

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕРЖАВЕЮЩИХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ И КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ В ГОРЯЧЕЙ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ СЕРНОЙ КИСЛОТЕ

С.Е. Золотухин

А.Ю. Курбатов

М.А. Ветрова

В.Н. Грунский

zolutukhin.s.e@muctr.ru

kurbatov.a.i@muctr.ru

vetrova.m.a@muctr.ru

grunskii.v.n@muctr.ru

РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследованиям процессов коррозии, протекающих на контактных поверхностях технологического оборудования, работающего в крайне агрессивных средах (температура, едкие реагенты), уделяется все больше внимания. Выход подобного оборудования из строя чреват не только существенными экономическими потерями, но и возможными человеческими жертвами и серьезными экологическими последствиями. Для предотвращения коррозии оборудования применяют материалы на основе никеля, при этом фундаментальных исследований коррозии в настоящее время не представлено, что обуславливает актуальность выполненной работы. В рамках экспериментов получены данные по коррозионной стойкости нержавеющей хромоникелевых сталей и коррозионно-стойких никелевых сплавов в процессе производства серной кислоты по технологии двойной контакт–двойная адсорбция. Установлено, что с повышением концентрации серной кислоты (97,6...100 % (масс.)) скорость коррозии снижается нелинейно с минимумом при концентрации серной кислоты 99,6 % (масс.). Экспериментально установлено, что скорость коррозии никельсодержащих материалов в технологических условиях не превышает 0,1 мм/год, что, в свою очередь, может быть использовано для расчета срока службы, а также разработки графиков технического обслуживания и ремонта системы. Доказано, что основной вклад в массопотери металлических конструкций вносит электрохимическая коррозия

Ключевые слова

Горячая адсорбция, электрохимическая коррозия, нержавеющие хромоникелевые стали, коррозионно-стойкие никелевые сплавы, производство серной кислоты

Поступила 10.02.2023

Принята 19.05.2023

© Автор(ы), 2023

Введение. Валовые потери металла в результате процессов коррозии могут достигать 12 % общего объема фонда металлов [1–5]. Процессы коррозии могут возникать в результате контакта металла с компонентами окружающей среды, например, коррозия, возникающая вследствие контакта трубопроводов и емкостей с грунтом, атмосферой или водой (в том числе за счет процессов биообрастания и биокоррозии) [4–7]. Гораздо более сложный процесс — технологическая коррозия оборудования. Наглядный пример технологической коррозии — коррозия оборудования за счет контакта с агрессивными средами (оборудование металлургического, химического и нефтехимического комплекса) [8] или коррозия металлического оборудования, предназначенного для реализации процессов с использованием высококоррозионных реагентов (производство и хранение кислот, щелочей и пр.) [9].

Вопросам защиты от коррозии посвящено огромное число научных работ и исследований [10–17]. Процессы защиты от коррозии могут включать в себя применение специальных покрытий, электрохимической защиты, ингибиторов коррозии в тех случаях, где это предусмотрено технологическим регламентом (химическая обработка воды) [16–18].

Вопрос защиты от коррозии технологического оборудования, работающего в агрессивных средах, является более сложным и требует применения дорогостоящих материалов. Для решения поставленной задачи широко используют высоколегированные стали и в первую очередь стали с высоким содержанием никеля [15, 19]. В качестве альтернативы могут быть применены титановые сплавы. Однако ввиду отсутствия доступных сырьевых источников стоимость оборудования существенно возрастает [20, 21].

Стали и сплавы на основе никеля широко распространены в химической и нефтехимической промышленности, в частности в процессах, включающих работу с концентрированной серной кислотой [19, 22–24].

Разработкой процессов дополнительного повышения коррозионной стойкости никельсодержащих конструкционных материалов занималось множество научных коллективов по всему миру [25], при этом большая часть исследований посвящена процессам микролегирования материалов редкоземельными металлами. Показана высокая перспективность указанного процесса защиты от коррозии, однако относительно скудные запасы редкоземельных металлов, неравномерно распределенных по всему миру, и монополизация их рынка Китаем оказывает существенное влияние на стоимость получаемого материала и изделий из него [26].

Цель работы — оценка коррозионной устойчивости нержавеющей хромоникелевых сталей и коррозионно-стойких никелевых сплавов при

контакте с горячей концентрированной серной кислотой. Полученные данные имеют высокую практическую значимость, поскольку позволят прогнозировать скорость коррозии и износа оборудования таких крупнотоннажных химических процессов, как производство контактной серной кислоты.

Материалы и методы исследования. Разрозненные данные по коррозионному «поведению» высоколегированных нержавеющей хромоникелевых сталей и коррозионно-стойких никелевых сплавов в растворах серной кислоты приведены в [27, 28]. Однако представленные данные носят отрывочный характер и выполнены на экспериментальных образцах сталей, не используемых на территории Российской Федерации.

В качестве экспериментальных образцов нержавеющей хромоникелевых сталей и коррозионно-стойких никелевых сплавов на базе ЦНИИЧермет и Электростальского завода тяжелого машиностроения получены образцы типовых высоколегированных сталей, выпускаемых отечественной промышленностью. Для испытаний выбраны следующие образцы: 12X18H10T; 08X22H6T; 06X23H28M3Д3T; 03X15H25M3Д3C3; 03X15H40M8Д2Б; 03X15H40M3Д2C3Б; 10X17H13M2T; Ст20.

Испытания образцов проводили согласно разработанной и утвержденной методике, выдерживая образцы в стационарных условиях, заданных экспериментом. Условия экспонирования образцов высоколегированных сталей выбирали, исходя из требований технологического режима процесса, в котором теплота образования паровой фазы серной кислоты в конверсионном газе триоксида серы и теплота абсорбции SO_3 серной кислотой извлекаются за счет передачи теплоты от абсорбционной кислоты (производство серной кислоты): концентрация серной кислоты изменялась в пределах 98,4...100 % (масс.) H_2SO_4 , температура — 120...200 °C [29, 30].

Элементный состав образцов определяли с использованием сканирующего электронного микроскопа *JEOL1610LV* (JEOL, Япония;) с энергодисперсионным спектрометром *SSD X-MaxIncaEnergy* (Oxford Instruments, Великобритания). Потери металла от процесса коррозии определяли гравиметрическим методом.

Результаты и их обсуждение. В настоящее время при производстве серной кислоты по технологии двойной контакт–двойная абсорбция (ДК–ДА) применяют технологические процессы, в которых абсорбер SO_3 и охладитель абсорбционной кислоты могут работать для нагрева охлаждающей жидкости до температуры более 120 °C, сохраняя концентрацию потока серной кислоты, выходящей из абсорбера на уровне не менее

98,5 % (предпочтительно 99 % или более). Извлечение теплоты абсорбции в теплообменнике проводят на специальном теплообменнике, поверхности которого смачиваются кислотой и изготовлены из специализированных Fe/Cr-сплавов [29, 30].

На первом этапе экспериментов выполнена оценка коррозионной стойкости образцов сталей в серной кислоте различной концентрации при повышенной температуре и экспозиции 70 ч. Полученные в результате эксперимента данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Скорость коррозии П сталей (мм/год) в зависимости от концентрации и температуры серной кислоты

Материал	Температура, °С					
	120		160		200	
	Концентрация серной кислоты, % (масс.)					
	100	98,4	99,2	98,5	99,2	99,6
12X18H10T	0,054	0,11	0,09	0,25	0,11	0,050
08X22H6T	–	–	–	–	–	0,095
06X23H28M3Д3Т	–	–	–	0,31	0,12	0,063
03X15H25M3Д3С3	–	–	–	0,23	–	–
03X15H40M8Д2Б	–	–	–	0,14	–	–
03X15H40M3Д2С3Б	–	–	–	0,10	–	–
10X17H13M2Т	0,047	0,10	–	–	–	–
Ст20	–	–	38,30	–	–	–

Данные из табл. 1 показывают крайне низкую скорость коррозии выбранных образцов никельсодержащих сталей и подтверждают возможность использования аустенитных нержавеющей сталей для концентрированных растворов горячей серной кислоты. Следует отметить, что представленные данные показывают только скорость коррозии и не позволяют прогнозировать изменение прочностных или технологических характеристик материалов (например, свариваемости).

Согласно представленным данным, химический состав выбранных образцов незначительно влияет на скорость коррозии, ввиду этого для дальнейших исследований выбран образец стали 12X18H10T как наиболее дешевый и распространенный.

Для обоснования выбора минимального достаточного времени экспозиции образцов, при котором можно получить результаты, удовлетворяющие требованиям к масштабированию и воспроизводимости, проведены исследования зависимости скорости коррозии образцов стали 12Х18Н10Т от времени (табл. 2).

Таблица 2

Скорость коррозии П стали 12Х18Н10Т (мм/год) в зависимости от времени экспозиции в серной кислоте (температура 200 °С)

Время экспозиции, ч	Концентрация серной кислоты, % (масс.)		
	98,8	99,3	99,7
5	1,76	–	0,34
15	1,31	0,11	–
25	–	–	0,13
40	0,85	0,10	–
70	–	–	0,07
150	0,26	–	0,05
250	0,21	0,12	–
300	0,21	–	0,05
400	0,19	0,12	–

Согласно представленным данным, значения скорости коррозии образцов выходят на установившийся режим в диапазоне значений времени 150...250 ч, при этом с учетом погрешности экспериментов (10 %) можно полагать достаточным временем экспозиции 150 ч. Для дальнейших экспериментов время экспозиции составляло 130...150 ч. Полученные результаты хорошо согласуются с данными из [23], где минимальное время экспозиции образцов для дальнейшего масштабирования рассчитывалось по формуле $K\Delta\tau < 10\,000$, где K — скорость коррозии, мг/(дм²·сут) (массовый показатель); $\Delta\tau$ — время испытаний, ч.

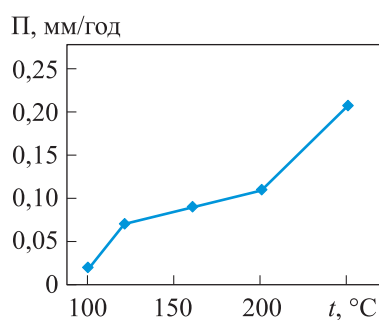
В рамках дальнейшего эксперимента принято решение о расширении диапазона температуры и концентрации серной кислоты, а также исследовано влияние «движения» агрессивной среды. Перемещение жидкой фазы создавалось за счет насосного эффекта мешалки, расположенной соосно в отрезке трубы из исследуемого материала. Скорость вращения мешалки 2500 мин⁻¹, что позволило получить линейную скорость потока кислоты в исследуемом отрезке трубы около 1 м/с. Результаты исследо-

вания коррозионной стойкости стали 12Х18Н10Т приведены в табл. 3, а для визуализации основных закономерностей отдельные эксперименты представлены в виде графиков (рисунок).

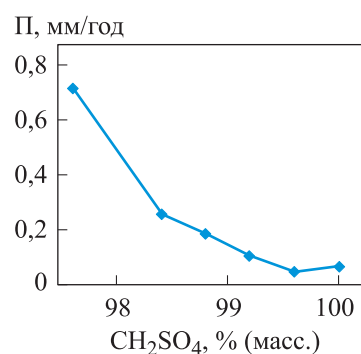
Таблица 3

Скорость коррозии П стали 12Х18Н10Т (мм/год) в зависимости от температуры и концентрации серной кислоты

Температура, °С	C(H ₂ SO ₄), % (масс.)					
	97,6	98,4	98,8	99,2	99,6	100,0
100	–	–	–	0,02	0,007	–
120	–	0,13	–	0,07	–	0,054
120	–	0,12	–	0,07	–	–
160	–	0,11	–	0,09	–	0,030
160	–	0,13*	–	0,14*	–	0,030*
200	0,72	0,26	0,19	0,11	0,050	0,070
200	–	–	–	–	–	0,10*
250	–	–	–	0,21	0,310	0,250



а



б

Зависимости скорости коррозии от температуры в 99,2 % (масс.) серной кислоты (а) и от массовой концентрации серной кислоты (б) при температуре 200 °С

Сопоставляя экспериментальные данные (см. табл. 2 и 3), приходим к выводу, что движение агрессивной среды практически не влияет на скорость коррозии. Согласно зависимости на рисунке а, температура оказывает прямое влияние на скорость коррозии, существенно ускоряя процесс. В соответствии с зависимостью на рисунке б по мере увеличения концентрации кислоты скорость коррозии снижается. В первую очередь это яв-

ление объясняется механизмом процесса электрохимической коррозии, включающим в себя доставку и отвод реагентов из зоны реакции и электродную реакцию.

Перенос массы в единицу времени и через единицу поверхности на первой стадии описывается уравнением $m/s = -DC/\delta$, где D — коэффициент диффузии; C/δ — градиент концентрации. Коэффициент диффузии серной кислоты в воде при температуре 25 °С $D_{25} = 1,97 \cdot 10^{-5}$ см/с, при температуре 200 °С $D_{200} = D_{25} \cdot 473/298$ см/с.

Предположим, что концентрация кислоты на поверхности образца равна нулю, тогда $C = -1,83/98 = -2 \cdot 10^{-2}$ моль/см³.

Принимаем, что на второй стадии $\Pi = 0,5$ мм/год (максимальная скорость коррозии для материалов, рекомендуемых к использованию в химическом производстве). Следовательно, $m/s = \Pi\rho/(8760M)$, где ρ — плотность материала, г/см³; 8760 — число часов в году; M — молекулярная масса материала, г/моль.

Исходя из этого и принимая, что в основном реагирует железо, т. е. $M = 56$ г/моль, определяем $m/s = 2,6 \cdot 10^{-6}$ моль/см². Откуда можно рассчитать, какой должна быть толщина диффузионного слоя, чтобы скорость передачи массы на обеих стадиях была одинаковой $\delta = -DC/(m/s) = 10$ см.

Такое большое значение толщины диффузионного слоя невозможно. Это свидетельствует о лимитирующем механизме электрохимической коррозии, наблюдаемом для стали 12X18H10T в серной кислоте при заданных условиях.

Заключение. Экспериментальные данные по коррозионной стойкости высоколегированных аустенитных сталей, в частности стали 12X18H10T, в процессах производства серной кислоты по технологии ДК–ДА позволяют сделать следующие выводы.

С повышением концентрации серной кислоты в исследованном диапазоне значений 97,6...100 % (масс.) скорость коррозии (массовый показатель) конструкционных материалов снижается нелинейно с минимумом при концентрации 99,6 % (масс.). Уменьшение скорости коррозии (массовый показатель) наблюдается для всех исследованных значений температуры за исключением 250 °С. При этой температуре и концентрации серной кислоты 99,6 % (масс.) имеет место небольшой максимум скорости коррозии. Однозначность характера изменения скорости коррозии от концентрации серной кислоты при всех других значениях температуры позволяет рекомендовать рабочие концентрации серной кис-

лоты с позиции минимизации коррозионных потерь в интервале концентрации серной кислоты 98,4...100 % (масс.). В указанном интервале при всех значениях температуры, за исключением 250 °С, скорость коррозии легированных сталей составляет примерно 0,1 мм/год.

В выбранных диапазонах значений рабочей температуры и концентрации серной кислоты общая скорость коррозии не превышает 0,1 мм/год. С позиции коррозионной стойкости оборудования опасным является снижение концентрации серной кислоты ниже значения 98,4 % (масс.).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Красная Е.Г., Таранцева К.Р., Фирсова О.В. Оценка экологического ущерба вследствие коррозионного разрушения оборудования. *Молодежь. Наука. Инновации. Сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. интернет-конф.* Пенза, Пенз. гос. техн. акад., 2015, с. 4.
- [2] Кузин Е.Н., Аверина Ю.М., Курбатов А.Ю. и др. Технология безреагентного обезжелезивания артезианской воды для нужд оборотного водоснабжения металлургических предприятий. *Черные металлы*, 2020, № 10, с. 66–71.
- [3] Kurbatov A., Kuzin E., Vetrova M., et al. Technology of non-reagent water treatment of natural fresh waters for the technological needs of metallurgical enterprises. *Proc. 30th Anniversary Int. Conf. on Metallurgy and Materials*, 2021, pp. 127–132. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4077>
- [4] Колесникова Н.Н., Луканина Ю.К., Хватов А.В. и др. Биологическая коррозия металлических конструкций и защита от нее. *Вестник Казанского технологического университета*, 2013, т. 16, № 1, с. 170–174.
- [5] Мальцева Г.Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии. Пенза, Изд-во ПГУ, 2000.
- [6] Каландаров Н.О., Гойибова Д.Ф. Влияние коррозии на прочность оборудования. *Молодой ученый*, 2016, № 9, с. 171–173.
- [7] Новоселова Е.А., Ивахнюк Г.К. Выбор коррозионно-стойких сталей и сплавов на основе железа для предотвращения чрезвычайных ситуаций, вызванных коррозией нефтепроводов. *Техносферная безопасность*, 2021, № 2, с. 11–20.
- [8] Подопригора А.А. Исследование коррозионного разрушения поверхностей нефтепроводов после длительной эксплуатации. *Вестник Югорского государственного университета*, 2011, № 4, с. 105–112.
- [9] Рахимов Р.Х., Ермаков В.П., Рахимов М.Р. и др. Обеспечение безопасности хранения серной кислоты. *Computational Nanotechnology*, 2016, № 3, с. 183–195.
- [10] Singh H., Kumar S., Kumar R. Overview of corrosion and its control: a critical review. *Proc. Eng. Sci.*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 13–24. DOI: <http://dx.doi.org/10.24874/PES03.01.002>

- [11] Akhtar J. A review on corrosion protection of iron and steel. *Recent Pat. Corros. Sci.*, 2013, vol. 3, iss. 2, pp. 79–147.
DOI: <https://doi.org/10.2174/22106839113036660008>
- [12] Qian Y., Li Y., Jungwirth S., et al. The application of anti-corrosion coating for preserving the value of equipment asset in chloride-laden environments: a review. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2015, vol. 10, iss. 12, pp. 10756–10780.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)11298-3](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)11298-3)
- [13] Cicek V. Corrosion engineering and cathodic protection handbook. Wiley, 2017.
- [14] Филимонова В.А., Харчевникова Е.О. Защита металлов от коррозии. *Вологодские чтения*, 2009, № 76, с. 128–129.
- [15] Перельгин Ю.П., Лось И.С., Киреев С.Ю. Коррозия и защита металлов от коррозии. Пенза, Изд-во ПГУ, 2012.
- [16] Abrashov A.A., Grigoryan N.S., Vagramyan T.A., et al. Development of a process for applying cerium-containing protective coatings to alloy steel. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2020, vol. 56, no. 7, pp. 1311–1314. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205120070023>
- [17] Abrashov A.A., Grigoryan N.S., Vagramyan T.A., et al. Durable light-absorbing coatings for structural steels. *CIS Iron Steel Rev.*, 2020, vol. 19, no. 1, pp. 71–74.
DOI: <https://doi.org/10.17580/cisisr.2020.01.14>
- [18] Козлова Л.С., Сибилева С.В., Чесноков Д.В. и др. Ингибиторы коррозии (обзор). *Авиационные материалы и технологии*, 2015, № 2, с. 67–75.
- [19] Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Коррозия и коррозионно-стойкие сплавы. М., Металлургия, 1973.
- [20] Liu J., Alfantazi A., Asselin E. A new method to improve the corrosion resistance of titanium for hydrometallurgical applications. *Appl. Surf. Sci.*, 2015, vol. 332, pp. 480–487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.140>
- [21] Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е., Фадеев А.Б. и др. Принципы пирогидрометаллургической переработки кварц-лейкоксенового концентрата с формированием фазы псевдобрукита. *Обогащение руд*, 2021, № 3, с. 33–38.
DOI: <https://doi.org/10.17580/or.2021.03.06>
- [22] Li Y., Ives M.B., Coley K.S., et al. Corrosion of nickel-containing stainless steel in concentrated sulphuric acid. *Corros. Sci.*, 2004, vol. 46, iss. 8, pp. 1969–1979.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2003.10.017>
- [23] Jones S.A., Coley K.S., Kish J.R., et al. Corrosion of nickel-containing stainless-steel in concentrated sulfuric acid: potential oscillations predicted by combination of kinetic phenomena. *J. Electrochem. Soc.*, 2013, vol. 160, no. 8, pp. 326–335.
DOI: <https://doi.org/10.1149/2.027308jes>
- [24] Chang J.H., Chou J.M., Hsieh R.I., et al. Corrosion behaviour of vacuum induction-melted Ni-based alloy in sulphuric acid. *Corros. Sci.*, 2010, vol. 52, iss. 7, pp. 2323–2330.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.03.026>

- [25] Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Луцкая С.А. Методы повышения коррозионной стойкости жаропрочных никелевых сплавов (обзор). *Труды ВИАМ*, 2018, № 4. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-4-3-8>
- [26] Кондратьев В.Б. Глобальный рынок редкоземельных металлов. *Горная промышленность*, 2017, № 4, с. 48–54.
- [27] Renner M. Hochlegierte Austenite für die Anwendung in Ruherder und bewegter hochkonzentrierter Schwefelsäure (>95 %). *Werkst. Korros.*, 1987, no. 4-S, pp. 191–194.
- [28] McAlister D.R., Corey A.G., Ewing L.J. Economically recovering sulphuric acid heat. *Chem. Eng. Prog.*, 1986, vol. 82, no. 7, pp. 34–38.
- [29] Амелин А.Г., Семенов Г.М., Золотухин С.Е. и др. Способ получения серной кислоты из сероводорода. Патент СССР 1198000. Заявл. 30.12.1983, опубл. 15.12.1985.
- [30] Вера-Кастанеда Э. Извлечение теплоты абсорбции триоксида серы. Патент РФ 2672113. Заявл. 14.03.2014, опубл. 12.11.2018.

Золотухин Сергей Егорович — канд. техн. наук, доцент кафедры общей химической технологии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Курбатов Андрей Юрьевич — канд. техн. наук, ассистент кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Ветрова Маргарита Александровна — аспирантка, ассистент кафедры логистики и экономической информатики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Грунский Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой общей химической технологией РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Золотухин С.Е., Курбатов А.Ю., Ветрова М.А. и др. Исследование коррозионной стойкости нержавеющей хромоникелевых сталей и коррозионно-стойких никелевых сплавов в горячей концентрированной серной кислоте. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 6 (111), с. 83–96.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-6-83-96>

STUDYING CORROSION RESISTANCE IN STAINLESS CHROME-NICKEL STEELS AND CORROSION-RESISTANT NICKEL ALLOYS EXPOSED TO THE HOT CONCENTRATED SULFURIC ACID

S.E. Zolotukhin
A.Yu. Kurbatov
M.A. Vetrova
V.N. Grunsky

zolotukhin.s.e@muctr.ru
kurbatov.a.i@muctr.ru
vetrova.m.a@muctr.ru
grunskii.v.n@muctr.ru

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
Moscow, Russian Federation

Abstract

More and more attention is being paid to studying corrosion processes occurring on the contact surfaces of technological equipment operating in the extremely aggressive environments (temperature and caustic reagents). The failure of such equipment is causing not only serious economic losses, but also possible casualties and serious ecological consequences. To prevent equipment corrosion, the nickel-based materials are used, but fundamental corrosion studies were currently not presented, which determined relevance of the presented work. As part of the experiments, data were obtained on corrosion resistance of stainless chrome-nickel steels and corrosion-resistant nickel alloys within the sulfuric acid production process using the double contact–double adsorption (DC–DA) technology. It was established that with increasing concentration of the sulfuric acid (97.6–100 % (wt.)), the corrosion rate decreased nonlinearly with the minimum at the sulfuric acid concentration of 99.6 % (wt.). It was experimentally determined that corrosion rate of the nickel-containing materials under technological conditions was not exceeding 0.1 mm/g, which in turn could be used to calculate the service life, as well as to develop schedules for maintenance and repair of a system. It was proven that the main contribution to mass loss in metal structures was caused by the electrochemical corrosion

Keywords

Hot adsorption, electrochemical corrosion, stainless chrome-nickel steels, corrosion-resistant nickel alloys, sulfuric acid production

Received 10.02.2023
Accepted 19.05.2023
© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Krasnaya E.G., Tarantseva K.R., Firsova O.V. [Evaluation of environmental damage due to corrosion damage to equipment]. *Molodezh. Nauka. Innovatsii. Sb. st. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. internet-konf.* [Youth. Science. Innovations. Proc. XI Int. Sci.-Pract. Internet Conf.]. Penza, Penza State Technical Academy Publ., 2015, p. 4 (in Russ.).
- [2] Kuzin E.N., Averina Yu.M., Kurbatov A.Yu., et al. Technology of non-reagent deferrization of artesian water for the needs of recycling water supply of metallurgical enterprises. *Chernye metally*, 2020, no. 10, pp. 66–71 (in Russ.).
- [3] Kurbatov A., Kuzin E., Vetrova M., et al. Technology of non-reagent water treatment of natural fresh waters for the technological needs of metallurgical enterprises. *Proc. 30th Anniversary Int. Conf. on Metallurgy and Materials*, 2021, pp. 127–132.
DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4077>
- [4] Kolesnikova N.N., Lukanina Yu.K., Khvatov A.V., et al. Biological corrosion of metal structures and protection against her. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2013, vol. 16, no. 1, pp. 170–174 (in Russ.).
- [5] Maltseva G.N. Korroziya i zashchita oborudovaniya ot korrozii [Corrosion and protection of equipment from corrosion]. Penza, PSU Publ., 2000.
- [6] Kalandarov N.O., Goyibova D.F. Effect of corrosion on the strength of equipment. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2016, no. 9, pp. 171–173 (in Russ.).
- [7] Novoselova E.A., Ivakhnyuk G.K. Selection of corrosion resistant steels and iron-based alloys to reduce damage from corrosion of oil pipelines. *Tekhnosfernaya bezopasnost* [Technosphere Safety], 2021, no. 2, pp. 11–20 (in Russ.).
- [8] Podoprigora A.A. The research of corrosion damages on the surface of oil pipeline after a long-term exploitation. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta* [Yugra State University Bulletin], 2011, no. 4, pp. 105–112 (in Russ.).
- [9] Rakhimov R.Kh., Ermakov V.P., Rakhimov M.R., et al. Safety of storage of sulfuric acid. *Computational Nanotechnology*, 2016, no. 3, pp. 183–195 (in Russ.).
- [10] Singh H., Kumar S., Kumar R. Overview of corrosion and its control: a critical review. *Proc. Eng. Sci.*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 13–24.
DOI: <http://dx.doi.org/10.24874/PES03.01.002>
- [11] Akhtar J. A review on corrosion protection of iron and steel. *Recent Pat. Corros. Sci.*, 2013, vol. 3, iss. 2, pp. 79–147.
DOI: <https://doi.org/10.2174/22106839113036660008>
- [12] Qian Y., Li Y., Jungwirth S., et al. The application of anti-corrosion coating for preserving the value of equipment asset in chloride-laden environments: a review. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2015, vol. 10, no. 12, pp. 10756–10780.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)11298-3](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)11298-3)

- [13] Cicek V. Corrosion engineering and cathodic protection handbook. Wiley, 2017.
- [14] Filimonova V.A., Kharchevnikova E.O. Protection of metals from corrosion. *Vologdinskije chteniya*, 2009, no. 76, pp. 128–129 (in Russ.).
- [15] Perelygin Yu.P., Los I.S., Kireev S.Yu. Korroziya i zashchita metallov ot korrozii [Corrosion and protection of metals from corrosion]. Penza, PSU Publ., 2012.
- [16] Abrashov A.A., Grigoryan N.S., Vagramyan T.A., et al. Development of a process for applying cerium-containing protective coatings to alloy steel. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2020, vol. 56, no. 7, pp. 1311–1314.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205120070023>
- [17] Abrashov A.A., Grigoryan N.S., Vagramyan T.A. et al. Durable light-absorbing coatings for structural steels. *CIS Iron Steel Rev.*, 2020, vol. 19, no. 1, pp. 71–74.
DOI: <https://doi.org/10.17580/cisirs.2020.01.14>
- [18] Kozlova L.S., Sibileva S.V., Chesnokov D.V., et al. Corrosion inhibitors (review). *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 2, pp. 67–75 (in Russ.).
- [19] Tomashov N.D., Chernova G.P. Korroziya i korrozionnostoykie splavy [Corrosion and corrosion-resistant alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973.
- [20] Liu J., Alfantazi A., Asselin E. A new method to improve the corrosion resistance of titanium for hydrometallurgical applications. *Appl. Surf. Sci.*, 2015, vol. 332, pp. 480–487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.140>
- [21] Kuzin E.N., Kruchinina N.E., Fadeev A.B., et al. Principles of pyro-hydrometallurgical processing of quartz-leucosene concentrate with the formation of a pseudobrukite phase. *Obogashchenie rud*, 2021, no. 3, pp. 33–38 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.17580/or.2021.03.06>
- [22] Li Y., Ives M.B., Coley K.S., et al. Corrosion of nickel-containing stainless steel in concentrated sulphuric acid. *Corros. Sci.*, 2004, vol. 46, iss. 8, pp. 1969–1979.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2003.10.017>
- [23] Jones S.A., Coley K.S., Kish J.R., et al. Corrosion of nickel-containing stainless-steel in concentrated sulfuric acid: potential oscillations predicted by combination of kinetic phenomena. *J. Electrochem. Soc.*, 2013, vol. 160, no. 8, pp. 326–335.
DOI: <https://doi.org/10.1149/2.027308jes>
- [24] Chang J.H., Chou J.M., Hsieh R.I., et al. Corrosion behaviour of vacuum induction-melted Ni-based alloy in sulphuric acid. *Corros. Sci.*, 2010, vol. 52, iss. 7, pp. 2323–2330.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.03.026>
- [25] Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Lutsкая S.A. Ways of increasing corrosion resistance of superalloys (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018, no. 4 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-4-3-8>
- [26] Kondratyev V.B. Global market of rare-earth metals. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry Journal], 2017, no. 4, pp. 48–54 (in Russ.).

- [27] Renner M. Hochlegierte Austenite für die Anwendung in Ruherder und bewegterhochkonzentrierter Schwefelsäure (>95 %). *Werkst. Korros.*, 1987, no. 4-S, pp. 191–194.
- [28] McAlister D.R., Corey A.G., Ewing L.J. Economically recovering sulphuric acid heat. *Chem. Eng. Prog.*, 1986, vol. 82, no. 7, pp. 34–38.
- [29] Amelin A.G., Semenov G.M., Zolotukhin S.E., et al. Sposob polucheniya sernoy kisloty iz serovodoroda [Method for producing sulfuric acid from hydrogen sulfide]. Patent SU 1198000. Appl. 30.12.1983, publ. 15.12.1985 (in Russ.).
- [30] Vera-Kastaneda E. Izvlechenie teploty absorptsii trioksida sery [Recovery of sulfur trioxide heat of absorption]. Patent RF 2672113. Appl. 14.03.2014, publ. 12.11.2018 (in Russ.).

Zolotukhin S.E. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of General Chemical Technology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Kurbatov A.Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Lecturer, Department of Innovative Materials and Protection Against Corrosion, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Vetrova M.A. — Post-Graduate Student, Assistant Lecturer, Department of Logistics and Economic Informatics, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Grunsky V.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of General Chemical Technology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Zolotukhin S.E., Kurbatov A.Yu., Vetrova M.A., et al. Studying corrosion resistance in stainless chrome-nickel steels and corrosion-resistant nickel alloys exposed to the hot concentrated sulfuric acid. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 6 (111), pp. 83–96 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-6-83-96>