



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ
ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ**

**MATERIALS AND EQUIPMENT
FOR CORROSION PROTECTION**

Тип статьи: научная, оригинальная

Article type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-3>

**Электрохимические особенности коррозии сталей
в морской воде тропиков**

Н.Г. Ануфриев✉, Ю.А. Кузенков

Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН,
РФ, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31

e-mail: anufrievng@mail.ru

Аннотация. Определялись скорости коррозии углеродистых и нержавеющей сталей в морской воде тропиков с использованием методов линейного поляризационного сопротивления, амперометрии нулевого сопротивления, потенциометрии и гравиметрии. Исследования проводились со сталями, используемыми в судостроении, как углеродистыми, так и нержавеющей. Описаны методики экспериментов, оборудование и стенды, использованные в процессе проведения работы.

Предложены мероприятия для обеспечения тропикостойкости электрохимического оборудования в зоне брызг на морском стенде. Понятие «тропикостойкость» включает в себя ряд показателей, таких как стойкость сталей к морской атмосфере; стойкость к биообрастанию; стойкость к общей и локальной коррозии в морской воде.

Результаты испытаний показали, что измерение электрохимическими методами скорости коррозии сталей 30ХГСА, 08кп, Ст3, 08ХЗ, 12ХН10Т и НС-5Т в морской воде тропиков дает более адекватные результаты, по сравнению с гравиметрическим методом.

Ключевые слова: скорость коррозии, морская вода, тропикостойкость, стали углеродистые и нержавеющей, морская вода, метод поляризационного сопротивления, электрохимические методы

Для цитирования: Ануфриев Н.Г., Кузенков Ю.А. Электрохимические особенности коррозии сталей в морской воде тропиков // Практика противокоррозионной защиты. — 2024. — Т. 29, № 2. — С. 27-40. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-3>

Статья получена 14.05.2023. Принята к публикации 24.05.2024. Опубликовано 01.06.2024.

Конфликт интересов. Ануфриев Н.Г. является членом редакционной коллегии журнала «Практика противокоррозионной защиты» с 2018 г., но не имеет отношения к решению опубликовать данную статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Electrochemical Features of Steel Corrosion in Tropical Seawater

Nikolay G. Anufriev✉, Yuri A. Kuzenkov

Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS,
31, Leninskiy av., Moscow, 119071, Russian Federation

e-mail: anufrievng@mail.ru

Abstract. The corrosion rates of carbon and stainless steels in tropical seawater determined using methods of linear polarization resistance, zero resistance amperometry, potentiometry and gravimetry. Research was carried out with steels used in shipbuilding, both carbon and stainless. The experimental methods, equipment and stands used in the process of the work are described.

Measures are proposed to ensure the tropical resistance of electrochemical equipment in the splash zone at a marine stand. The concept of “tropical resistance” includes a number of indicators such as the resistance of steels to the marine atmosphere; resistance to biofouling; resistance to general and local corrosion in seawater. The test results showed that measuring the corrosion rate of steels 30KhGSA, 08kp, St3, 08KhZ, 12KhN10T and NS-5T in tropical seawater by electrochemical methods gives more adequate results compared to the gravimetric method.

Keywords: corrosion rate, seawater, tropic resistance, carbon steel and stainless steel, polarization resistance method, electrochemical methods

For citation: Anufriev, N. G., Kuzenkov, Yu. A. (2024). Electrochemical Features of Steel Corrosion in Tropical Seawater. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29 (1), 27-40. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-3>

Received May 14, 2023. Accepted for publication May 28, 2024. Published June 01, 2024.

Conflict of interest. Anufriev N.G. has been a member of the editorial board of the journal “Theory and Practice of Corrosion Protection” since 2018, but was not involved in the decision to publish this article. The article passed the journal's peer review procedure. The authors declared no other conflicts of interest.

Введение

Для обеспечения химической, биологической и экологической безопасности, снижения аварийности, экономического и экологического ущерба при эксплуатации морских сооружений и объектов, актуальны исследования закономерностей морской коррозии и обрастания морских конструкций, разработка новых методов их предотвращения и систем мониторинга. Известно, что до 60% общих затрат на заводской ремонт судов обусловлены ликвидацией коррозионных разрушений. Кроме этого, аварии морских транспортных средств, платформ, трубопроводов приводят к большим экономическим потерям – прямым и косвенным, огромному экологическому ущербу, сокращению популяций промысловых рыб, ракообразных, моллюсков и водорослей, особенно в случае транспортировки высокотоксичных, радиоактивных веществ, нефти и нефтепродуктов, ухудшению здоровья населения при использовании загрязненных продуктов питания [1].

В научных исследованиях, при разработке и осуществлении технологий защиты металлов в условиях морской коррозии и морского обрастания необходимо получение данных о кинетике и характере коррозионных процессов в зависимости от физико-химических и иных свойств материалов и параметров коррозионных сред. Коррозия в морских средах представляет собой, в основном, естественное электрохимическое явление. Поэтому в этих средах широко используются электрохимические датчики для обнаружения и контроля коррозии, путем оценки электрохимических характеристик корродирующих материалов. Среди них – потенциал разомкнутой цепи, линейное поляризационное сопротивление (ЛПС), гальваностатический импульсный метод, методы удельного сопротивления и электрохимического шума. Сам металл конструкции обычно не является частью схемы измерения. Главное преимущество электрохимических методов заключается в том, что с их помощью возможно напрямую из-

мерять скорость коррозии и осуществлять непрерывный коррозионный мониторинг [2].

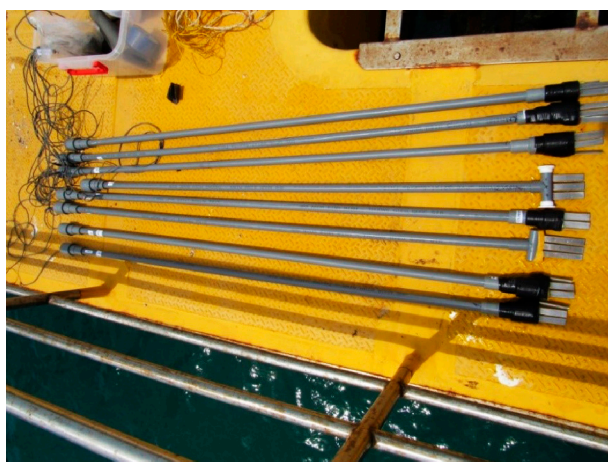
Целью настоящей работы было исследование коррозионной стойкости углеродистых и нержавеющей сталей, используемых в судостроении, с использованием электрохимических методов определения скорости их общей и локальной коррозии в морской среде тропиков в условиях биообрастания, а также адаптация электрохимических приборов к измерениям в условиях воздействия высокой влажности и температуры.

Методика эксперимента

Для определения скорости коррозии углеродистых и нержавеющей сталей (табл. 1) в лабораторных и натурных условиях применялся портативный коррозиметр «Эксперт-004» [3], который обеспечивает автоматическое получение в режиме реального времени комплекса основных коррозионных показателей металлов, сплавов и покрытий в водных средах: скорости общей коррозии (K_n), питтинговой коррозии (P) и потенциала коррозии ($E_{кор}$) методами ЛПС, амперометрии нулевого сопротивления (АНС), потенциометрии и контактных токов. Эти методы подробно описаны в нашей статье [3]. Электрохимическое определение скорости, потенциала коррозии углеродистых сталей Ст3, 30ХГСА и 08кп, а также нержавеющей сталей 08Х13, 12Х18Н10Т и НС5-Т (табл. 1) проводилось на образцах размерами 15х74 мм, которые экспонировались на морском стенде в Южном Вьетнаме, расположенном в 100 м от береговой линии. Температура морской воды за время испытаний составляла 26...29 °С. Результаты электрохимического определения скорости коррозии сопоставлялись с данными гравиметрии, визуальных наблюдений и оптической микроскопии. Определение скорости коррозии сталей в морской воде проводилось с помощью трехэлектродных электрохимических датчиков (рис. 1). Для обеспечения наибольшей точности определения скорости коррозии сталей в морской воде при наличии биообрастания одинаковые пло-

Таблица 1. Химический состав сталей для исследования коррозии в морской воде
Table 1. Chemical composition of steels for the study of corrosion in seawater

№ п/п	Марка стали / Steel grade	Химический состав / Chemical composition												
		Содержание легирующих элементов, % масс. / Content of alloying elements, wt. %												
		C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	N	Cu	Ti	Nb	V	P	S
1	30ХГСА	0,28... ...0,34	0,8... ...1,1	до 0,3	0,8... ...1,1	-	0,9... ...1,2	-	до 0,3	-	-	-	до 0,025	до 0,025
2	08кп	0,05... ...0,11	до 0,1			-	до 0,03	-	до 0,25	-	-	-	до 0,035	до 0,04
3	Ст3	0,14... ...0,22	до 0,3	до 0,3	0,4... ...0,65	-	0,15... ...0,3	до 0,008	до 0,3	-	-	-	до 0,04	до 0,05
4	12Х18Н10Т	0,08	18,1	9,8	0,62	0,04	0,54	-	0,16	0,53	0,01	-	0,023	0,023
5	08Х13	0,08	12,7	-	0,13	-	0,67	-	<0,01	-	0,01	-	0,028	0,020
6	НС5-Т	0,04	20,2	13,8	6,44	2,45	0,35	0,37	-	-	0,23	0,02	0,021	0,012



**Рис. 1. Электрохимические датчики
перед испытаниями**

Fig. 1. Electrochemical sensors before tests

ские электроды датчиков располагались на одной линии, рабочий электрод в центре. Датчики погружались на глубину около 1 м, по 2...3 одинаковых датчика с электродами из каждой марки стали. Разъемы датчиков подключались к автоматическому коммутатору «Эксперт-004К» и коррозиметру «Эксперт-004». Измерения скорости общей коррозии проводились при величине поляризующего импульса 10 мВ, его продолжи-

тельности 30 с. Пауза между измерениями общей и питтинговой коррозии составляла 20 с, пакетами измерений коррозионных показателей – 10...15 мин. Питание приборов проводилось с помощью аккумулятора емкостью 14 А-ч, обеспечивавшего непрерывную работу в течение не менее 10 сут.

Предварительные измерения с применением коррозионно-электрохимических приборов без защиты от морского климата показали, что в зоне брызг практически сразу на поверхности разъемов приборов и датчиков образуется сплошная пленка поверхностной влаги, содержащей соли из морской воды. Это должно было привести к искажению результатов измерений, коррозии разъемов, закоротке контактов и быстрому выходу приборов из строя. Поэтому коррозиметр, коммутатор и разъемы к ним помещали на морском стенде в контейнер с двойным пластиковым пакетом, содержащим 0,3 кг предварительно прокаленного индикаторного силикагеля. Синий цвет свидетельствовал о сухой атмосфере внутри контейнера (RH 20...40%). При изменении цвета силикагеля на розовый производилась его замена (примерно 1 раз в 2 недели). Аккумулятор располагался в отдельном

контейнере с осушителем. Опыт эксплуатации датчиков с разъемами показал, что такая методика позволяет полностью предотвратить конденсацию пленки влаги на разъемах в течение 83 сут. Для дополни-

тельного повышения сохраняемости коррозиметра и коммутатора внутри их корпусов (рис. 2, 3) на порононовом носителе был помещен ингибитор ИФХАН-112 -5,3 г в корпус коррозиметра, 3,5 г – в коммутатор.

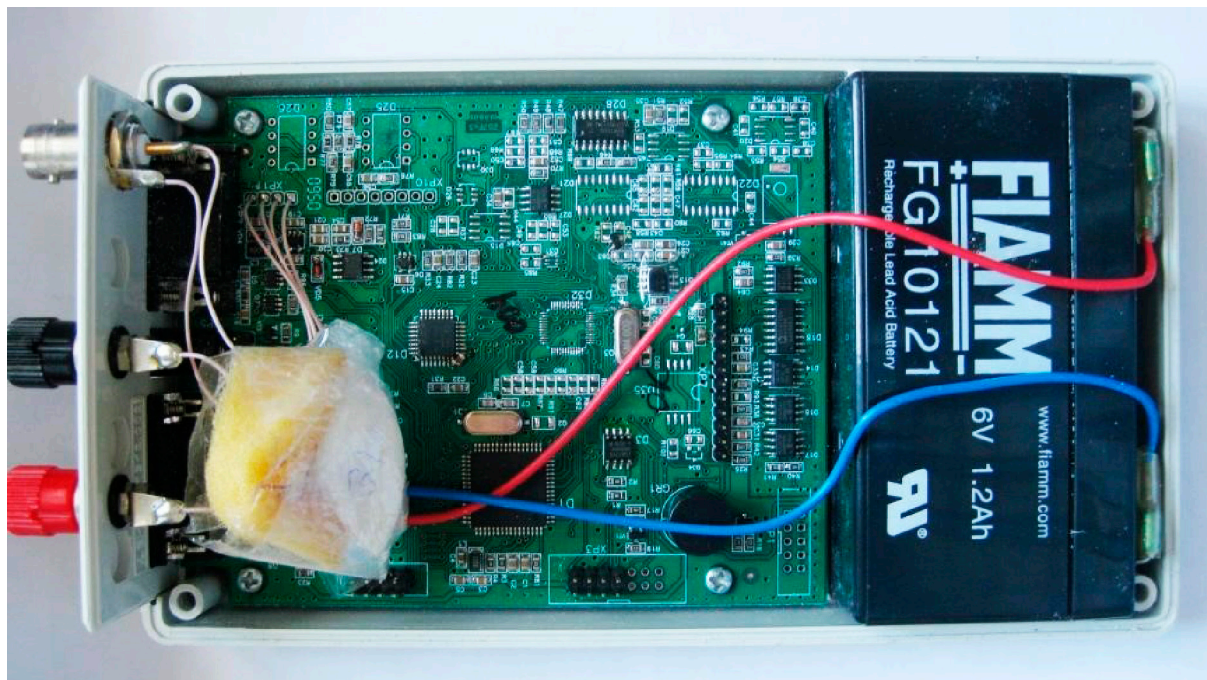


Рис. 2. Размещение летучего ингибитора ИФХАН-112 (5,3 г) внутри коррозиметра «Эксперт-004»

Fig. 2. Placement of the volatile inhibitor IFKHAN-112 (5.3 g) inside the corrosion meter «Expert-004»

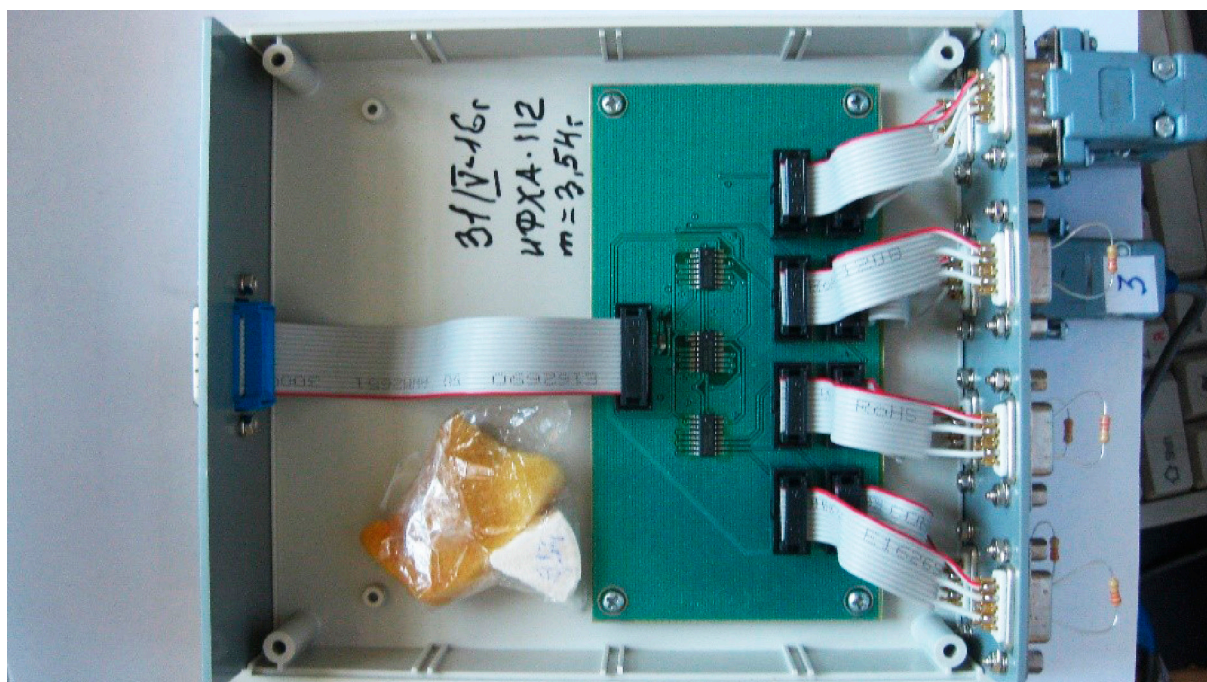


Рис. 3. Размещение летучего ингибитора ИФХАН-112 (3,5 г) внутри коммутатора «Эксперт-004К»

Fig. 3. Placement of the volatile inhibitor IFHAN-112 (3.5 g) inside the switch «Expert-004K»

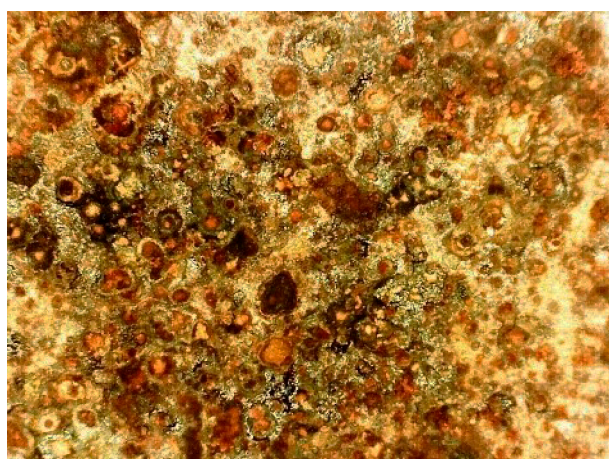
Экспериментальные результаты

Определение изменений внешнего вида сталей после выдержки в морской воде

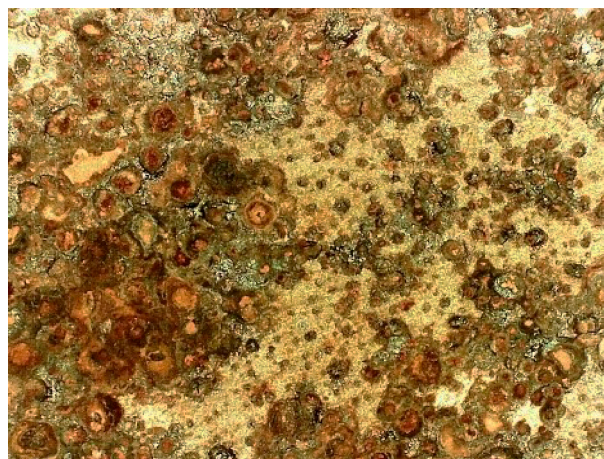
Поверхность стальных образцов трех углеродистых сталей после 10 сут выдержки в морской воде покрывается сплошным слоем красно-бурой ржавчины, их внешний вид был практически одинаков, что свидетельствует о протекании равномерной коррозии примерно с одинаковой скоростью. На микрофотографиях поверхности углеродистых сталей при увеличении $\times 150$ (рис. 4) видны красно-бурые и зеленые вкрапления аморфных соединений железа, белые отложения солей жесткости.

Внешний вид пластиковой кассеты с об-

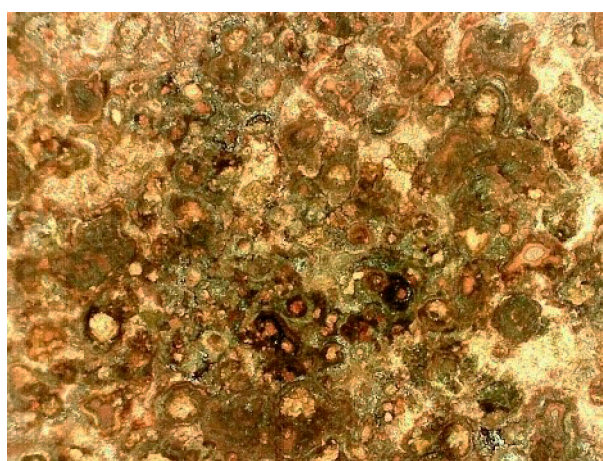
разцами сталей 08Х13, 12Х18Н10Т и НС5-Т перед испытаниями на морском стенде представлен на рис. 5а, образцов этих сталей после 10 сут выдержки в морской воде – на рис. 5б. На поверхности стали 08Х13 после 10 сут испытаний наблюдаются пятна красной ржавчины, продукты коррозии стали окрашивают пленку обрастания. На поверхности стали 12ХН10Т пятна ржавчины отсутствуют, наблюдается небольшое потемнение поверхности и незначительный налет продуктов обрастания, на поверхности стали НС5-Т – более интенсивное потемнение и обрастание, пленка которого окрашена в зеленоватый цвет продуктов коррозии Fe^{2+} , имеются более крупные бе-



08кп



30ХГСА



Ст3

Рис. 4. Поверхность углеродистых сталей после выдержки в морской воде в течение 10 сут ($\times 150$)

Fig. 4. The surface of carbon steels after 10 days of exposure in seawater ($\times 150$)



a



b

Рис. 5. Внешний вид кассеты с образцами сталей 08X13, 12X18H10T и HC5-T перед испытаниями (a) и образцов после 10 сут выдержки в морской воде (b)

Fig. 5. Surface appearance of 08Kh13, 12Kh18N10T and NS5-T steels samples before (a) and after 10 days of exposure in seawater (b)

лые включения осадков солей жесткости.

Через 30 сут выдержки в морской воде (рис. 6) пятна красной ржавчины на поверхности стали 08X13 утолщаются, наблюдаются колонии макрообрастателей. На поверхности стали 12X18H10T наблюдаются многочисленные мелкие точки ржавчины, крупные белые колонии биообрастателей диаметром 8...10 мм. На поверхности стали HC5-T после 30 сут выдержки в морской воде наблюдаются отдельные питтинги и тонкие пятна ржавчины. Визуально коррозия стали HC5-T в морской воде протекает с небольшой скоростью. Биообрастание стали 08X13 выше, чем сталей 12X18H10T и

HC5-T через 30 сут испытаний.

Таким образом, по данным визуальных наблюдений, скорость коррозии в морской воде стали 08X13 наиболее высока, а сталей 12X18H10T и HC5-T-низкая и имеет локальный характер.

На рис. 7-9 приведены микрофотографии поверхности стальных образцов 08X13, 12X18H10T и HC5-T, полученные при увеличении $\times 150$. Первоначально проводилась микросъемка образцов сталей с биообрастанием и продуктами коррозии, затем они удалялись в растворе 500 мл/л ортофосфорной кислоты (плотность 1,69 г/см³) при 25 °C в течение 3...20 мин (по ГОСТ 9.907-2007).



Рис. 6. Внешний вид поверхности сталей 08X13, 12X18H10T и HC5-T после 30 сут выдержки в морской воде

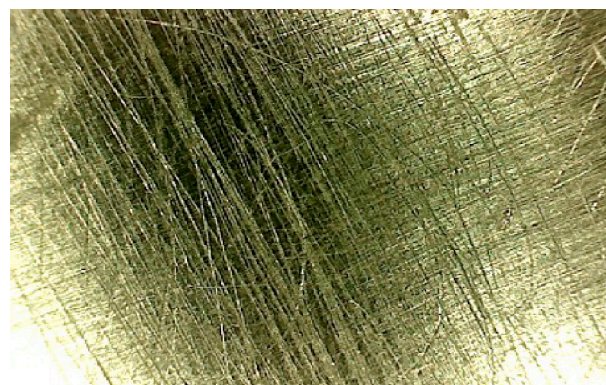
Fig. 6. Surface appearance of 08Kh13, 12Kh18N10T and NS5-T steels after 30 days of exposure in seawater

После травления до постоянной массы проводилось взвешивание образцов и повторная микросъемка с целью выявления питтингов и др. локальных коррозионных поражений. По микроснимкам после травления приблизительно рассчитывалось количество и размеры питтингов (табл. 3).

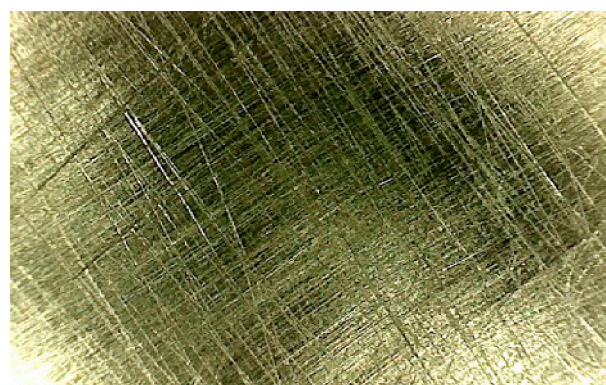
По результатам микроскопического исследования питтингостойкости сталей 08X13, 12X18H10T и HC5-T в морской воде (рис. 7-9) можно сделать следующие выводы.

На поверхности стали 08X13 уже через 10 сут экспозиции в морской воде наблюдается образование сплошного слоя ржавчины, мелких и средних питтингов - 80 пит/см², диаметром 0,03...0,2 мм, образуются коррозионные язвы, протекает интенсивная общая коррозия, растравливание поверхности.

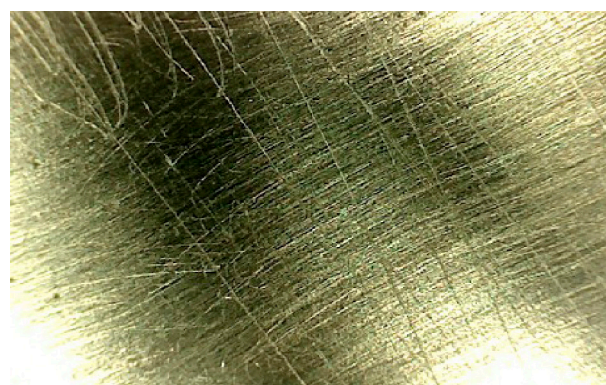
Поверхность стали 12X18H10T через



08X13



12X18H10T



HC5-T

Рис. 7. Микрофотографии поверхности сталей 08X13, 12X18H10T и HC5-T перед испытаниями (контроль) x150

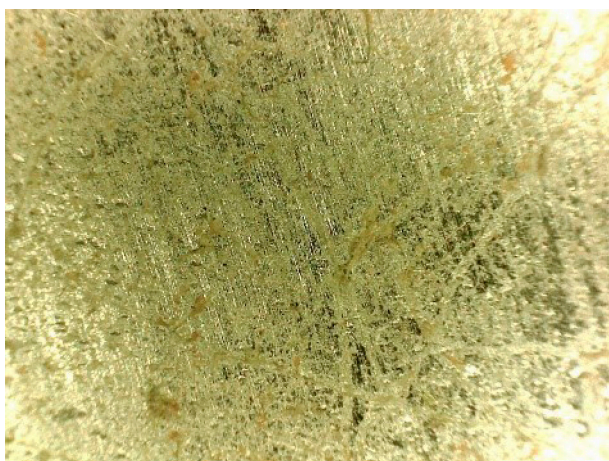
Fig. 7. Micrographs of the surface of 08Ch13, 12Ch18N10T and NS5-T steels before testing (control) x150



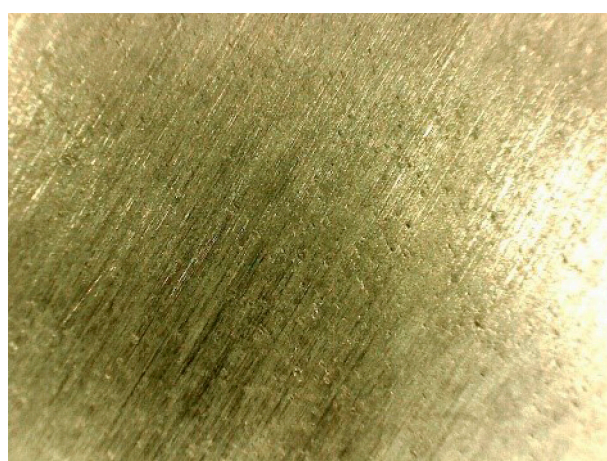
08X13 (a)



08X13 (b)



12X18H10T (a)



12X18H10T (b)



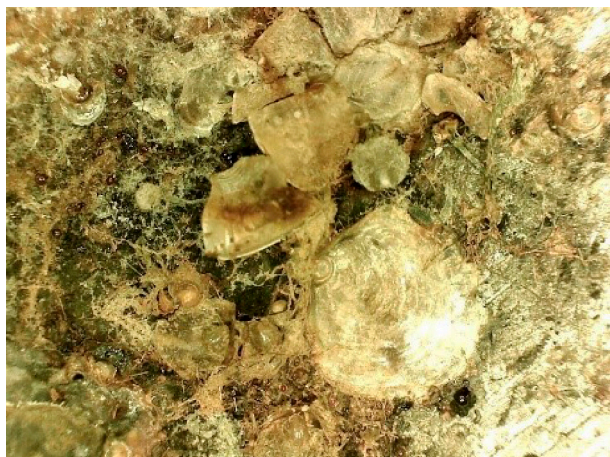
HC5-T (a)



HC5-T (b)

Рис. 8. Микрофотографии поверхности сталей 08X13, 12X18H10T и HC5-T после 10 сут выдержки в морской воде (a) и травления (b) (x150)

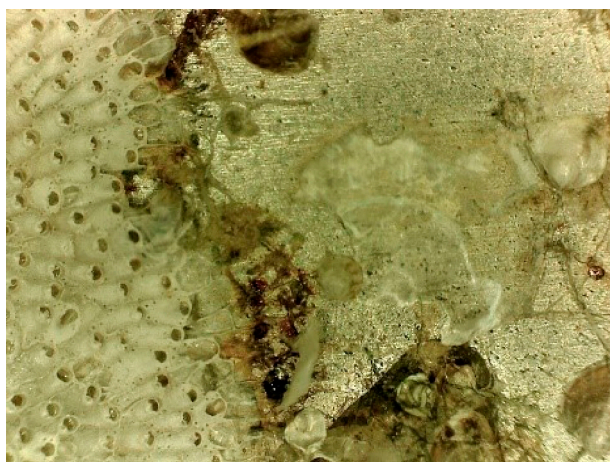
Fig. 8. Micrographs of the surface of 08Kh13, 12Kh18H10T and NS5-T steels after 10 days of seawater exposure (a) and etching (b) (x150)



08X13 (a)



08X13 (b)



12X18H10T (a)



12X18H10T (b)



HC5-T (a)



HC5-T (b)

Рис. 9. Микрофотографии поверхности сталей 08X13, 12X18H10T и HC5-T после 30 сут выдержки в морской воде (a) и травления (b) (x150)

Fig. 9. Micrographs of the surface of 08Kh13, 12Kh18H10T and NS5-T steels after 30 days of seawater exposure (a) and etching (b) (x150)

Таблица. 3. Количество и диаметр питтингов на сталях после экспозиции в морской воде по данным микроскопии (x150)

Table. 3. The number and diameter of pittings on steels after exposure in seawater according to microscopy data (x150)

Время экспозиции, ч / Exposure time, h	08X13 */		12X18H10T**/		HC5-T***/	
	N, пит/см ² N, pit/cm ²	d, мм	N, пит/см ² N, pit/cm ²	d, мм	N, пит/см ² N, pit/cm ²	d, мм
240	80	0,03...0,2	300	0,01...0,03	30	0,05...0,06
480	150	0,03...0,3	400	0,02...0,05	45	0,05...0,06
720	150	0,05...0,3	450	0,02...0,05	75	0,15...0,2

*/ Интенсивная общая коррозия, питтинг, язвы / Intense general corrosion, pitting, ulcers

**/ Интенсивный мелкий питтинг / Intense fine pitting

***/ Поверхностная коррозия пятнами / Surface corrosion in spots

30 сут подвергается также подвергается питтинговой коррозии. Образуются мелкие питтинги диаметром 0,01...0,05 мм в количестве около 300 пит/см².

Наиболее высокой питтингостойкостью характеризуется сталь HC5-T, на которой наблюдается образование тонких пятен продуктов коррозии диаметром 0,05...0,2 мм и наименьший питтинг (30...75 пит/см²).

Определение потенциала и скорости коррозии углеродистых и нержавеющей сталей

При исследовании зависимостей величин потенциала коррозии ($E_{кор}$) сталей 30ХГСА, 08кп и Ст3 от времени испытаний в морской воде было установлено, что в начале испытаний $E_{кор}$ углеродистых сталей (рис. 10) сдвигается в отрицательную сторону и через 10...12 ч стабилизируется на постоянном уровне. Установившееся значение $E_{кор}$ через 24 ч для трех испытанных углеродистых сталей было практически одинаково, – 670±5 мВ (х.с.э).

Величины $E_{кор}$ коррозионностойких сталей 08X13, 12X18H10T и HC5-T в течение 1 сут выдержки в морской воде при 30 °С, напротив, сдвигаются в положительную сторону вследствие пассивации поверхности и далее стабилизируются (рис. 11). При этом, $E_{кор}$ стали 08X13 в первые 30 мин незначительно сдвигаются в отрицательную сторону,

после 10 ч экспозиции стабилизируется и составляет (-53,8± 4,8) мВ, величины $E_{кор}$ стали 12X18H10T после 10 ч экспозиции примерно на 5 мВ более положительны и составляют (-48,04± 5,2) мВ, стали HC5-T – положительнее на 12 мВ, (-41± 4,9) мВ. Разница величин $E_{кор}$ невелика, однако, можно предположить, что сталь 08X13 будет менее стойкой в морской среде, чем стали 12X18H10T и HC5-T.

Далее на морском стенде с помощью вышеописанных трехэлектродных датчиков, коррозиметра «Эксперт-004» и коммутатора «Эксперт-004», а также гравиметрии проводились измерения скорости общей и питтинговой коррозии углеродистых сталей. Результаты приведены на рис. 12 и в табл. 4.

K_n углеродистых сталей в начале экспозиции имеют высокие значения и далее снижаются до стабилизации через 1...2 сут. После этого K_n сталей имеют близкие значения – 42...51 мкм/ч по данным ЛПС. Величины показателя питтинговой коррозии (P) углеродистых сталей также снижается с более высоких значений в начале выдержки, однако, они меньше K_n примерно в 5...10 раз. Это свидетельствует о протекании преимущественно равномерной коррозии углеродистых сталей в морской воде.

В табл. 4 приведены средние значения K_n и P углеродистых сталей за 240 ч экспозиции в морской воде, полученные соответ-

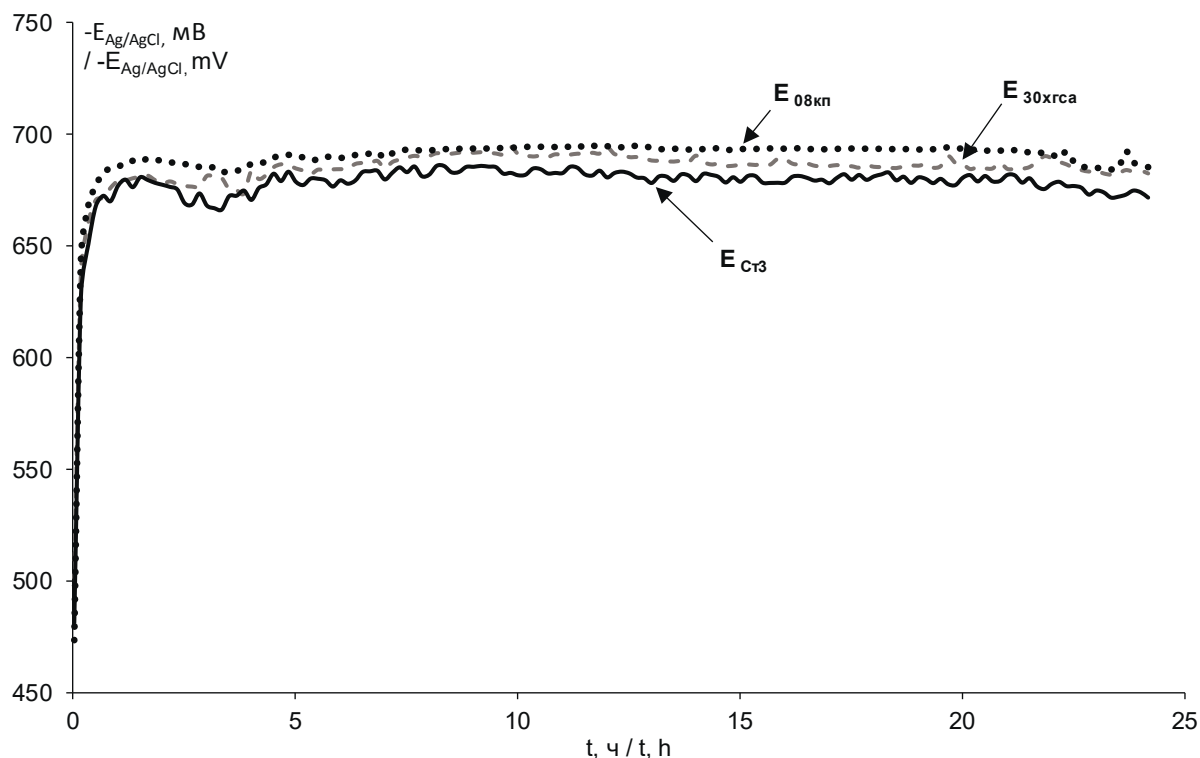


Рис. 10. Зависимости $E_{кор}$ от времени выдержки для углеродистых сталей 08кп, 30ХГСА и Ст3 в морской воде

Fig. 10. E_{cor} values dependences on the exposure time for carbon steels 08kp, 30KhGSA and St3 in seawater

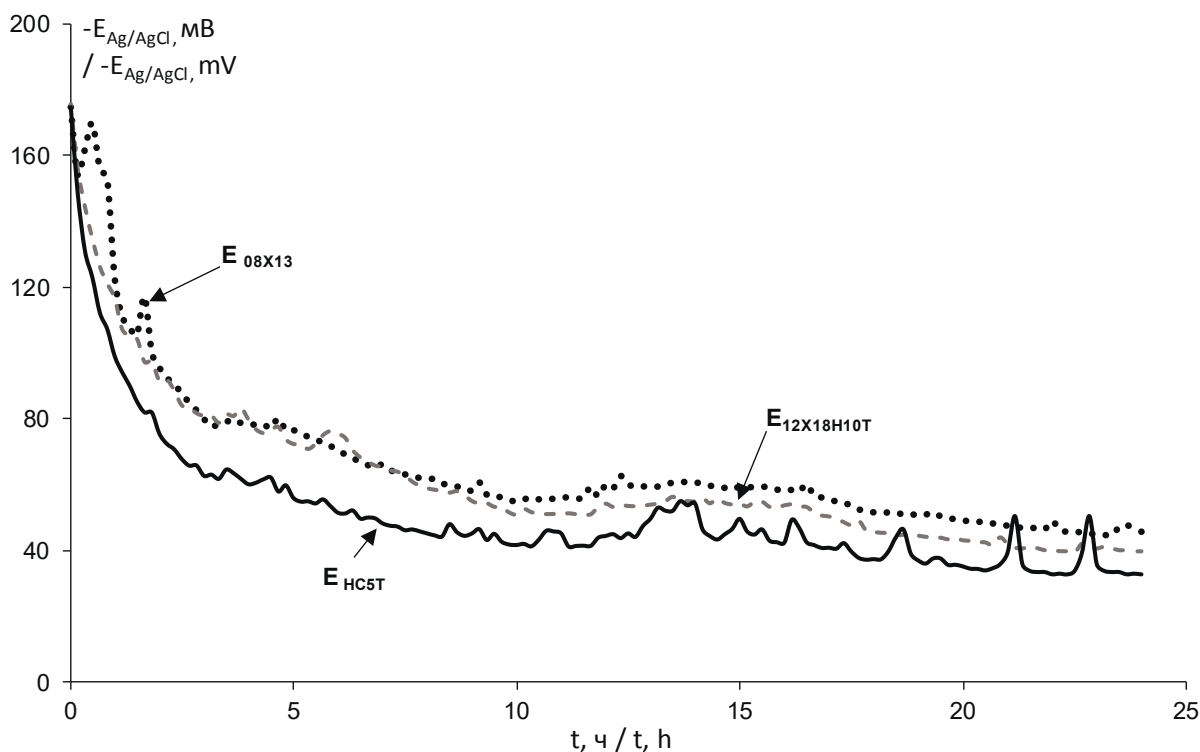


Рис. 11. Зависимости $E_{кор}$ для сталей 08Х13, 12Х18Н10Т и НС5-Т от времени выдержки в морской воде

Fig. 11. E_{cor} values dependences for steels 08Kh13, 12Kh18N10T and NS5-T on the exposure time in seawater

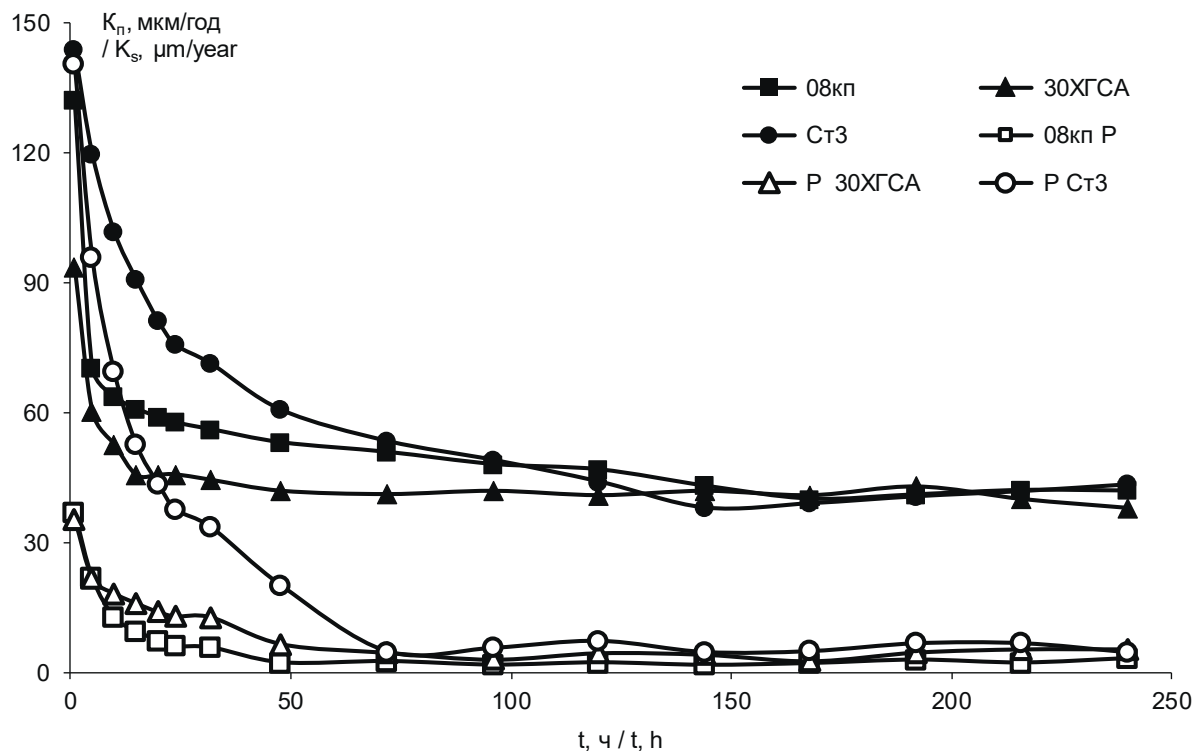


Рис. 12. Зависимости скорости общей (K_n) и питтинговой (P) коррозии сталей 08кп, 30ХГСА и Ст3 от продолжительности выдержки в морской воде при полном их погружении (1 м) в морскую воду

Fig. 12. The corrosion rates values of total (K_s) and pitting corrosion (P) of 08kp, 30KhGSA and St3 steels fully immersed (1 m) in seawater

Таблица 4. Средние значения скорости общей (K_n) и питтинговой коррозии (P) сталей 08кп, 30ХГСА и Ст3 в морской воде после 240 ч экспозиции

Table 4. Average values of the rate of total (K_p) and pitting corrosion (P) in seawater after 240 hours of exposure

Показатель коррозии, мкм/год, ±СТО*/	08X13			12X18H10T			HC5-T		
	K_n	P	K_m	K_n	P	K_m	K_n	P	K_m
	47,2± ±5,2	3,52± ±1,4	56,26± ±6,45	42,28± ±4,8	4,95± ±1,01	45,65± ±5,09	50,86± ±6,2	13,3± ±4,2	60,34± ±7,28
δ , **/	16,03%			7,38%			15,71%		

*/ СТО – стандартное отклонение от среднего значения / standard deviation from the mean

**/ δ – относительное отклонения K_n от K_m , $\delta = (K_n - K_m) * 100 / K_m$, %

/ **/ δ – relative deviation of K_s from K_m , $\delta = (K_s - K_m) * 100 / K_m$, %

ственно, методами ЛПС, АНС и гравиметрии. Наблюдается удовлетворительная корреляция (7...16%) результатов определения методом ЛПС скорости общей коррозии сталей 08кп, 30ХГСА и Ст3 в морской воде с данными гравиметрии при выдержке до 10 сут.

На рис. 13 приведены зависимости скорости общей и питтинговой коррозии нержавеющей сталей от времени экспозиции в морской воде, полученные методами ЛПС и АНС, в табл. 5 – усредненные значения K_n и P , полученные методами ЛПС, АНС и

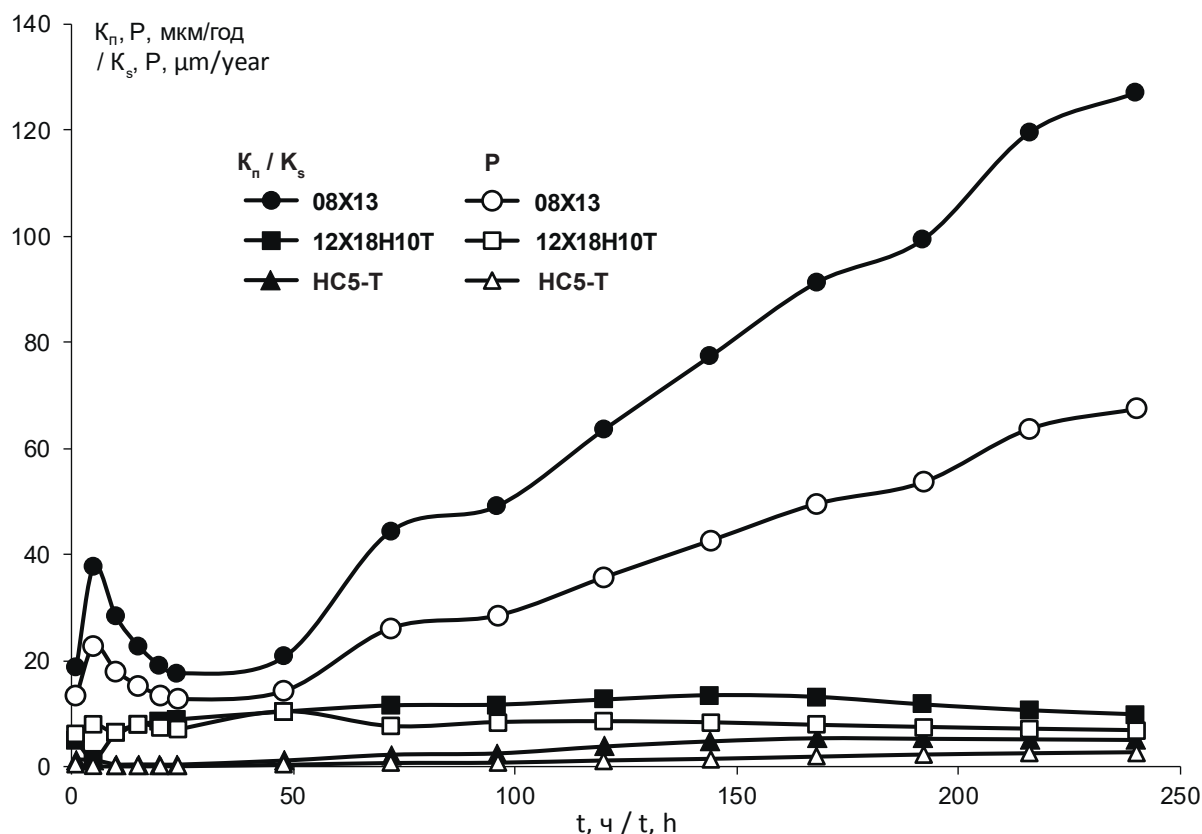


Рис. 13. Зависимости скорости общей (K_n) и питтинговой (P) коррозии сталей 08X13, 12X18H10T и HC5-T при полном погружении (1 м) в морскую воду

Fig. 13. The corrosion rates values of total (K_s) corrosion of 08Ch13, 12Ch18N10T and NS5-T steels fully immersed (1 m) in seawater

Таблица 5. Скорости общей (K_n) и питтинговой коррозии (P) сталей 08X13, 12X18H10T и HC5-T при полном погружении (1 м) в морскую воду

Table 5. The rates values of total (K_s) and pitting corrosion (P) of 08XKh13, 12Kh18N10T and NS5-T steels fully immersed (1 m) in seawater

Показатель коррозии, мкм/год, $\pm$ СТО*/	08X13			12X18H10T			HC5-T		
	K_n	P	K_m	K_n	P	K_m	K_n	P	K_m
	55,76	34,37	45,2	9,43	6,90	11,4	2,65	1,6	3,20
δ , **/	23,3%			17,28%			17,18%		

*/ СТО – стандартное отклонение от среднего значения / standard deviation from the mean

**/ δ – относительное отклонения K_n от K_m , $\delta = (K_n - K_m) * 100 / K_m$, %

/ **/ δ – relative deviation of K_s from K_m , $\delta = (K_s - K_m) * 100 / K_m$, %

гравиметрии при экспозиции до 240 ч.

Из результатов, приведенных на рис.13 следует, что скорость общей коррозии стали

08X13 с увеличением времени экспозиции возрастает с 18 мкм/год в начале испытаний до 127 мкм/год через 240 ч, показатель

питтинга – с 13 до 67,5 мкм/год. Величины K_n заметно превышают показатель P , т.е. преобладает равномерная коррозия. Величины K_n и P для стали 12X18H10T составляют в среднем за 240 ч соответственно 9,43 и 6,90 мкм/год. Наиболее низкие скорости K_n и P наблюдаются для стали HC5-T – 2,66 и 1,05 мкм/год. Как и в случае углеродистых сталей, наблюдается удовлетворительная корреляция (17...23%) результатов определения методом ЛПС скорости общей коррозии сталей 08X13, 12X18H10T и HC5-T в морской воде с данными гравиметрии при выдержке до 10 сут.

Выводы

1. Определялись скорости коррозии сталей в морской среде тропиков методами линейного поляризационного сопротивления, амперометрии нулевого сопротивления, потенциометрии и гравиметрии, а также дополнительные мероприятия по обеспечению работоспособности комплекса в зоне брызг на морском стенде до 83 сут.

2. Применение электрохимических методик с использованием автоматического коррозиметра «Эксперт-004» обеспечивает получение адекватных результатов определения K_n и P углеродистых и нержавеющей сталей в морской воде тропиков в сравнении с гравиметрией.

3. По данным исследования, за 10 сут погружения в тропическую морскую воду скорость общей коррозии стали 08X13 весьма высока (45,2 мкм/ч, стойкий материал по ГОСТ 13819-68, 4-5 балл), стали 12X18H10T – в 4 раза меньше, 11,4 мкм/ч, 4-ый балл) и HC5-T-наиболее низкая, 3,2 мкм/ч, коррозия последних имеет локальный характер, причем для стали 12X18H10T характерна незначительная питтинговая коррозия,

для стали HC5-T – незначительная коррозия пятнами, весьма стойкая, 2 балл. Биообрастание стали 08X13 заметно выше, чем сталей 12X18H10T и HC5-T.

Литература

1. Карпов В.А., Ковальчук Ю.Л., Полтаруха О.П., Ильин И.Н. Комплексный подход к защите от морского обрастания и коррозии. – М.: Т-во научных изданий КМК, 2007. – 152 с.
2. Brijder Robert, Hagen C.H.M., Cortés Ainhoa, and others. Review of corrosion monitoring and prognostics in offshore wind turbine structures: Current status and feasible approaches. // *Frontiers Energy Research*. – 19 September 2022. – V. 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.9913433>.
3. Ануфриев Н.Г. Новые возможности применения метода линейного поляризационного сопротивления в коррозионных исследованиях и на практике // *Коррозия: материалы, защита*. – 2012. – №1. – С. 36-43.

References

1. Karpov, V. A., Kovalchuk, Yu. L., Poltarukha, O. P., & Ilyin, I. N. (2007). *An integrated approach to protection against marine fouling and corrosion*, Moscow: Partnership of Scientific Publications KMK. (in Russ.)
2. Brijder R., Hagen, C. H. M., Cortés, A. and others. (September 19, 2022). Review of corrosion monitoring and prognostics in offshore wind turbine structures: Current status and feasible approaches. *Frontiers Energy Research*, 10. doi:10.3389/fenrg.2022.9913433
3. Anufriev, N.G. (2012). New possibilities for using the linear polarization resistance method in corrosion research and practice. *Corrosion: materials, protection*, (1), 36-43. (in Russ.)

Информация об авторах

Ануфриев Николай Геннадиевич, к.х.н., в.н.с., Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва, Российская Федерация

Кузнецов Юрий Александрович, к.х.н., с.н.с., Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва, Российская Федерация

Information about authors

Nikolay G. Anufriev, Ph.D. in Chemistry, leading researcher, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS, Moscow, Russian Federation

Yuri A. Kuzenkov, Ph.D. in Chemistry, senior researcher, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS, Moscow, Russian Federation