиуретан	$1,98 \pm 0,2$	$13,38 \pm 0,2$	$55,64 \pm 0,2$	$160,02 \pm 0,2$	$-104,38$
Состав № 2					
Полиуретан	$1,78 \pm 0,2$	$13,43 \pm 0,2$	$54,83 \pm 0,2$	$177,21 \pm 0,2$	$-122,38$
Состав № 3					
Полиуретан	$2,01 \pm 0,2$	$15,08 \pm 0,2$	$42,81 \pm 0,2$	$134,77 \pm 0,2$	$-91,96$
Состав № 4					
Полиуретан (исходный)	$1,95 \pm 0,2$	$12,19 \pm 0,2$	$28,57 \pm 0,2$	$97,54 \pm 0,2$	$-68,97$

Примечание. $F_{отр} = ma$ – сила отрыва; $W_{адг} = F_{отр}h/S$ – адгезионная прочность; $W_A = F_{отр}(1 - \cos)/b$ – работа адгезии; $W_{ког} = 2W_{адг}/(1 + \cos)$ – работа когезии; $f = (W_{адг} - W_{ког})$ – коэффициент растекания капли; h – толщина пленки, м; S – площадь поверхности пленки, м²; b – ширина пленки, м; Θ – угол смачивания, град.

Таблица 4

Краевой угол смачивания (Θ°)
и толщина (l , мкм) защитного слоя композиции

Table 4

Contact angle (Θ°) and thickness (l , μm) of the protective layer

Наименование полимерных матриц	Состав № 1		Состав № 2		Состав № 3	
	Θ°	l	Θ°	l	Θ°	l
Поливинилацетат	46	0,20	35	0,21	40	0,20
Алкидная эмаль	30	0,20	30	0,20	30	0,20
Полиуретан	64	0,27	52	0,30	55	0,30

Как следует из данных табл. 4, внесение металл-фосфатных добавок в полимерную матрицу приводит к повышению адгезии к подложке стали для всех составов композиций в среднем на 2,0–16,2 %, а наибольшей адгезионной прочностью по сравнению с другими полимерными матрицами обладают образцы на основе полиуретана (образец № 3, табл. 2). При этом следует отметить, что после нанесения композиции на поверхность стали со следами коррозии в результате химического взаимодействия со свободной ортофосфорной кислотой

(в небольшом избытке) визуально наблюдается преобразование ржавчины в продукты со свойствами грунтового слоя.

Известно, что чем выше адгезионная прочность защитного слоя к поверхности металла, тем выше антикоррозионные свойства покрытия. На основе анализа экспериментальных данных табл. 4 для оценки скорости коррозии были выбраны следующие составы: для ПВА – состав № 3, для алкидной эмали – состав № 3, для полиуретана – состав № 3 (табл. 2). Повышенная адгезионная прочность магний-фосфатного связующего по сравнению с другими составами, по-видимому, объясняется коллоидной структурой композиции, которая способствует усилению когезионной составляющей, на что указывают и коэффициенты растекания капли (табл. 4).

Коррозионную стойкость изучали на образцах стали (Ст 09Г2С) размерами 3×3 см путем их погружения в 3% раствор поваренной соли по ГОСТ ISO 9223–2017². Три образца одной серии выдерживали в течение 24 ч в солевом растворе, а затем помещали в эксикатор, где создавались стабильные влажные условия. В табл. 5 приведены результаты определения скорости коррозии стали по средним значениям потери массы образцов с защитными покрытиями по сравнению с чистой поверхностью металла на примерах выбранных композиций.

Таблица 5

Определение скорости коррозии для выбранных составов

Table 5

Corrosion rate determined for selected compositions

Композиция	Среднее значение потери массы Δm , г	Среднее значение площади поверхности образцов S , м ²	Скорость коррозии для растворов, г/м ² ·ч
ПВА. Состав № 3	0,0021 ± 0,0002	0,0181	0,0048 ± 0,0003
АЭ. Состав № 3	0,0024 ± 0,0002	0,0181	0,0055 ± 0,0001
ПУ. Состав № 3	0,0017 ± 0,0002	0,0181	0,0039 ± 0,0003
Чистый металл	0,0031 ± 0,0002	0,0181	0,0071 ± 0,0004

Следует отметить, что применение предложенных составов является наиболее эффективным, если на поверхности металла или в дефектных образованиях железобетона будут наблюдаться продукты коррозии, т. к. в присутствии фосфатных связующих реализуется принцип комплексного покрытия, заключающийся в преобразовании ржавчины и формы одновременного нанесения «грунтовка + финишное покрытие».

Защитные свойства полимернаполненных покрытий можно определить суммой физико-химических свойств, которые, в свою очередь, могут быть сведены к следующими основным характеристикам:

² ГОСТ ISO 9223–2017. Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная агрессивность атмосферы. Классификация, определение и оценка: дата введения 2019-07-01. Москва: Стандартинформ, 2018. 23 с.

- способность замедлять диффузию и перенос коррозионных агентов к металлической поверхности;
- адгезионные, изоляционные и механические свойства покрытий;
- способность покрытий, содержащих наполнитель, электрохимически защищать металл.

Как следует из экспериментальных данных, составы на основе полиуретана обладают наиболее эффективными антикоррозионными свойствами по сравнению с поливинилацетатной и алкидной полимерными матрицами. Это косвенно подтверждают и значения поверхностного сопротивления композитов. Для ПВА, АЭ и ПУ они составляют 2,0; 59,0 и 10^4 МОм соответственно. Как известно, при высоком омическом сопротивлении и при контакте защитного покрытия с электролитом коррозия с протеканием по механизму электрохимического процесса является весьма затруднительной.

Как показывают микроскопические снимки сплошного защитного слоя, модифицированного фосфатными связками, поверхность полиуретана с введенными металл-фосфатными связующими выглядит более однородной и с меньшими нарушениями целостности поверхности защитного слоя по сравнению с другими образцами (рис. 2). Формирование выраженного рельефа на поверхности образцов (рис. 2, а, б), по-видимому, связано с механизмом полимеризации пленок.

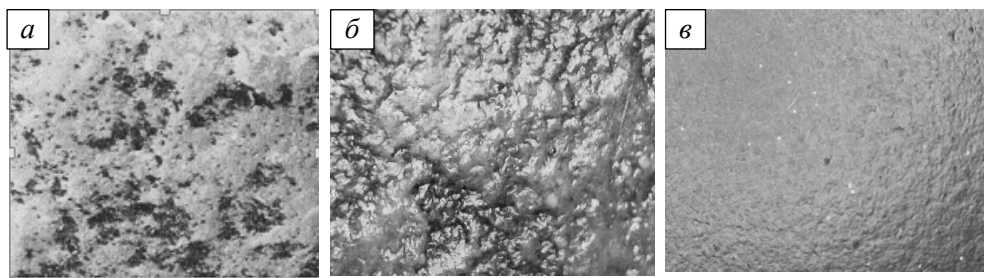


Рис. 2. Фотоизображения поверхности защитных покрытий на примере композитов из полимерных матриц и медь-фосфатных связок:

а – ПВА; б – АЭ; в – ПУ (увеличение $\times 600$)

Fig. 2. SEM images of protective coating surface for polymer matrix composites with copper-phosphate binders:

а – polyvinyl acetate; б – alkyd enamel; в – polyurethane. Magnification: $\times 600$

Кроме того, полиуретан обладает высокой абразивной стойкостью, способен восстанавливать форму после деформации, сохранять эластичность при низких температурах; он устойчив к маслам, бензину, кислотам, растворителям, щелочам и характеризуется одним из наиболее важных свойств – стойкостью к воздействию ультрафиолета.

В дальнейших исследованиях предпринята попытка усиления защитных свойств полиуретанового покрытия за счет введения в полиуретановую матрицу смеси двух- и трехвалентных оксидов железа в следующем соотношении (г): ПУ : FeO : Fe₂O₃ = 1,5:0,3:0,3.

При диффузии электролита или кислорода в объем защитного слоя композита можно выделить два вида развития электрохимической коррозии.

1. Оба оксида могут образовывать гальваническую пару и выступать в качестве катода или анода с протеканием следующих реакций:

– *катодные реакции*: $\text{Fe}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Fe}^0$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3e \rightarrow 2\text{Fe}^0 + 3\text{O}_2$; $\text{Fe}^{3+} + e \rightarrow \text{Fe}^{2+}$; $\text{Fe}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Fe}^0$; $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e \rightarrow 4\text{OH}^-$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} + 6e \rightarrow 2\text{Fe}^0 + 6\text{OH}^-$ ($\text{pH} > 7$);

– *анодные реакции*: $\text{Fe}^{2+} - e \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ с образованием $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; $\text{FeO} - e \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{O}^{2-}$; $2\text{H}_2\text{O} - 4e \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 4\text{H}^+$.

Направление наиболее вероятного процесса электрохимической реакции можно определить по значению стандартного потенциала (табл. 6). Как известно, положительный потенциал означает, что элемент является окислителем, а отрицательный – восстановителем, и реакция будет направлена в сторону более положительного или большего значения потенциала.

Таблица 6

Значения стандартных потенциалов для наиболее вероятных реакций окисления-восстановления процессов с участием железа

Table 6

Standard electrode potentials for the most likely redox reactions involving iron

Окислительно-восстановительные реакции	Стандартное значение потенциала, В
$\text{Fe}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Fe}^0$	–0,440
$\text{Fe}^{3+} + 3e \rightarrow \text{Fe}^0$	–0,037
$\text{Fe}^{3+} + e \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,771
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{H}^+ + 6e \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	–0,051
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ + 2e \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_2$	–0,057
$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + 3e$	+0,059
$\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{H}^+ + e \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$	+0,271
$\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2e \rightarrow \text{Fe}^0 + 2\text{OH}^-$	–0,877
$\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{Fe}^0 + 2\text{H}_2\text{O}$	–0,047

2. При непосредственном контакте оксидов железа с защищаемым металлом FeO может участвовать в процессах восстановления, а Fe_2O_3 – в процессах окисления. Безусловно, как в случае образования гальванической пары, так и в случае контакта оксидов с металлом введенные в полимерную матрицу оксиды железа будут выступать в качестве антикоррозионных защитных компонентов.

Поскольку диффузионные процессы переноса ионов и кислорода в полимерных матрицах к поверхности защищаемого металла при отсутствии нарушения сплошного покрытия маловероятны, коррозия исходного металла замедляется или может прекратиться совсем, т. к. процессы окисления-восстановления будут протекать в объеме защитной пленки. В частности, для исследуемого состава с применением полиуретановой матрицы и смеси оксидов железа экспериментально выявлено, что скорость коррозии в водном растворе хлорида натрия уменьшается в 1,8 раза по сравнению с чистым металлом (см. табл. 5).

Анализ и обоснование полученных экспериментальных данных полезно провести с помощью диаграммы Пурбе, которая наглядно отображает термодинамически устойчивые формы существования различных элементов и фазо-

вых образований в водных растворах при различных значениях водородного показателя (pH) и окислительно-восстановительного потенциала (E) (рис. 3).

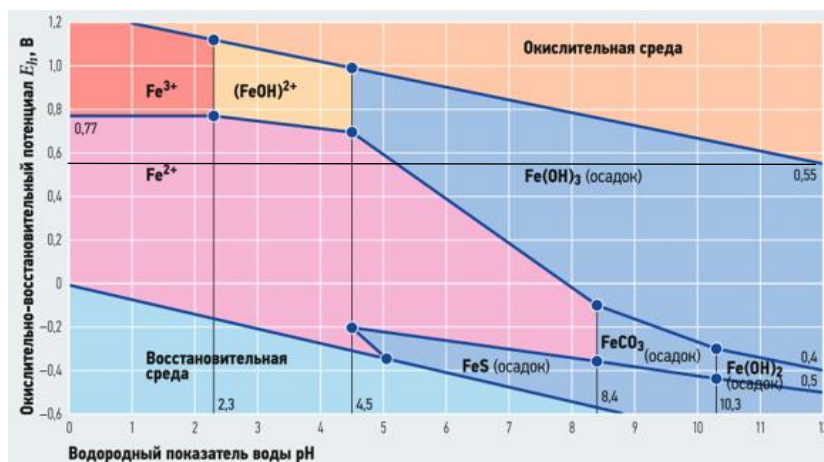


Рис. 3. Диаграмма Пурбе для железа

Fig. 3. Pourbaix diagram for iron

Измеренные показатели окислительно-восстановительного потенциала и кислотности среды для водного раствора хлорида натрия, применяемого при определении скорости коррозии, имеют значения: $E = 0,57$ В (на рис. 3 отмечено линией, проведенной параллельно оси абсцисс) и $pH = 7,0$ соответственно. При таких показателях наиболее термодинамически устойчивым образованием является фаза гидроксида железа (III), что отвечает пассивному состоянию системы в целом. Кроме того, гидроксид железа (III) имеет очень низкий показатель произведения растворимости ($PP = 6,3 \cdot 10^{-38}$). Практически нерастворимый в воде осадок способен коагулировать каналы диффузии агрессивных ионов в объеме защитного покрытия и ограничивать их доступ к защищаемой поверхности металла. Фаза $Fe(OH)_3$ устойчива до $pH \approx 5,2$. При снижении кислотности среды ниже этого значения стабильность проявляют ионы Fe^{2+} , что отвечает началу развития процессов коррозии. При значениях $pH > 12$ система попадает в область окислительной среды.

Заключение

Проведена сравнительная оценка антикоррозионных составов на основе полимерных матриц поливинилацетата, алкидного лака, полиуретана и металл-фосфатных связок для антикоррозионной защиты поверхности стали и железобетонных изделий.

Исследованы адгезионные и антикоррозионные свойства композитов. Показано, что предложенные композиты могут применяться в качестве комплексного защитного покрытия, которое объединяет в себе преобразование продуктов коррозии, грунтовку и финишную обработку защищаемых поверхностей.

Предложен антикоррозионный состав на основе полиуретана и смеси оксидов железа (II) и железа (III). Выявлена эффективность защиты стали от

агрессивного действия хлорид-ионов. Проведен анализ коррозионных процессов с использованием диаграммы Пурбе и обоснована эффективность предлагаемого защитного покрытия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wenwen, Xiao, Haoping, Peng, Pengfei, Yu, Xinyan, Cai, Zhaolin, Luan, Song, Deng, Shuhao, Wang. An integrated epoxy rust conversion coating: Its anticorrosion properties and rust conversion mechanism // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. V. 853. № 5. Art. 157005. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157005> Get rights and content
2. Xiong, Y.M., Zhan, Q.W., Zhang, X., Fu, C.H., Pan, Z.H.H. Study on improving the corrosion resistance of potassium magnesium phosphate cement coatings in marine environments through the synergistic effects of crack sealing and ion exchange exchange // *Journal of Building Engineering*. 2025. V. 116. Art. 114483. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114483>
3. Xiaoxian, Wang, Jiaping, Liu, Ming, Jin, Yu, Yan, Jinhui, Tang, Zuquan, Jin. A review of organic corrosion inhibitors for resistance under chloride attacks in reinforced concrete: Background, Mechanisms and Evaluation methods // *Construction and Building Materials*. 2024. V. 433. Art. 136583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136583>
4. Shehnazdeep, B.P. A study on effectiveness of inorganic and organic corrosion inhibitors on rebar corrosion in concrete: A review // *Materials Today: Proceedings*. 2022. V. 65. P. 1360–1366. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.29>
5. Alexander, M., Beushausen, H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique // *Cement and Concrete Research*. 2019. V. 122. P. 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>
6. Damme, H.V. Concrete material science: Past, present, and future innovations // *Cement and Concrete Research*. 2018. V. 112. P. 5–24. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.002>
7. *Коррозия в цифрах: статистика, которую стоит знать* // Официальный представитель шведского концерна AUSON в России : [сайт]. URL: <https://www.mercasol.ru/statyi/korrozija-v-cifrax-statistika-kotoruyu-stoit-znat.html?ysclid=mo0x70g9rr883079232> (дата обращения: 21.03.2026).
8. Miao, Yuan, Lulu, Zhao, Tiantian, Ping, Cuiyan, Fu, Xuteng, Xing, Xiaomeng, Chu, Shaojie, Liu, Erjun, Tang. Fabrication of cyclodextrin modified graphene oxide nanocontainers loading zinc ion and its application in water-based epoxy resin coatings // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025. V. 726. Art. 137679. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.137679>
9. Castillo, A., Paulis, M., González, E. Direct-to-metal binders for waterborne anticorrosive steel coatings: Epoxy/styrene-acrylic blends and hybrids // *Reactive and Functional Polymers*. 2025. V. 215. Article 106378. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106378>
10. Chaogang, Zhou, Qiya, Chen, Jingjing, Zhao, Shuhuan, Wang, Jinyue, Li, Liqun, Ai, Tingzhen, Li, Chuanbo. Superhydrophobic epoxy resin coating with composite nanostructures for metal protection // *Materials Today Communications*. 2024. V. 38. Art. 107803. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107803>
11. Ayaz, M., Sebit, G., Suleiman, A., et al. Polymer and eco-friendly inhibitors for corrosion protection of reinforced concrete: A comprehensive review // *Journal of Building Engineering*. 2026. V. 119. № 1. Art. 115119. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.115119>
12. Судакас, Л.Г. Фосфатные вяжущие системы. Санкт-Петербург : Квинтет. 2008. 260 с.
13. Герасимов, А.А. Фосфатирование и оксидирование сталей, цинковых покрытий и сплавов // *Коррозия: материалы, защита*. 2008. № 11. С. 42–44.
14. Щегров, Л.Н. Фосфаты двухвалентных металлов. Киев : Наукова думка, 1987. 216 с.
15. Апанасевич, Н.С., Лапко, К.Н., Кудлаш, А.Н., Сокол, А.А., Клявлин, Ю.Д., Вишневский, К.В. Получение и исследование термостойких композитов на основе твердых магний-фосфатных и кальций-фосфатных связующих // *Журнал Белорусского государственного университета. Химия*. 2021. № 2. С. 50–61. <https://doi.org/10.33581/2520-257X-2021-2-50-61>
16. Голынки-Вольфсон, С.Л., Сычёв, М.М., Судакас, Л.Г., Скобло, Л.И. Материалы на основе металлофосфатов. Москва : Химия, 1976. 200 с.

17. Копейкин, В.А., Петрова, А.П., Рашкован, И.Л. Пак, Ч.Г., Батрашов, В.М. Возможность регулирования структуры и свойств фосфатных композиционных материалов // Перспективы развития строительного материаловедения: энерго- и ресурсосбережение в строительстве : материалы Всероссийской научно-технической конференции. Челябинск, 2011. С. 54–56.

REFERENCES

1. Xiao, W., Peng, H., Yu, P., Cai, X., Luan, Z., Deng, S., Wang, S. An Integrated Epoxy Rust Conversion Coating: Its Anticorrosion Properties and Rust Conversion Mechanism. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021; 853(5): 157005. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157005
2. Xiong, Y.M., Zhan, Q.W., Zhang, X.C.H., Pan, Z.H.H. Study on Improving the Corrosion Resistance of Potassium Magnesium Phosphate Cement Coatings in Marine Environments through the Synergistic Effects of Crack Sealing and Ion Exchange. *Journal of Building Engineering*. 2025; 116: 114483. DOI: 10.1016/j.job.2025.114483
3. Wang, X., Liu, J., Jin, M., Yan, Y., Tang, J., Jin, Z. A Review of Organic Corrosion Inhibitors for Resistance under Chloride Attacks in Reinforced Concrete: Background, Mechanisms and Evaluation Methods. *Construction and Building Materials*. 2024; 433: 136583. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136583
4. Shehnazdeep, Pradhan, B. A Study on Effectiveness of Inorganic and Organic Corrosion Inhibitors on Rebar Corrosion in Concrete: A Review. Pt. 2. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 65: 1360–1366. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.29
5. Alexander, M., Beushausen, H. Durability, Service Life Prediction, and Modeling for Reinforced Concrete Structures – Review and Critique. *Cement and Concrete Research*. 2019; 122: 17–29. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.04.018
6. Van Damme, H. Concrete Material Science: Past, Present, and Future Innovations. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112: 5–24. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.002
7. Car corrosion in numbers. Available: www.mercasol.ru/statyi/korroziya-v-cifrax-statistika-kotoruyu-stoit-znat.html (accessed March 21, 2026). (In Russian).
8. Yuan, M., Zhao, L.L., Ping, T.T., Fu, C.Y., Xing, X.T., Chu, X.M., Liu, S.J., Tang, E.J. Fabrication of Cyclodextrin Modified Graphene Oxide Nanocontainers Loading Zinc Ion and its Application in water-Based Epoxy Resin Coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025; 726: 137679. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.137679
9. del Castillo, A., Paulis, M., González, E. Direct-to-Metal Binders for Waterborne Anticorrosive Steel Coatings: Epoxy/styrene-acrylic Blends and Hybrids. *Reactive and Functional Polymers*. 2025; 215: 106378. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106378
10. Zhou, C., Chen, Q., Zhao, J., Wang, S., Li, J., Ai, L., Li, T., Bo, C. Superhydrophobic Epoxy Resin Coating with Composite Nanostructures for Metal Protection. *Materials Today Communications*. 2024; 38: 107803. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107803
11. Ayaz, M., Sebit, G., Suleiman, A., Altaf, M., Zafar, A., Cheng, X., Feng, Y. Polymer and Eco-Friendly Inhibitors for Corrosion Protection of Reinforced Concrete: A Comprehensive Review. *Journal of Building Engineering*. 2026; 119: 115119. DOI: 10.1016/j.job.2025.115119
12. Sudakas, L.G. Phosphate Binding Systems. St. Petersburg: Kvintet, 2008. 260 p. (In Russian)
13. Gerasimov, A.A. Phosphating and Oxidation of Steels, Zinc Coatings and Alloys. *Corrosion: Materials, Protection*. 2008; (11): 42–44. (In Russian)
14. Shchegrov, L.N. Phosphates of Divalent Metals. Kiev: Naukova Dumka, 1987. 216 p. (In Russian)
15. Apanasevich, N.S., Lapko, K.N., Kudlash, A.N., Sokol, A.A., Klyavlin, Y.D., Vishnevsky, K.V. Synthesis and Investigation of Heat-resistant Composites Based on Solid Magnesium-phosphate and Calcium-phosphate Binders. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya*. 2021; 2: 50–61. DOI: 10.33581/2520-257X-2021-2-50-61 (In Russian)
16. Golyenko-Vol'fon, S.L., Sychev, M.M., Sudakas, L.G., Skoblo, L.I. Materials Based on Metal Phosphates. Moscow: Khimiya, 1976. 200 p. (In Russian)
17. Kopeikin, V.A., Petrova, A.P., Rashkovan, I.L., Pak, Ch.G., Batrashov, V.M. Structure and Property Control of Phosphate Composite Materials. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Development Prospects of Materials Science in Construction: Energy and Resource Saving in Construction'*. Chelyabinsk, 2011. Pp. 54–56. (In Russian)

Сведения об авторах

Дебелов Владислав Александрович, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, Prosto_VladislavD@mail.ru

Власов Юрий Алексеевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, yury2006@yandex.ru

Горленко Николай Петрович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, goglen@mail.ru

Дебелова Наталья Николаевна, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, mackevichn72@mail.ru

Сильман Юлия Юрьевна, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, silman.julia@mail.ru

Authors Details

Vladislav A. Debelov, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, Prosto_VladislavD@mail.ru

Yury A. Vlasov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, yury2006@yandex.ru

Nikolay P. Gorlenko, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, gorlen@mail.ru

Nataliya N. Debelova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mackevichn72@mail.ru

Yulia Yu. Sil'man, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, silman.julia@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.