

А.К. Леонов¹, М.А. Скотникова¹, А.В. Шахматов², С.С. Колесов²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, leonov_anton@bk.ru
²ООО «Системные решение», Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ В ХЛОРИДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

Аннотация

В работе проведено сравнительное исследование коррозионной стойкости аустенитных нержавеющей сталей: SS 321, SS 316, SS 904L, 6Mo в водных растворах NaCl различной концентрации: 0,05%; 2,5%; 5% с использованием электрохимических методов. Проведены потенциодинамические испытания по определению потенциалов питтингообразования для каждой из сталей в исследуемых средах. Полученные данные позволяют оценить применимость сталей в зависимости от концентрации раствора.

Ключевые слова: коррозия, аустенитные стали, питтинг, хлориды, потенциодинамические исследования, критическая температура питтингообразования, морская вода.

Введение

Развитие морской инфраструктуры в условиях Арктики, включая Северный морской путь, требует применения материалов с исключительной коррозионной стойкостью. Морская вода, содержащая высокие концентрации хлоридов (до 35000 ppm и выше) [1], в сочетании с механическими нагрузками и биологическим воздействием, создает крайне агрессивную среду для стальных конструкций, оборудования, трубопроводов и тд. В таких условиях традиционные углеродистые и низколегированные стали быстро выходят из строя при контакте с морской водой, что создает необходимость обеспечения дополнительной антикоррозионной защиты, либо использования высоколегированных нержавеющей сталей аустенитного класса [2].

Аустенитные нержавеющей стали широко применяются в агрессивных средах, включая морскую воду, благодаря высокой коррозионной стойкости. Однако существует значительный разброс в их коррозионной стойкости, в том числе по применимости в условиях повышенного содержания хлоридов, особенно в отношении локальных видов коррозии, таких как питтинговая и щелевая коррозия. В настоящее время для наиболее ответственного применения в неподготовленной морской воде, при температурах до 20⁰C используются не имеющие аналогов, дорогостоящие супераустенитные стали, такие как 6Mo (UNS S31254) с содержанием молибдена – 6% и выше [3 – 7, 11 - 12]. В связи с нестабильной ситуацией на рынке и связанными с этим ценовыми, логистическими и прочими издержками, вопрос импортозамещения и снижения капитальных затрат для строительства масштабных инфраструктурных проектов становится все более критичным.

Цель данной работы – провести сравнительный анализ коррозионной стойкости наиболее применимых и доступных на рынке сталей [13 – 15]: 321 (аналог 12X18H10T), 316 (аналог 03X17H14M3), 904L (аналог 06XH28MДТ) и 6Mo (близкий аналог 02X20H18M6) в хлоридсодержащих средах различной концентрации для оценки возможности замены 6Mo в условиях эксплуатации в морской воде.

Методы и материалы

1. Характеристика исследуемых материалов.

В ходе работы исследовались образцы четырех аустенитных нержавеющей сталей (Таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики исследуемых сталей

Марка стали	Аналог (РФ)	Химический состав, %							
		C	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Cu	Ti
321	12X18H10T	≤0,12	≤2,0	9,0-12,0	17,0-19,0	-	-	-	0,5
316	03X17H14M3	0,03-0,08	≤2,0	10,0-14,0	16,0-18,0	2,0-3,0	0,1	-	-
904L	06XH28MДТ	≤0,02	0,7	24,0-26,0	19,0-21,0	4,0-5,0	0,15	1,2-2,0	-
6Mo	02X20H18M6	≤0,02	≤1,0	17,5-18,5	19,5-20,5	6,0-6,5	0,18-0,25	0,5-1,0	-

Образцы были изготовлены в виде пластин. Перед испытаниями проводилась обработка поверхности образцов: шлифовка и очистка.

2. Приготовление растворов.

Готовились растворы со следующими концентрациями NaCl:

- 0,05 % ($\sim 500 \frac{\text{мг}}{\text{л}}$) – раствор моделировал слабоагрессивные среды (речную воду, конденсат);
- 2,5 % ($\sim 25000 \frac{\text{мг}}{\text{л}}$) – раствор моделировал солоноватую воду эстуариев (заливов) [8];
- 5,0 % ($\sim 50000 \frac{\text{мг}}{\text{л}}$) – раствор имитировал концентрированную морскую воду [9].

Все растворы готовились на дистиллированной воде, pH которых корректировался до $7,0 \pm 0,2$.

3. Методика потенциодинамических исследований.

Исследования проводились согласно методике [10].

Была использована трехэлектродная ячейка: Потенциостат VersaSTAT-4; Рабочий электрод из исследуемой стали с экспонируемой площадью $\sim 1 \text{ см}^2$; Вспомогательный электрод из платиновой сетки; Электрод сравнения из Ag/AgCl.

Потенциал сканирования составлял от минус 200 мВ до 1200 мВ. Скорость сканирования была равна 0,16 мВ/с. Величина потенциала питтингообразования составляла 100 мкА, а температура $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты и обсуждение

На рисунках 1 – 3 представлены типичные поляризационные кривые для стали 321 (12X18H10T), на рисунках 4 – 6 для стали 316 (03X17H14M3), а на рисунках 7 – 9 кривые для стали 904L (06XH28MДТ). На рисунках 10 – 11 представлены типичные поляризационные кривые для стали 6Mo (02X20H18M6).

Как видно из рисунков, при высоком содержании хлоридов, сталь показала идентичную коррозионную стойкость. В связи с этим, испытания при низком содержании хлоридов не проводились.

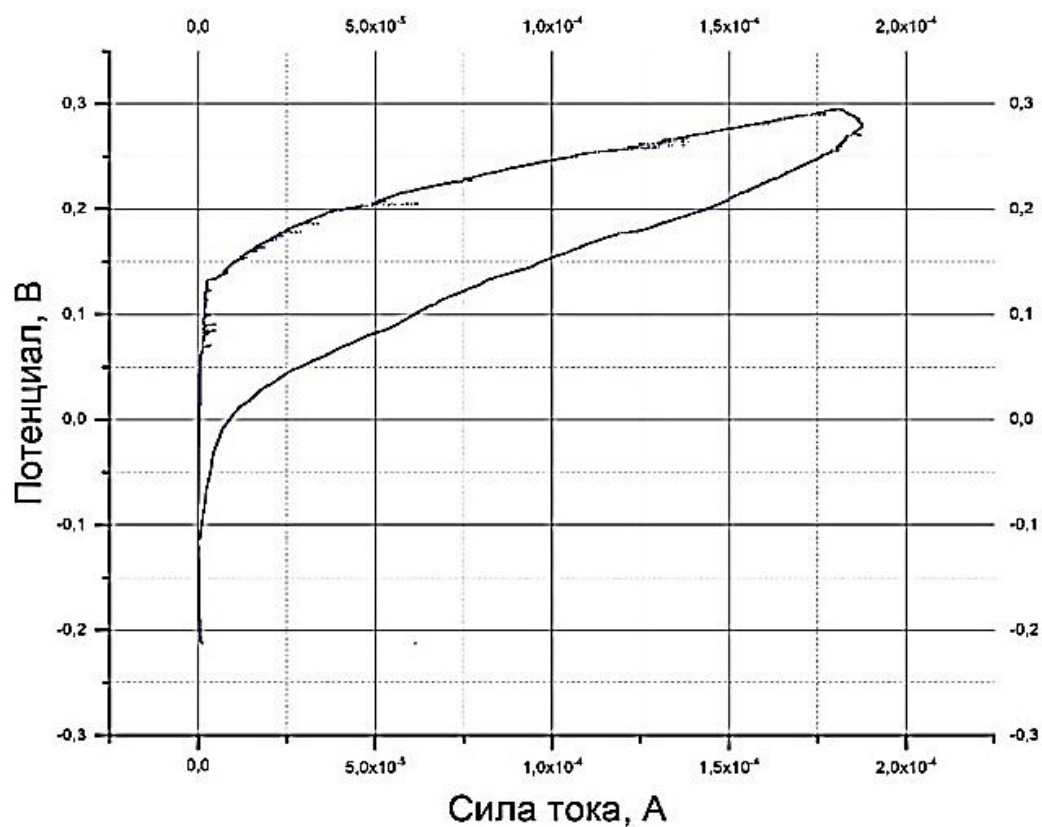


Рисунок 1 – Поляризационная кривая стали 321 (12X18H10T) при концентрации раствора 5%

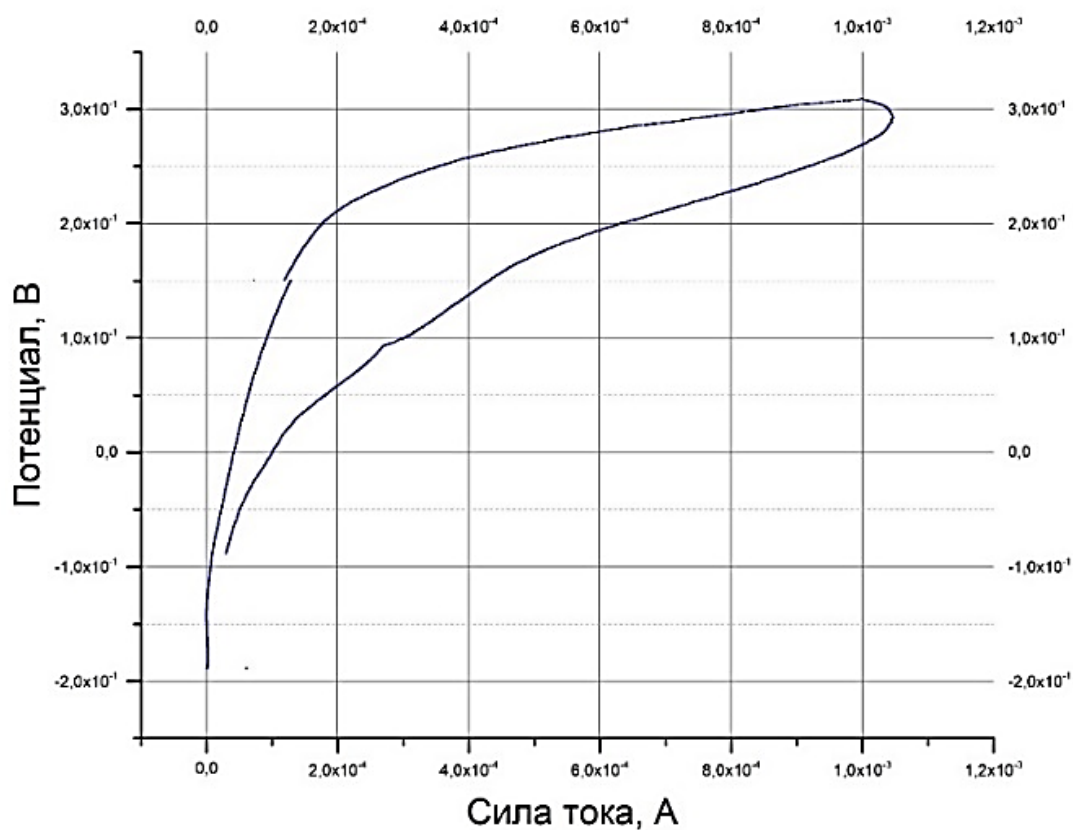


Рисунок 2 – Поляризационная кривая стали 321 (12X18H10T) при концентрации раствора 2,5%

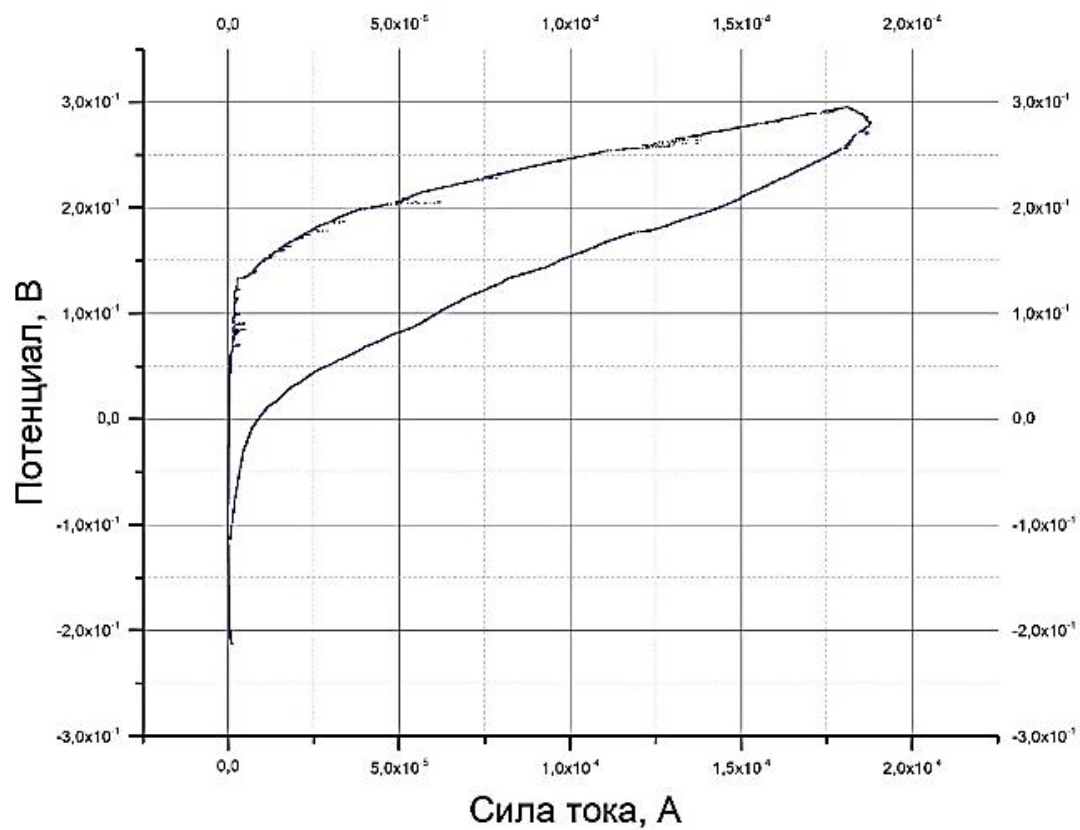


Рисунок 3 – Поляризационная кривая стали 321 (12X18H10T) при концентрации раствора 0,05%

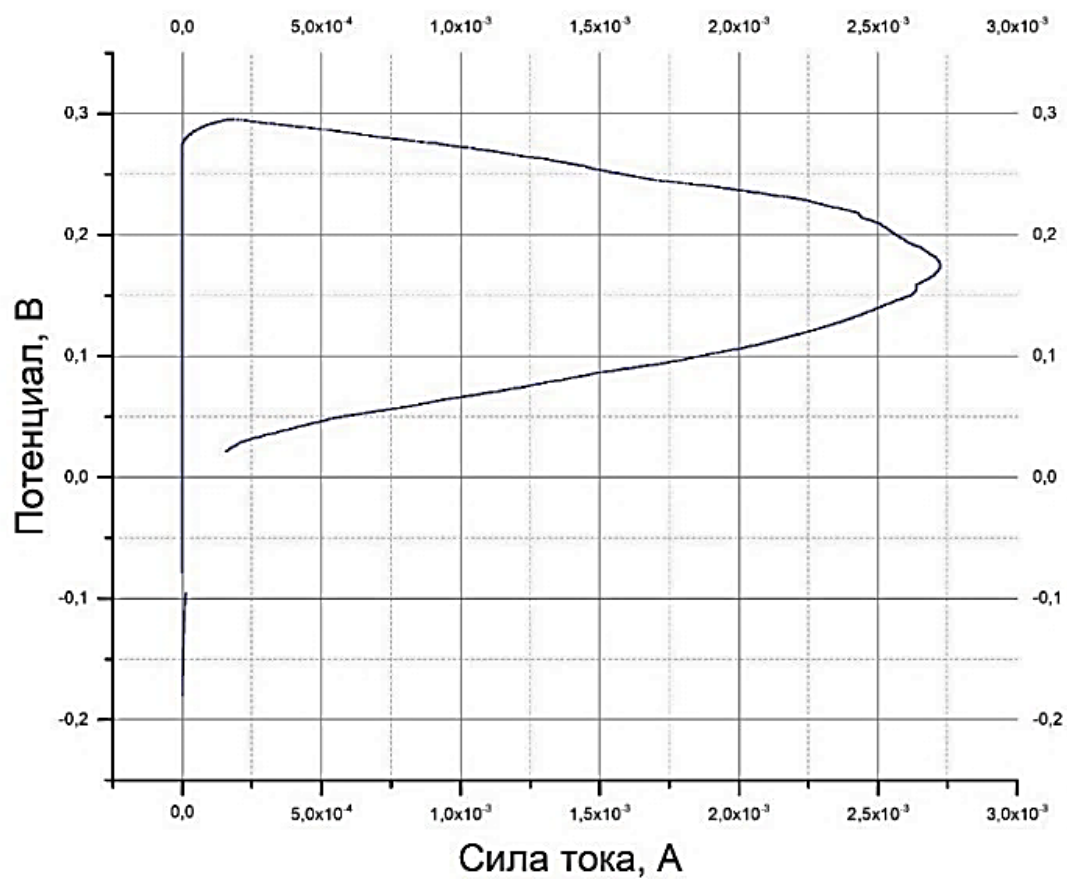


Рисунок 4 – Поляризационная кривая стали 316 (03X17H14M3) при концентрации раствора 5%

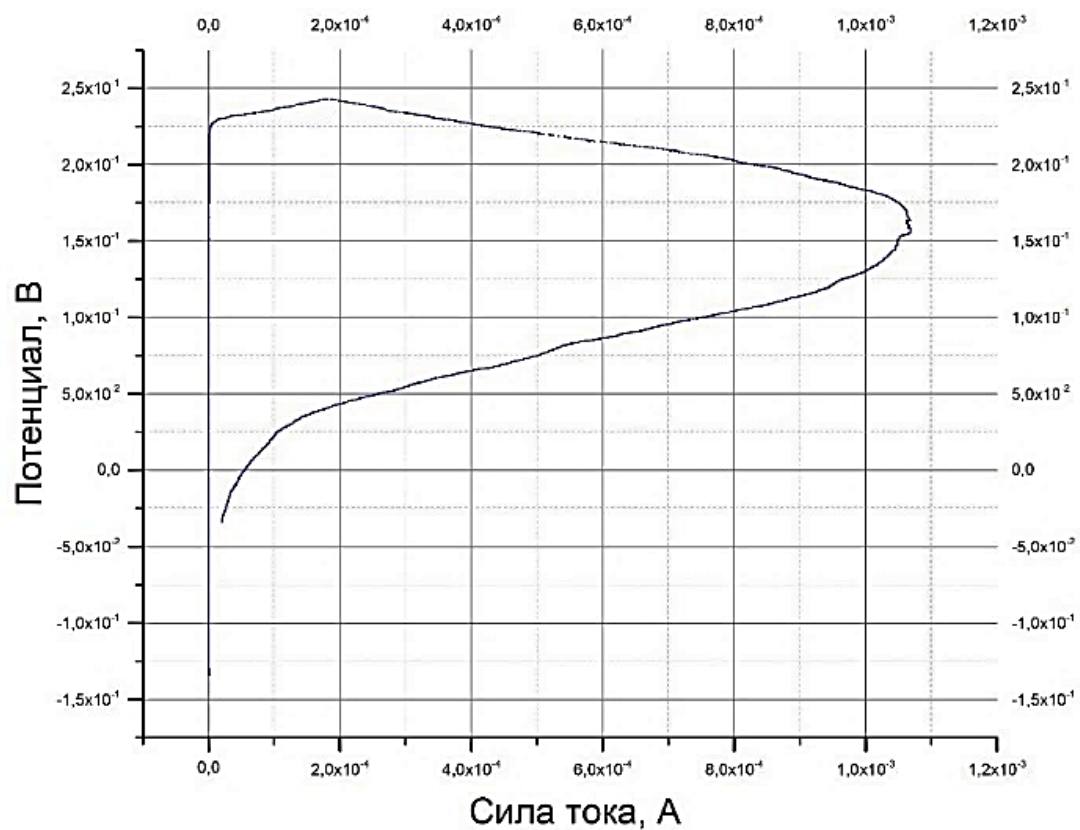


Рисунок 5 – Поляризационная кривая стали 316 (03X17H14M3) при концентрации раствора 2,5%

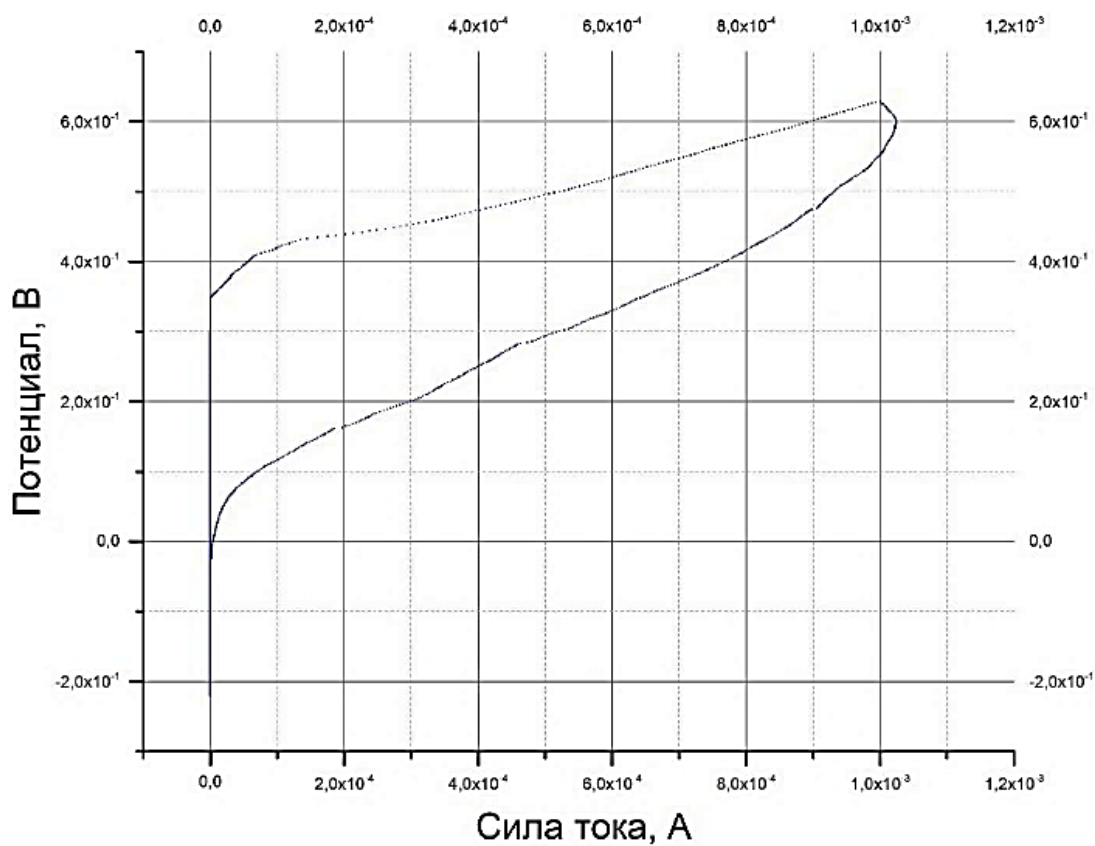


Рисунок 6 – Поляризационная кривая стали 316 (03X17H14M3) при концентрации раствора 0,05%

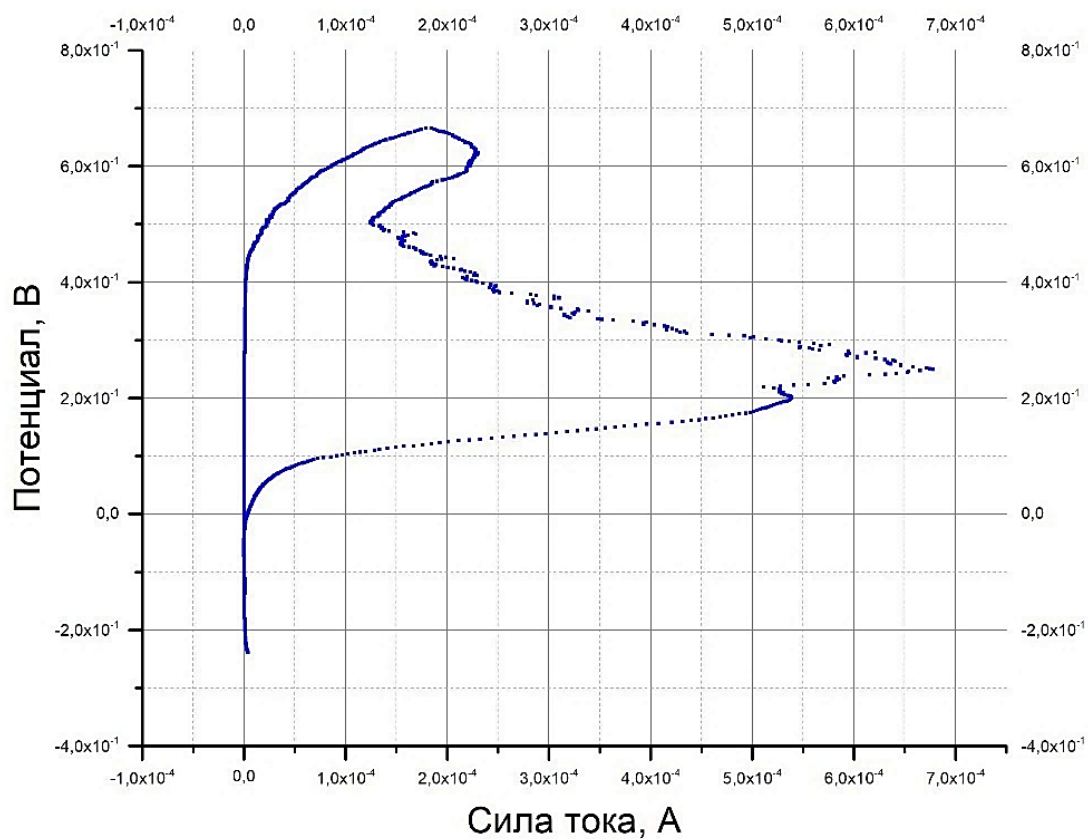


Рисунок 7 – Поляризационная кривая стали 904L (06ХН28МДТ) при концентрации раствора 5%

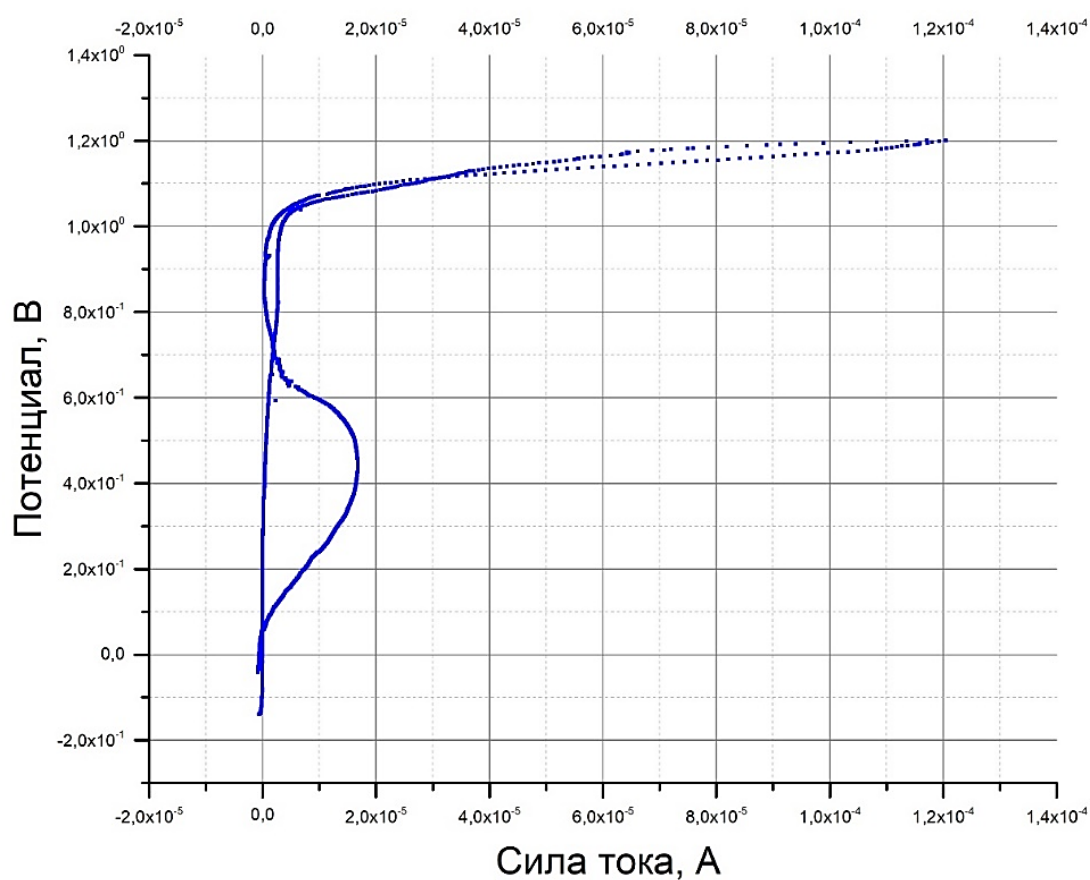


Рисунок 8 – Поляризационная кривая стали 904L (06ХН28МДТ) при концентрации раствора 2,5%

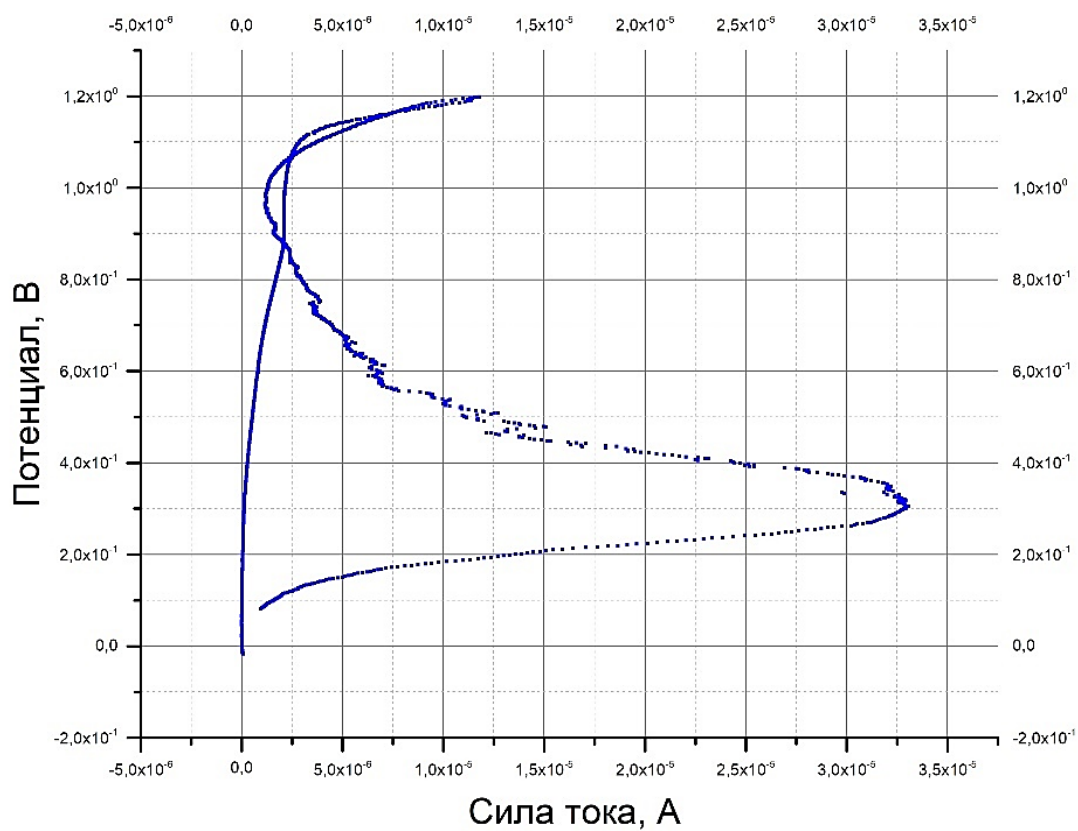


Рисунок 9 – Поляризационная кривая стали 904L (06ХН28МДТ) при концентрации раствора 0,05%

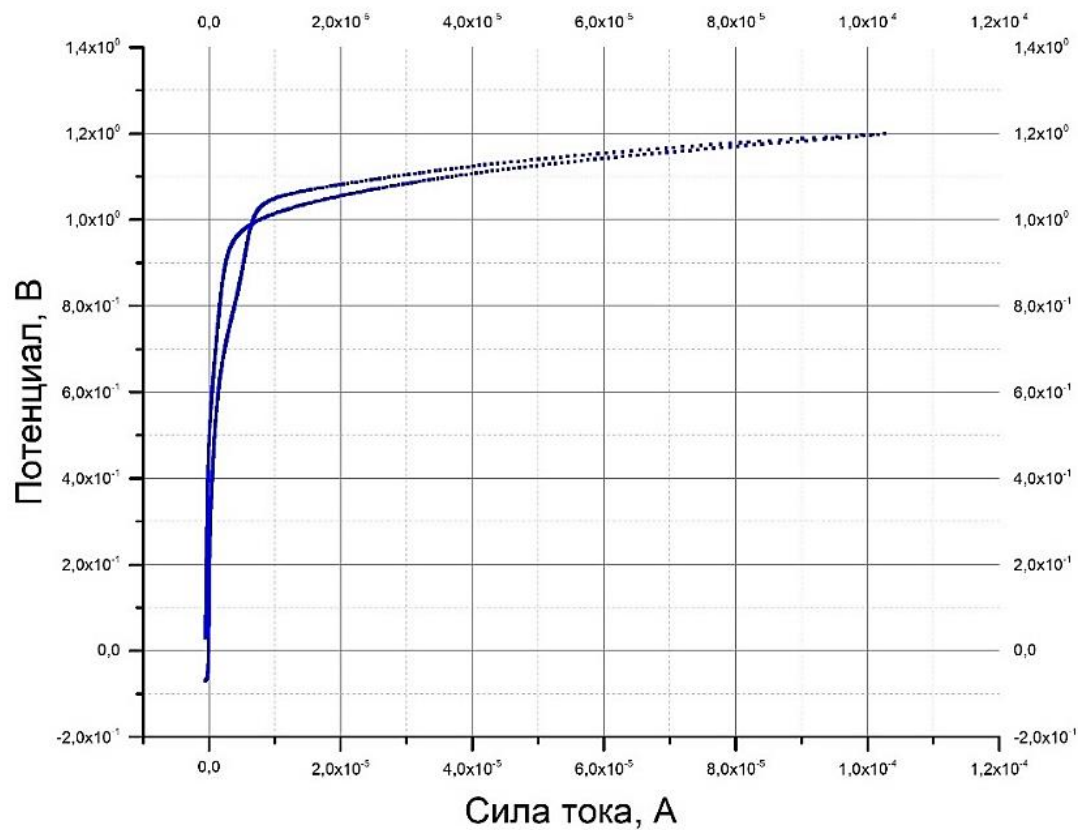


Рисунок 10 – Поляризационная кривая стали 6Mo (02Х20Н18М6) при концентрации раствора 5%

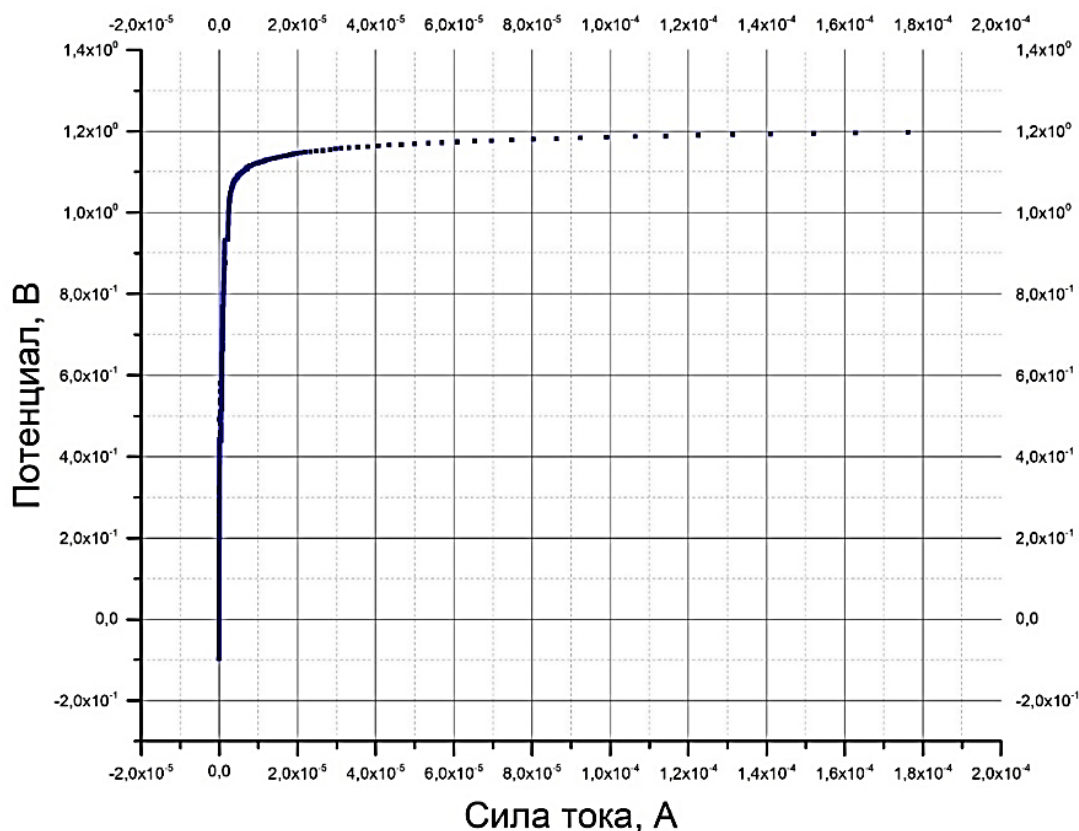


Рисунок 11 – Поляризационная кривая стали 6Мо (02Х20Н18М6) при концентрации раствора 2,5%

Результаты испытаний представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний

Концентрация, %	Потенциал питтингообразования, мВ			
	6Мо (02Х20Н18М6)	904L (06ХН28МДТ)	316 (03Х17Н14М3)	321 (12Х18Н10Т)
5,0	1198	614	291	112
2,5	1187	881	236	112
0,05	-	1184	612	290

Заключение

1. В работе проведено сравнительное исследование коррозионной стойкости аустенитных нержавеющей сталей: SS 321, SS 316, SS 904L, 6Мо потенциодинамическим методом в водных растворах с различной концентрации NaCl: 0,05%; 2,5%; 5%.

2. Сталь 321 (12Х18Н10Т) во всех испытанных средах показала низкую коррозионную стойкость.

3. Сталь 316 (03Х17Н14М3) по своей коррозионной стойкости превышает стойкость стали 321 (12Х18Н10Т), но незначительно.

4. Сталь 904L (06ХН28МДТ) показала приемлемую коррозионную стойкость при достаточно низких концентрациях хлоридов (0,05%).

5. Сталь 6Мо (02Х20Н18М6) во всех исследуемых средах показала высокую коррозионную стойкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карсаков, А.Л. Основные особенности условий среды в Баренцевом море в 2017 г. / А.Л. Корсаков, А.Г. Трофимов, О.В. Титов. // Труды ВНИРО. - 2018. - Т. 173. - С. 17-32
2. Gudic, S. Corrosion behavior of stainless steel in seawater in the presence of sulfide / g. S. Gudic, L. Vrsalovic, A. Matosin, J. Krolo, E. E. Oguzie, A. Nagobe. // Applied Sciences. - 2023. - V. 13. - № 4366. - P. 2-24.
3. Malik, A. Corrosion behavior of steels in Gulf seawater environment. / A. Malik, S. Ahmad, I. Andijani, S. Al-Fouzan // Desalination. - 1999. - V. 123. - № 2-3. - P. 205-213
4. Sridhar, N. Predicting localized corrosion in seawater. / N. Sridhar, C. Brossia, D. Dunn, A. Anderko. // Corrosion. - 2004. - V. 60. - № 10. - P. 915-936
5. Кайдриков, Р.А. Питтинговая коррозия металлов и многослойных систем (исследование, моделирование, прогнозирование, мониторинг). / Р. А. Кайдриков, С. С. Виноградова. // Вестник Казанского технологического университета. - 2010. - Т. 4. - С. 212-227
6. Каблов, Р.А. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии. / О.В. Старцев, И.М. Медведев. // Авиационный материалы и технологии. - 2015. - Т. 2. - С. 76-87.
7. Иванова, О.А. Влияние различных факторов на коррозию конструктивных элементов плавучих сооружений в морской воде. / О.А. Иванова, А.В. Родькина. // Вестник ВГАВТ. - 2018. - Т. 56. - С. 50-56
8. Михайлов, В.Н. Новый подход к определению и типизации эстуариев. / В.Н. Михайлов, С.Л. Горин, М.В. Михайлова. // Вест. Моск. Ун-та. - 2009. - Т. 5. - С. 3 - 11
9. Нальгиев, А.А. Применение морской воды для приготовления ингибирующей буровой промывочной жидкости. / А.А. Нальгиев // Вестник науки и образования. - 2019. - Т. 63. - № 9. - С. - 36-38
10. ASTM G3-14. Examination and evaluation of pitting corrosion // Annual Book of ASTM Standards. - 2024.
11. NORSOK M001. Materials selection. // Standards Norway. - 2014
12. Ren Z. Stress–Corrosion Cracking of AISI 316L Stainless Steel in Seawater Environments: Effect of Surface Machining. / Z. Ren, F. Ernst. // Metals. – 2020. – V.10. - № 10. – P. 1324.
13. ASME BPVC. Section II-Materials-Part A-Ferrous Materials Specifications // Annual book of ASME Standard. - 2023.
14. ГОСТ 32569. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах // Межгосударственный стандарт. – 2013.
15. ГОСТ 34347. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия // Межгосударственный стандарт. – 2017.

A.K. Leonov¹, M.A. Skotnikova¹, A.V. Shakhmatov², S.S. Kolesov²

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, kalinin@ya.ru

²JSC «System Solutions», Moscow, Russia

COMPARATIVE STUDY OF THE CORROSION RESISTANCE OF AUSTENITIC STAINLESS STEELS IN CHLORIDE-CONTAINING ENVIRONMENTS

Abstract

This work presents a comparative study of the corrosion resistance of austenitic stainless steels (SS 321, SS 316, SS 904L, and 6Mo) in aqueous NaCl solutions of varying concentrations (0.05%, 2.5%, and 5%) using electrochemical methods. Potentiodynamic tests were conducted to

determine the pitting potentials for each steel in the tested environments. The obtained data allow for an assessment of the steels' applicability depending on the solution concentration.

Key words: corrosion, austenitic steels, pitting, chlorides, potentiodynamic studies, critical pitting temperature, seawater.