УДК 620.193.27+621.793.72

О.Ю. Елагина[1]*, e-mail: elaguina@mail.ru;* ***А.В. Бурякин***[1]*, e-mail: albur55@yandex.ru;* ***В.В. Жук***[2]*, e-mail: vv.zhu11@gmail.com*

[1] РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (Москва, Россия).
[2] ООО «КВАРЦ Групп» (Москва, Россия).

Особенности применения протекторных металлизационных покрытий для коррозионной защиты металлоконструкций, работающих в морской среде

В статье приведены данные стандартов и других нормативных документов по применимости и коррозионной стойкости металлизационных и металлизационно-лакокрасочных покрытий для защиты металлоконструкций, эксплуатируемых в морской воде. Показано, что наибольшей эффективностью антикоррозионной защиты обладают комбинированные металлизационно-лакокрасочные покрытия.
Нанесение поверх металлического слоя химически стойких полимерных покрытий позволяет получать защитные системы, стойкие в средах с повышенным содержанием агрессивных веществ. Металлический слой играет роль протекторной защиты металла подложки, а полимерное покрытие способствует повышению плотности покрытия. Металлический слой в комбинированном покрытии вследствие пористости и шероховатости обеспечивает максимальную адгезию лакокрасочных материалов (так называемая пропитка), значительно повышая тем самым их долговечность.
Согласно ГОСТ 9.304-87, РД ГМ-01-02 и другим нормативным документам долговечность антикоррозионной защиты в морской среде достигает 30 и более лет. Для этого рекомендуется применять покрытия цинка и алюминия, наносимые электродуговым или газопламенным способом в сочетании с лакокрасочными покрытиями.
Однако в указанных нормативных документах не уточняется состав материала покрытия, предпочтительный для работы в морской воде.
Для проверки адекватности предлагаемых толщин покрытий и выявления специфики формирования оксидного слоя в настоящей работе были исследованы покрытия, полученные путем электродугового напыления проволок из Zn и Al, а также из сплавов Zn-Al (15 %), Al-Mn (2 %) и Al-Mg (5 %).
Приведены результаты лабораторных коррозионных испытаний покрытий цинка, алюминия и некоторых его сплавов, а также сплава Zn-Al, полученных электродуговым напылением. В ходе исследований образцы, покрытые металлизационным защитным слоем, подвергали выдержке с полным погружением в 3%-й водный раствор NaCl в течение 720 часов. После выдержки определяли массовую скорость коррозии. С учетом плотности металла защитного слоя рассчитали линейную скорость коррозии, являющуюся критерием эффективности антикоррозионной защиты. Анализ полученных результатов показал, что наилучшую коррозионную стойкость показало покрытие из технически чистого алюминия, наихудшую – сплав Zn-Al. Следует отметить, что с учетом полученной линейной скорости коррозии применение только металлизированного защитного слоя не обеспечивает указанный в нормативных документах срок службы. Это определяет важную роль полимерной составляющей в обеспечении стойкости защитных покрытий в морской воде.

Ключевые слова: коррозия, газотермические покрытия, морская вода.

O.Yu. Yelagina[1]*, e-mail: elaguina@mail.ru;* ***A.V. Buryakin***[1]*, e-mail: albur55@yandex.ru;* ***V.V. Zhuk***[2]*, e-mail: vv.zhu11@gmail.com*

[1] Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russia).
[2] QUARTS Group LLC (Moscow, Russia).

The Features Of Using Metallized Protective Coatings For Corrosion Protection Of Steel Structures Operating In Marine Environment

The article describes the data of standards and other regulatory documents concerning applicability and corrosion resistance of metallized coatings and metallized lacquer-and-paint coatings for protection of steel structures operated in seawater. The most efficient corrosion protection is demonstrated by combined metallized and lacquer-and-paint coatings.

Applying chemical-resistant polymeric coatings on metal layer allows for obtaining the protective systems resistant in the environments with increased content of aggressive substances. Metal layer acts as the protection of the base metal and polymeric coating contributes to increased coating density.
In combined coating metal layer ensures maximum adhesion of lacquer-and-paint materials due to porosity and roughness (the so-called impregnation), thus considerably increasing their service life.
Pursuant to GOST 9.304-87, RD GM-01-02 and other regulatory documents service life of corrosion protection in marine environment reaches 30 and more years. For this purpose zinc and aluminum coatings applied with electric arc or gas-fired methods in combination with lacquer-and-paint coatings are recommended.
However the foregoing regulatory documents do not specify the composition of the coating material that is preferred for marine operations.
To check adequacy of the proposed coating thickness and identify the specific features of oxide layer formation, this paper contains the study of coatings obtained by electric-arc spraying of wires from Zn and Al, as well as from the following alloys: Zn-Al (15 %), Al-Mn (2 %) and Al-Mg (5 %).
The results of laboratory corrosion tests of zinc, aluminum coatings and coatings from some aluminum alloys, as well as Zn-Al alloy obtained by electric-arc spraying are shown. During the studies the samples covered with metallized protective layer were allowed to mature with complete immersion in 3% NaCl water solution during 720 hours. After maturing mass corrosion rate was determined. Taking into account the density of the protective layer metal, line corrosion rate was calculated, which is the criterion of corrosion protection efficiency.
The analysis of the results demonstrated that the best corrosion resistance was exhibited by the coating made of commercially pure aluminum and the worst one - by Zn-Al alloy. It should be noted that, taking into account the obtained line corrosion rate, using metallized protective layer only does not ensure the service life specified in the regulatory documents. This determines an important role of polymer component in ensuring stability of protective coatings in seawater.

Keywords: corrosion, gas-thermal coatings, seawater.

Коррозионные повреждения металлических изделий, работающих в морских условиях, являются одной из основных причин выхода оборудования из строя. Процессы коррозионного повреждения зачастую могут привести к аварийным ситуациям, влекущим большие материальные затраты.

Одним из способов защиты металлоконструкций от коррозии является нанесение покрытий, препятствующих непосредственному контакту среды с поверхностью металлоконструкций. Этим целям служит широкая гамма лакокрасочных покрытий. За последние 20 лет на российском рынке появилось множество современных отечественных и зарубежных защитных композиций, которые могут обеспечить надежную коррозионную защиту металлоконструкций и имеют низкую скорость коррозии, не превышающую 0,05 мм/год. Однако основной проблемой применения лакокрасочных покрытий остается их ограниченная долговечность, связанная с отслаиванием и разрушением, особенно при наличии внешних механических воздействий.

Наряду с лакокрасочными композициями все больший интерес вызывают покрытия на основе протекторных металлов, наносимых на поверхности стальных конструкций методами газотермического напыления и металлизации. Формирование покрытия при этом осуществляется путем нанесения на подготовленную поверхность распыленного металла. Наиболее распространены покрытия цинка, алюминия и их сплавов, в меньшей степени нашли применение покрытия из коррозионностойких сталей. По сравнению с лакокрасочными и полимерными покрытиями металлизационные покрытия в химически активной среде имеют многократно более высокую (до 10 раз) коррозионную долговечность. Высокие анодные свойства металлизационных покрытий обеспечивают «самозалечивание» трещин и небольших (до 2–3 мм) дефектов покрытий.

Еще большей эффективностью антикоррозионной защиты обладают комбинированные металлизационно-лакокрасочные покрытия. Металлический слой в комбинированном покрытии вследствие пористости и шероховатости обеспечивает максимальную адгезию лакокрасочных материалов (так называемая пропитка), значительно повышая тем самым их долговечность. Лакокрасочные материалы (ЛКМ) наносят непосредственно на металлизационный слой без дополнительной подготовки поверхности. Нанесение поверх металлического слоя химически стойких полимерных покрытий позволяет получать защитные системы, стойкие в средах с повышенным содержанием агрессивных веществ.

В настоящее время актуальной задачей является создание долговременной антикоррозионной защиты металлоконструкций топливно-энергетического комплекса, эксплуатирующихся в морской воде, в том числе и в условиях

Ссылка для цитирования (for citation):
Елагина О.Ю., Бурякин А.В., Жук В.В. Особенности применения протекторных металлизационных покрытий для коррозионной защиты металлоконструкций, работающих в морской среде // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 11. С. 70–75.
Yelagina O.Yu., Buryakin A.V., Zhuk V.V. The Features Of Using Metallized Protective Coatings For Corrosion Protection Of Steel Structures Operating In Marine Environment (In Russ.). Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory, 2016, No. 11, P. 70–75.

Таблица 1. Долговечность антикоррозионной защиты металлизационных покрытий, эксплуатирующихся в морской воде
Table 1. Service life of corrosion protection of metallized coatings operated in seawater

Рабочая среда Working environment	Вид покрытия Coating type	Толщина покрытия, мкм, при сроке защиты, лет Coating thickness, μm, at protection term, years		
		10	30	50
Морская вода Seawater	Алюминий Aluminum	160**	200**	250**
	Алюминий* Aluminum*	120**	160**	200**
	Сплав «цинк – алюминий» (цинк 85 % вес.) Zinc-aluminum alloy (zinc 85% weight)	120**	160**	200**

** При электродуговом напылении.*

*** При дополнительной защите двумя и более слоями лакокрасочного покрытия.*

** With electric-arc spraying.*

*** With additional protection with two and more layers of lacquer-and-pant coating.*

Таблица 2. Рекомендуемые толщины металлизационных покрытий при работе в морской воде
Table 2. Recommended thickness of metallized coatings during operation in marine environment

Рабочая среда Working environment	Рекомендуемая толщина металлизационного покрытия, мкм* Recommended thickness of metallized coating, μm*			
	Алюминий Aluminum	Алюминий с окрашиванием Painted aluminum	Цинк Zinc	Цинк с окрашиванием Painted zinc
Морская вода Seawater	250–300	200–250	200–250	120–180

** Суммарная массовая концентрация сульфатов и хлоридов, содержащихся в морской воде, составляет 20–50 г/л. Назначение алюминиевого покрытия – для pH 4–8.*

** Total mass concentration of sulfates and chlorides contained in seawater is 20-50 g/l. Purpose of aluminum coating for pH 4-8.*

Крайнего Севера. Спецификой применения защитных покрытий в таких условиях является наличие наряду с коррозионным фактором активного механического воздействия при трении о движущиеся ледовые массы.

Анализ действующей нормативно-технической документации показывает, что применение протекторных покрытий для антикоррозионной защиты от воздействия морской воды рекомендуют многие нормативные документы. Согласно ГОСТ 9.304-87 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля» в зависимости от толщины покрытия цинка или алюминия и наличия лакокрасочного покрытия срок защиты составляет 10–50 лет (табл. 1).

По ГОСТ 28302-89 «Покрытия газотермические защитные из цинка и алюминия металлических конструкций. Общие требования к типовому технологическому процессу» покрытия цинка и алюминия также рекомендованы для антикоррозионной защиты углеродистых и низколегированных сталей от воздействия морской воды (табл. 2).

СНиП 2.03.11-85 «Строительные нормы и правила. Защита строительных конструкций от коррозии» указывают, что при контакте с морской водой как среднеагрессивной средой с температурой 0–50 °С и скоростью движения до 1 м/с могут быть рекомендованы газотермические покрытия, полученные напылением цинка или алюминия толщиной 120–180 мкм с последующим окрашиванием ЛКМ II–IV групп. Для указанных случаев это эпоксидные, полистирольные, кремнийорганические, перхлорвиниловые ЛКМ.

Для конструкций морских сооружений в зоне периодического смачивания и на 1,5–2,0 м ниже уровня моря, когда морская вода является сильноагрессивной средой, рекомендуется газотермическое напыление цинка или алюминия (t = 200–250 мкм) с последующим окрашиванием ЛКМ IV группы (ЛКМ – перхлорвиниловые и на сополимерах винилхлорида, а также эпоксидные).

ОСТ 26-1102-74 «Нанесение антикоррозионных покрытий из цинка и алюминия газотермическим напылением. Типовой технологический процесс» для защиты от коррозии корпусов судов, портовых сооружений и т. п., эксплуатирующихся в морской воде, рекомендует применение алюминиевого покрытия толщиной 200–250 мкм. Срок службы должен составить не менее 15 лет.

Руководство по долговременной защите строительных стальных конструкций металлизационными и металлизационно-лакокрасочными покрытиями ЦНИИпроектстальконструкции для защиты от коррозии в морской воде рекомендует нанесение алюминиевого металлизационного покрытия толщиной 200 мкм с последующим нанесением двух слоев грунта-шпатлевки ЭП-00-10 или трех слоев лака этиноль. Ориентировочный срок службы – не менее 15 лет.

Инструкция по применению комбинированных металлизационно-лакокрасочных покрытий для защиты стали от коррозии в атмосфере и естественных водных средах, утвержденная НИИТЛП ВНИИАвтогенмаш (Москва, 1986), рекомендует применять цинковые покрытия для защиты от коррозии в морской воде при температуре не свыше 50 °С. Цинковые покрытия в морской воде, эксплуатирующиеся в теплых морях, не подвергаются обрастанию. Рекомендуемая толщина цинкового покрытия составляет 20–250 мкм.

Таблица 3. Состав композиций для работы в морской воде
Table 3. Compositions for operation in seawater

Условия эксплуатации Operating conditions	Металлизационное покрытие Metallized coating		Лакокрасочное покрытие Lacquer-and-paint coating			
	Металл Metal	Толщина, мм Thickness, mm	Пропитка Impregnation		Покрывной слой Covering layer	
			Материал Material	Число слоев Number of layers	Материал Material	Число слоев Number of layers
Морская вода Seawater	Цинк Zinc	0,15–0,25	Этиноль Ethynol	3	–	–
		0,15–0,25	ЭКЖС-40	1	ЭКЖС-40	2
		0,15–0,25	ЭП-00-10	1	ЭП-00-10	2

Таблица 4. Долговечность цинковых, алюминиевых и комбинированных покрытий
Table 4. Service life of zinc, aluminum and combined coatings

Коррозионная среда Corrosion environment	Долговечность покрытия (годы) при толщине покрытия, мкм Service life of coating (years), at coating thickness, μm					
	Цинк Zinc			Алюминий Aluminum		
	100	200	300	100	200	300
Неагрессивная атмосфера Non-aggressive atmosphere	25	50	75	30	Более 50 More than 50	
Агрессивная атмосфера Aggressive atmosphere	10–12	12–15	до 15 up to 15	15	25	50
Речная вода (постоянно) River water (permanently)	5–6	6–8	до 10 up to 10	6–8	12–15	20–25
Морская вода (постоянно) Seawater (permanently)	Более 15 лет в сочетании с ЛКП More than 15 years in combination with LPC			Более 30 лет в сочетании с ЛКП More than 30 years in combination with LPC		
Переменное смачивание Cyclic wetting	До 15 лет в сочетании с ЛКП Up to 15 years in combination with LPC			До 30 лет в сочетании с ЛКП Up to 30 years in combination with LPC		
При комбинации цинка (100 мкм) и алюминия (250 мкм) долговечность защиты увеличивается в среднем в 1,5 раза In combination of zinc (100 μm) and aluminum (250 μm) service life of protection increases 1.5 times on the average						

Системы металлизационно-лакокрасочных покрытий, рекомендуемые для морской воды, представлены в табл. 3. В РД ГМ-01-02 «Руководящий документ по защите от коррозии механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений» (Москва, 2002) также рекомендуются комбинированные покрытия (табл. 4).

Представленный анализ нормативно-технической документации свидетельствует о том, что нанесение покрытия цинка или алюминия создает надежную и долговременную антикоррозионную защиту металлоконструкций, эксплуатирующихся в морской воде.

Однако в указанных нормативных документах не уточняют состав материала покрытия, предпочтительного для работы в морской воде.

Для проверки адекватности предлагаемых толщин покрытий и выявления специфики формирования оксидного слоя в настоящей работе были исследованы покрытия, полученные путем электродугового напыления проволок из Zn (99,995 %) и Al (99,99 %), а также из сплавов Zn-Al (15 %), Al-Mn (2 %) и Al-Mg (5 %).

Металлизационные покрытия наносили на образцы из стали 30 размером 25 х 50 х 2,5 мм со всех сторон. Подготовка образцов, нанесение покрытия и контроль его свойств соответствовали ГОСТ 28302-89.

В процессе исследований образцы, покрытые металлизационным защитным слоем, подвергали выдержке с полным погружением в 3%-м водном растворе NaCl в течение 720 часов. После проведения испытаний образцы промывали в дистиллированной воде для удаления растворимых осадков, сушили при температурах от 50 до 100 °С, а затем взвешивали для определения изменения массы образцов.

Коррозионная стойкость протекторных покрытий на основе цинка и алюминия в первую очередь связана со способностью образовывать защитные слои, состоящие из плотных и хорошо сцепленных с поверхностью оксидов и гидроксидов. В результате формирования защитных слоев, покрывающих всю поверхность металла, значительно уменьшается скорость протекания коррозионных процессов.

Защитные покрытия, полученные методом электродуговой металлизации, характеризуются наличием пористости. Для оценки наличия подповерхностной коррозии, развивающейся на ли-

Таблица 5. Результаты коррозионных испытаний защитных покрытий
Table 5. Results of protective coating corrosion tests

№ обр. Sample No.	Изменение массы образца, г Change in the sample mass, g				
	Zn (99,995 %)	Al (99,99 %)	Al-Mn (2 %)	Al-Mg (5 %)	Al-Zn (15 %)
1	0,146	0,072	0,065	0,138	0,157*
2	0,1	0,071	0,122	0,122	0,740
3	0,04*	0,067	0,102	0,127	0,611
Среднее Average	0,123	0,070	0,096	0,129	0,675

** Значение исключено как выпадающее и не учитывается при расчете средней величины показателей коррозии.*
** The value is excluded as an outlier and is not included in calculating the average value of corrosion indicators.*

Таблица 6. Обработка результатов исследований
Table 6. Study results processing

Состав проволоки Wire composition	Zn (99,995 %)	Al (99,99 %)	Al-Mn (2 %)	Al-Mg (5 %)	Zn-Al (15 %)
Состав оксидного слоя Oxide layer composition	ZnO	$Al(OH)_3$	$Al(OH)_3$	$Al(OH)_3$	$ZnAl_2O_4$
Доля кислорода и водорода в оксиде Share of oxygen and hydrogen in oxide	0,19	0,65	0,65	0,65	0,35
Изменение массы образца, г Change in the sample mass, g	0,123	0,07	0,096	0,129	0,675
Масса металла в оксиде, г Mass of metal in oxide, g	0,515	0,037	0,051	0,068	1,259
Массовая скорость коррозии, г/(мм²·ч) Corrosion mass rate, g/(mm²·h)	2,4E-07	1,7E-08	2,4E-08	3,2E-08	5,9E-07
Линейная скорость коррозии, мм/год Corrosion line rate, mm/year	0,297	0,057	0,078	0,104	0,800

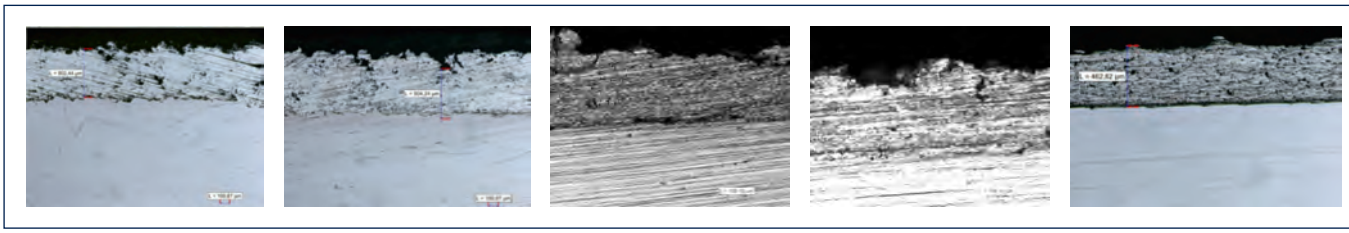
нии сцепления стальной поверхности с защитным покрытием, из испытанных образцов были изготовлены поперечные шлифы. На рисунке представлены фотографии металлизационных покрытий различного состава в поперечном сечении.

Анализ представленных фотографий показывает отсутствие видимых коррозионных разрушений защитного слоя в области сцепления с основным металлом. Несмотря на наличие пористости, протекание коррозионных процессов, по-видимому, сконцентрировано на наружной поверхности исследованных образцов.

Результаты замера веса исследованных образцов после коррозионных испытаний показали увеличение их массы в процессе выдержки (табл. 5). Увеличение массы образцов связано с формированием оксидного слоя на их поверхности. Его образование затрудняет определение фактических значений скорости коррозии, так как осуществить удаление продуктов окисления без повреждения неокисленного слоя не представляется возможным.

Металлизационные покрытия характеризуются определенной степенью пористости, и формирование оксидов происходит как по поверхности, так и внутри пор. Таким образом, определение скорости коррозии защитных покрытий на основе протекторных металлов требует применения расчетных методов оценки количества металла, перешедшего в оксид в процессе выдержки в коррозионной среде и обеспечившего прирост массы образцов.

Для оценки этих показателей необходимо определить характер и состав формирующихся оксидов в зависимости



а) a) б) b) в) c) г) d) д) e)

Фотографии с 200-кратным увеличением поперечных шлифов защитных покрытий после коррозионных испытаний:
а – Zn (99,995 %); б – Al (99,99 %); в – Al-Mn (2 %); г – Al-Mg (5 %); д – Al-Zn (15 %)
200-zoom pictures of protective coating cross-section after corrosion tests:
a – Zn (99.995 %); b – Al (99,99 %); c – Al-Mn (2 %); d – Al-Mg (5 %); e – Al-Zn (15 %)

от механизма процесса окисления, реализующегося на покрытии заданного состава.

Коррозия цинка в нейтральных растворах солей и в воде происходит с образованием $ZnCl_2 \cdot 4Zn(OH)_2$ [1]. После промывки и термической сушки образцов на поверхности остается слой ZnO плотностью 5,7 г/см^3.

Процесс окисления алюминиевого покрытия, согласно данным работы [2], протекает с образованием $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$. При нагреве отложение дегидратирует в соединение $Al(OH)_3$ с плотностью 2,42 г/см^3.

Металлизационный слой состава Al-Mn, выполненный с использованием проволоки АМЦ с 2 % марганца, обеспечивает более высокие прочностные свойства по сравнению со слоем из алюминия без потери коррозионной стойкости. Положительная роль интерметаллических соединений проявляется также в структурной анизотропии, способствующей торможению развития коррозии в направлении, перпендикулярном поверхности слоя. В то же время содержание марганца в сплаве, а соответственно, и в покрытии не превышает 2 %, что позволяет провести анализ продуктов коррозии аналогично слою с чистым алюминием.

При коррозии алюминия, легированного магнием в количестве до 5 % в составе покрытия, сформированного с использованием проволоки АМГ, согласно данным работы [3], в раствор переходит преимущественно магний, алюминий остается в оксидной пленке состава $Al(OH)_3$.

Установлено [4–6], что процесс формирования оксидной пленки на образцах с покрытием Zn-Al состоит из двух основных фаз: образование $ZnO + Al_2O_3$ и/или $ZnAl_2O_4$ с последующим формированием $Zn_2Al(OH)_6Cl \cdot 2H_2O$ и/или $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$. Однако $Zn_2Al(OH)_6Cl \cdot {}_2H_2O$ и $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot \cdot H_2O$ в значительной степени являются промежуточными соединениями при формировании коррозионного осадка. Основным оксидом, характерным для системы Zn-Al (15 %), является $ZnAl_2O_4$, защищающий поверхность образца от коррозионного разрушения.

Расчет скорости коррозии металла протекторного слоя определяется исходя из прироста массы образца. По приросту массы образца и долевому участию неметаллических атомов в оксиде определяется масса металла защитного слоя, участвовавшего в образовании оксидной фазы. Исходя из площади образца 2960 мм^2 и времени выдержки образцов 720 часов определяли массовую скорость коррозии. Затем по плотности металла защитного слоя рассчитали линейную скорость коррозии, являющуюся критерием эффективности антикоррозионной защиты. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

Анализ полученных результатов показал, что наилучшую коррозионную стойкость показало покрытие из технически чистого алюминия, наихудшую – сплав Zn-Al. Следует отметить, что с учетом полученной линейной скорости коррозии применение только металлизированного защитного слоя не обеспечивает указанный в нормативных документах срок службы. Это определяет важную роль полимерной составляющей в обеспечении стойкости защитных покрытий в морской воде.

ВЫВОДЫ

1. Для создания долговременной антикоррозионной защиты стальных металлоконструкций нормативная документация рекомендует использование металлизационных цинковых и алюминиевых покрытий, а также комбинированных металлизационно-лакокрасочных покрытий. Согласно нормативным документам срок службы покрытий достигает 30 лет.
2. Выполненные исследования свидетельствуют о том, что в условиях морской воды наименьшую линейную скорость коррозии имеют газотермические покрытия, полученные распылением технически чистого алюминия. Добавки магния и марганца в распыляемый алюминий снижают коррозионную стойкость покрытия.
3. Сопоставление данных нормативных документов и полученных в результате исследований значений линейной скорости коррозии показывает важную роль полимерной составляющей в обеспечении стойкости защитных покрытий в морской воде.

Литература:
1. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник: Справ. изд. / Под ред. А.А. Потехина и А.И. Ефимова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1991. 432 с.
2. Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 368 с.
3. Алиев А.Ф. Электрофизические исследования коррозии алюминиевых сплавов в водах широкого диапазона солевого состава: Сб. статей. 2006. 19 с.: ил.
4. Zhang X. Atmospheric Corrosion Of Zinc-Aluminum And Copperbased Alloys In Chloride-Rich Environments. Stockholm, Sweden, Elseiver, 2014, 92 p.
5. Varadarajan A. Dross Formation Mechanism and Development of Wear Resistant Scraper in 55Al-1.5Si-Zn Coating Bath. Morgantown, West Virginia, 2008, 117 p.

References:
1. Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya. Summary Chemical Reference Book: Handbook. Edited by A.A. Potekhin and A.I. Efimov, 3rd ed., revised and amended, Leningrad, Khimiya, 1991, 432 pp. (In Russian)
2. Sinyavskiy V.S., Valkov V.D., Kalinin V.D. Corrosion And Protection Of Aluminum Alloys. 2nd ed., revised and amended, Moscow, Metallurgiya, 1986, 368 pp. (In Russian)
3. Aliyev A.F. Electrophysical Researches Into Corrosion Of Aluminum Alloys In Waters Of High-Range Salt Composition: Collection of articles, 2006, 19 pp., fig. (In Russian)
4. Zhang X. Atmospheric Corrosion Of Zinc-Aluminum And Copperbased Alloys In Chloride-Rich Environments. Stockholm, Sweden, Elseiver, 2014, 92 p.
5. Varadarajan A. Dross Formation Mechanism and Development of Wear Resistant Scraper in 55Al-1.5Si-Zn Coating Bath. Morgantown, West Virginia, 2008, 117 p.