

Научно-исследовательский журнал «**Chemical Bulletin**»

<https://cb-journal.ru>

2026, Том 9, № 1 / 2026, Vol. 9, Iss. 1 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 620.193.4

DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-1-2

Влияние технологических параметров производства хлорида калия на коррозионно-абразивный износ дуплексной стали 1.4462

¹ Наумович П.Н.,

¹ ООО «Проектная организация УМКА», г. Солигорск, Республика Беларусь,

* Ответственный автор E-mail: naumovich@umkapro.by

Аннотация: в работе представлены результаты лабораторных исследований коррозионно-абразивного износа шнекового растворителя из дуплексной стали 1.4462 в среде, моделирующей условия производства хлорида калия (4РУ ОАО «Беларуськалий»). Экспериментально изучено влияние механических примесей (абразива), температуры (105 °С), pH (4-8), искусственной подачи воздуха и режима неполного погружения. Установлено, что наличие абразива увеличивает скорость потери массы в 10 раз (до 0,015 г/сутки) по сравнению с чисто химической коррозией [2]. Наиболее интенсивное язвенное (питтинговое) поражение наблюдается в зонах с доступом кислорода. Щелочная среда (pH= 8) способствует образованию защитных отложений, а кислая (pH= 4-7) интенсифицирует коррозию [7]. Работа оборудования с неполным погружением мешалки увеличивает скорость коррозии на 40 % [2, 9]. Дуплексная сталь 1.4462 проявляет высокую стойкость к химической коррозии, но ее ресурс резко снижается при совместном воздействии абразива и нештатных режимов эксплуатации [2, 20]. Даны практические рекомендации для продления срока службы оборудования.

Ключевые слова: дуплексная сталь 1.4462, коррозионно-абразивный износ, хлорид калия, питтинг, щелевая коррозия, водородный показатель, абразив

Для цитирования: Наумович П.Н. Влияние технологических параметров производства хлорида калия на коррозионно-абразивный износ дуплексной стали 1.4462 // Chemical Bulletin. 2026. Том 9. № 1. 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-1-2

Поступила в редакцию: 9 августа 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 12 ноября 2025 г.; Принята к публикации: 8 января 2026 г.

Influence of technological parameters of potassium chloride production on corrosion-abrasive wear of double-layer steel 1.4462

¹ Naumovich P.N.,

¹ LLC "UMKA Design Organization", Soligorsk, Republic of Belarus,

* Corresponding author E-mail: naumovich@umkapro.by

Abstract: the paper presents the results of laboratory studies of corrosion-abrasive wear of a screw dissolver made of duplex steel 1.4462 in an environment simulating potassium chloride production conditions (4RU of JSC "Belaruskali"). The influence of mechanical impurities (abrasive), temperature (105 °C), pH (4-8), artificial air supply, and incomplete immersion mode was experimentally studied. It has been established that the presence of abrasive increases the mass loss rate by 10 times (up to 0,015 g/day) compared to purely chemical corrosion [2]. The most intense pitting damage is observed in areas with oxygen access. An alkaline environment (pH= 8) promotes the formation of protective deposits, while an acidic one (pH= 4-7) intensifies corrosion [7]. Equipment op-

eration with incomplete immersion of the agitator increases the corrosion rate by 40 % [2, 9]. Duplex steel 1.4462 shows high resistance to chemical corrosion, but its service life is sharply reduced under the combined influence of abrasive and non-standard operating conditions [2, 20]. Practical recommendations for extending equipment service life are given.

Keywords: duplex steel 1.4462, corrosion-abrasive wear, potassium chloride, pitting, crevice corrosion, pH, abrasive

For citation: Naumovich P.N. Influence of technological parameters of potassium chloride production on corrosion-abrasive wear of double-layer steel 1.4462. Chemical Bulletin. 2026. 9 (1). 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-1-2

The article was submitted: August 9, 2025; Approved after reviewing: November 12, 2025; Accepted for publication: January 8, 2026.

Введение

Оборудование галургических производств, в частности, по выпуску хлорида калия, работает в условиях воздействия высокоагрессивных сред: концентрированных растворов хлоридов натрия, калия, кальция и механических примесей, содержащихся в силвинитовой руде. Эти факторы приводят к комплексному коррозионно-механическому износу, снижающему ресурс узлов и увеличивающему эксплуатационные затраты [12, 19]. Особую опасность представляет синергетический эффект от совместного воздействия химической агрессии и механического истирания [3, 13].

Шнековые растворители, изготавливаемые из дуплексных (аустенитно-ферритных) сталей, в частности марки 1.4462 (UNS S32205), широко применяются благодаря их высокой прочности и коррозионной стойкости в хлоридсодержащих средах [17]. Однако даже такие материалы подвержены деградации при длительном воздействии совокупности агрессивных факторов: высокой температуры, переменного химического состава, механического истирания и переменной аэрации [6, 8, 9, 18].

Целью данной работы являлось экспериментальное изучение влияния ключевых технологических параметров производства хлорида калия на скорость и механизмы коррозионно-абразивного износа дуплексной стали 1.4462. Для достижения цели решались следующие задачи: 1) моделирование рабочей среды и лабораторных условий испытаний; 2) количественная и качественная оценка износа при наличии абразива; 3) анализ влияния температуры и pH; 4) исследование эффекта искусственной аэрации; 5) изучение интенсификации коррозии в режиме неполного погружения.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования служил лабораторный прототип мешалки шнекового растворителя, изготовленный из дуплексной стали 1.4462. Химический состав материала представлен в табл. 1.

Номинальный химический состав стали 1.4462 (масс. %).

Таблица 1

Nominal chemical composition of steel 1.4462 (wt.%).

Table 1

Содержание элемента в сплаве, масс. %									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0,03	1,0	2,0	0,035	0,015	21,0-23,5	4,5-6,5	2,5-3,5	0,1-0,22	баланс

Метод исследования – лабораторные коррозионные испытания в модельной среде, имитирующей по ионному составу рабочий раствор 4РУ ОАО «Беларуськалий» (табл. 2) [1]. Основные компоненты: KCl, NaCl, MgCl₂, CaCl₂, CaSO₄.

Таблица 2

Состав фаз для приготовления раствора.

Table 2

Phase composition for solution preparation.

Компоненты среды	Твердая фаза, %	Жидкая фаза, %
KCl	26,3	11,7
NaCl	64,3	16,4
MgCl ₂	0,1	2,7
CaCl ₂	0,3	1,3
CaSO ₄	1,2	0,2
нерастворимый осадок	7,0	–
H ₂ O	0,7	67,7

Испытания проводились в стеклянном реакторе объемом 3 л (впоследствии 2 л) с термостатированием при температуре $105,0 \pm 0,3$ °С. Контролируемые переменные: наличие/отсутствие абразива (кварцевый песок), pH среды 4-8, искусственная подача воздуха, уровень погружения образца (полное/неполное). Основным методом оценки износа был гравиметрический анализ (измерение изменения массы образца). Визуальный контроль и фотофиксация состояния поверхности проводились регулярно в течение всего периода испытаний, который составил в общей сложности более 2248 часов.

Результаты и обсуждения

1. Влияние абразивных частиц. Наиболее значительный износ наблюдался при совместном воздействии химически агрессивной среды и механического абразива. За две недели испытаний с абразивом потеря массы составила 0,21 г (0,023 %), что соответствовало скорости 0,015 г/сутки. На поверхности развивались язвенная (питтинг) и щелевая коррозия, особенно в зонах с доступом кислорода и механическими напряжениями (сварные швы). В аналогичных условиях, но без абразива, скорость коррозии была примерно в 10 раз ниже (0,0015 г/сутки), что подтверждает определяющую роль механического фактора в износе (рис. 1, 2) [2].



Рис. 1. Коррозионный износ с использованием абразивных частиц.

Fig. 1. Corrosive wear using abrasive particles.



Рис. 2. Коррозионный износ с использованием абразивных частиц.

Fig. 2. Corrosive wear using abrasive particles.

Полученные данные согласуются с результатами исследований, демонстрирующими, что абразивные частицы разрушают пассивный слой, обнажая свежий металл для химической атаки, и непосредственно вызывают микросрезание материала, приводя к синергетическому ускорению износа [3, 13, 14].

Сравнение скорости коррозии при различных режимах эксплуатации (рис. 3) показывает, что абразив увеличивает скорость коррозии почти в десять раз по сравнению с чисто химическим воздействием раствора.

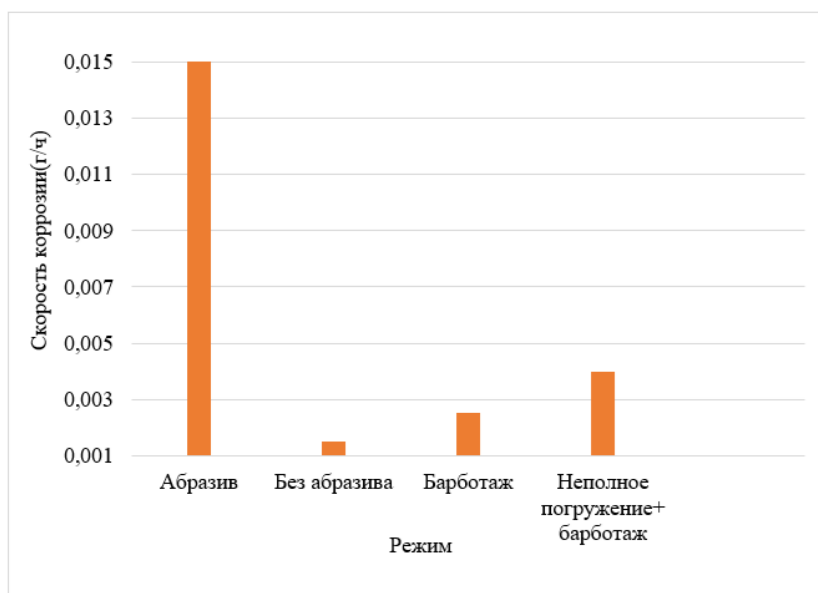


Рис. 3. Диаграмма скорости коррозии при разных режимах.

Fig. 3. Corrosion rate diagram under different conditions.

2. Влияние pH среды. При поддержании pH= 8 на поверхности стали образовывался белый налет карбонатно-сульфатных отложений, который выполнял роль барьерного слоя и приводил к временной стабилизации массы. Этот эффект согласуется с данными о стабилизации пассивной пленки на дуплексных сталях в слабощелочных хлоридных растворах [4, 11]. Снижение pH до нейтрального и кислого диапазона (4-7) активизировало анодные процессы растворения металла, что визуально проявлялось в увеличении количества и глубины питтингов [2].

Современные исследования подтверждают, что кислая среда разрушает пассивный слой на дуплексных сталях, интенсифицируя локальные формы коррозии, особенно в присутствии хлоридов [5, 6, 7]. Влияние pH среды на характер коррозии отражено в табл. 3. При pH= 8 образуется защитный налёт, снижающий интенсивность коррозии, тогда как в кислой среде (pH= 4-7) преобладают язвенные и щелевые повреждения.

Таблица 3

Влияния pH на характер коррозии.

Table 3

Effects of pH on corrosion behavior.

pH	Типы коррозии
4,0	Язвенная, щелевая
6,5	Питтинговая, язвенная, равномерная
7,0	Язвенная, налет, наросты
8,0	Налет, снижение коррозии

3. Влияние искусственной аэрации и неполного погружения. Подача воздуха под лопасть изменяла распределение кислорода, создавая локальные гальванические пары и способствуя развитию коррозии на внутренних поверхностях. Наиболее неблагоприятным режимом оказалось неполное погружение мешалки (уровень раствора на средней лопасти). В зоне границы раздела фаз (вода-воздух) развивалась интенсивная граничная коррозия с образованием глубокой кольцевой канавки (рис. 4).



Рис. 4. Влияние искусственной аэрации и неполного погружения.
Fig. 4. Effect of artificial aeration and partial immersion.

В этих условиях скорость коррозии возросла на 40 % по сравнению с режимом полного погружения, а глубина поражений увеличилась в 1,8 раза [2]. Это связано с концентрированием агрессивных компонентов, усиленным доступом кислорода к ватерлинии и циклическим смачиванием/осушением поверхности, что создает идеальные условия для развития коррозии, вызванной дифференциальной аэрацией [8, 9, 10, 15].

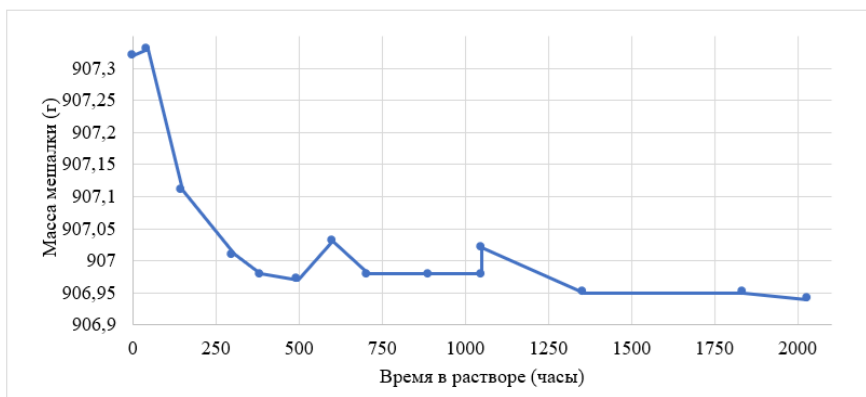


Рис. 5. Изменение массы мешалки во времени.
Fig. 5. Change in the mass of the stirrer over time.

Как показано на рис. 5, масса мешалки постепенно снижается в зависимости от режима эксплуатации и времени нахождения в растворе. Особенно заметна потеря массы при использовании абразива, что подтверждает его ключевую роль в ускорении износа.

Распределение типов коррозии по периодам представлено на рис. 6.

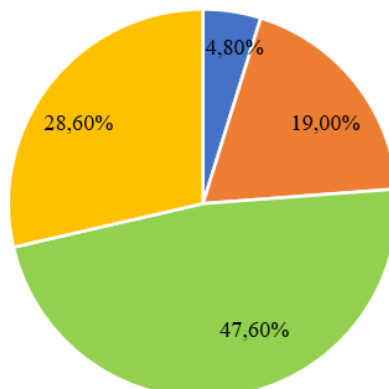


Рис. 6. Круговая диаграмма распределения типов коррозии.
Fig. 6. Circular diagram of distribution of corrosion types.

Наибольшая доля приходится на язвенную коррозию, далее следуют питтинговая и щелевая. Кавитационная эрозия проявляется локально в зоне барботажа.

Связь между изменением массы и визуальными признаками коррозии (налёт, пятна, наросты) представлена на рис. 7.

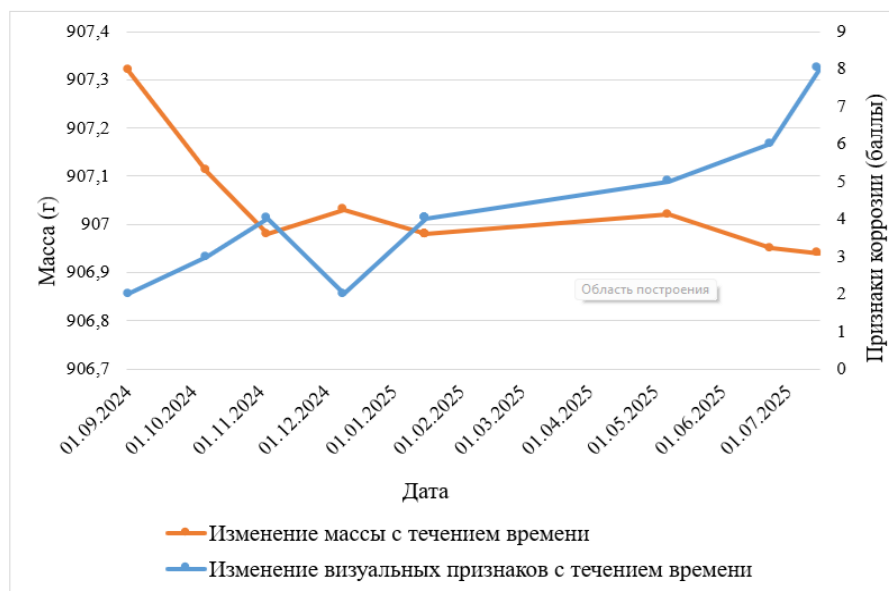


Рис. 7. Комбинированный график массы и признаков коррозии.

Fig. 7. Combined graph of mass and signs of corrosion.

Даже при незначительной потере массы поверхность мешалки может иметь серьёзные локальные повреждения, что подтверждает необходимость комплексного анализа не только гравиметрических данных, но и визуальных наблюдений.

4. Влияние температуры. Температура 105 °С, моделирующая реальный технологический процесс, сама по себе не привела к катастрофической общей коррозии, что подтверждает высокую термодинамическую стабильность, стали 1.4462 в горячих хлоридных растворах. Однако высокая температура действовала как мощный кинетический фактор, ускоряющий все электрохимические и диффузионные процессы, особенно в сочетании с другими негативными факторами (абразив, низкий pH) [2, 6, 18].

Выводы

Проведённые исследования позволили комплексно оценить влияние технологических параметров производства хлорида калия на коррозионно-абразивный износ дуплексной стали 1.4462.

Установлено, что механический фактор (абразивные примеси) является определяющим в деградации материала: скорость коррозии возрастает на порядок по сравнению с чисто химическим воздействием.

Показано, что pH среды играет ключевую роль в формировании защитных или разрушительных процессов: щелочная область способствует пассивации, тогда как кислая и нейтральная активизируют питтинговую и щелевую коррозию.

Выявлено, что неполное погружение мешалки и искусственная аэрация создают условия для локальной граничной коррозии, увеличивая скорость износа на 40% и формируя глубокие повреждения в зоне ватерлинии.

Подтверждено, что дуплексная сталь 1.4462 сохраняет высокую стойкость к химической коррозии при 105 °С, однако её ресурс резко снижается при совмещённом воздействии абразива и нештатных режимов эксплуатации.

Список источников

1. Technological Regulations for Potassium Chloride Production. JSC «Belaruskali». Soligorsk, 2023. 150 p.
2. Naumovich P.N. Research Report on the Influence of the Potassium Chloride Production Process on the Corrosion and Abrasive Wear of a Screw Dissolver Made of Duplex Steel 1.4462. Soligorsk: LLC «Proektnaya organizatsiya UMKA», 2025. 65 p.

3. Zhang Y., Tan H., Wang Z., Li X., Jiang Y. Synergistic erosion-corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel in chloride-sand slurry: Mechanisms and effect of sand concentration // *Wear*. 2022. Vol. 494 – 495, article 204248. P. 1 – 12.
4. Fattah-alhosseini A., Vafaeian S. Passivity of 2205 duplex stainless steel in alkaline solutions with different pH values // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29. P. 1245 – 1253.
5. Alvarez R.B., Martin H.J., Horwat J., Aperador W. The role of pH and chloride concentration on the pitting corrosion of duplex stainless steel. *Electrochimica Acta*, 2019. Vol. 307. P. 362 – 371.
6. Sathler L., Pimenta G.S., da Cunha Belo M. Crevice corrosion of lean duplex stainless steel 2101 in chloride media: Influence of pH and temperature // *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 262, article 120085. P. 1 – 10.
7. Loto R.T. Pitting corrosion evaluation of austenitic and duplex stainless steels in acidic chloride environments // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. No. 3. P. 4219 – 4228.
8. Jiang Y., Xu N., Zhou H., Wang J. Investigation on erosion-corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel under impingement by NaCl solution with sand particles. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 119. article 104981. P. 1 – 13.
9. Tavares S.S.M., Pardal J.M., da Silva, M.R., de Oliveira, C.A.S. Failure analysis of a duplex stainless steel flange in a chloride environment due to crevice and differential aeration corrosion // *Engineering Failure Analysis*, 2019. Vol. 103. P. 308 – 315.
10. Zhou E., Li H., Xu D., Zhang L., Liu C., Wang J., Li Y., Wang F. Accelerated corrosion of 2205 duplex stainless steel caused by marine aerobic *Pseudomonas aeruginosa* biofilm // *Bioelectrochemistry*. 2019. Vol. 123. P. 34 – 41.
11. Ghods P., Isgor O.B., Bensebaa F., Kingston D. Angle-resolved XPS study of carbon steel passivity at different pH values // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 495. article 143562. P. 1 – 9.
12. Bhola S.M., Bhola R., Jain L., Bhola A. Corrosion issues in potassium chloride mining and processing: a review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2021. Vol. 10. No. 3. P. 1024 – 1045.
13. Chen X., Li X., Zhang L., Wang J., Li Y. Synergistic effect of abrasion and corrosion on wear resistance of 2205 duplex stainless steel in simulated seawater with sand // *Tribology International*. 2021. Vol. 155, article 106767. P. 1 – 12.
14. Oskarsson R., Stenvall P., Leffler B. The influence of sand content on erosion-corrosion of stainless steels in seawater // *Wear*. 2022. Vol. 488 – 489. article 204157. P. 1 – 11.
15. Kocijan A., Donik Č., Jenko M. Electrochemical study of the corrosion behaviour of duplex stainless steel in simulated concrete pore solution with chlorides under oxygen diffusion control // *Journal of the Electrochemical Society*. 2020. Vol. 167. No. 8. article 081501. P. 1 – 9.
16. Zhao H., Zhang Z., Zhang H., Hu J., He L. Effect of chloride ion concentration and temperature on the corrosion behavior of duplex stainless steel in simulated concrete pore solutions // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 320. article 126251. P. 1 – 12.
17. Silva C.C., Miranda H.C., Farias J.P., de Albuquerque V.H.C. Microstructure and corrosion resistance of welded joints of duplex stainless steel UNS S32205 // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8. No. 2. P. 2227 – 2236.
18. Wang Q., Zhang B., Qiu S., Li W., Liu Y. Effect of temperature on passive film and pitting corrosion of 2507 super duplex stainless steel in chloride solutions // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 18. P. 2985 – 2997.
19. Kumar S., Sharma C., Gupta P. A review on erosion-corrosion of engineering materials in aggressive slurry environments. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 2022. Vol. 8. No. 1. article 15. P. 15 – 32.
20. Li J., Jiang Y., Wang F. Effect of microstructure on the corrosion and erosion-corrosion behavior of 2507 super duplex stainless steel // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 183. article 109305. P. 109305 – 109315.

References

1. Technological Regulations for Potassium Chloride Production. JSC "Belaruskali". Soligorsk, 2023. 150 p.
2. Naumovich P.N. Research Report on the Influence of the Potassium Chloride Production Process on the Corrosion and Abrasive Wear of a Screw Dissolver Made of Duplex Steel 1.4462. Soligorsk: LLC "Proektnaya organizatsiya UMKA", 2025. 65 p.
3. Zhang Y., Tan H., Wang Z., Li X., Jiang Y. Synergistic erosion-corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel in chloride-sand slurry: Mechanisms and effect of sand concentration. *Wear*. 2022. Vol. 494 – 495, article 204248. P. 1 – 12.

4. Fattah-alhosseini A., Vafaeian S. Passivity of 2205 duplex stainless steel in alkaline solutions with differential pH values. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29. P. 1245 – 1253.
5. Alvarez R.B., Martin H.J., Horwat J., Aperador W. The role of pH and chloride concentration on the pitting corrosion of duplex steel. *Electrochimica Acta*, 2019. Vol. 307. P. 362 – 371.
6. Sathler L., Pimenta G.S., da Cunha Belo M. Crevice corrosion of lean duplex stainless steel 2101 in chloride media: Influence of pH and temperature. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 262, art-ticle 120085. P. 1 – 10.
7. Loto R.T. Pitting corrosion evaluation of austenitic and duplex stainless steels in acidic chloride environments. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9.No. 3. P. 4219 – 4228.
8. Jiang Y., Xu N., Zhou H., Wang J. Investigation on erosion-corrosion behavior of 2205 duplex stain-less steel under impingement by NaCl solution with sand particles. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 119. article 104981. P. 1 – 13.
9. Tavares S.S.M., Pardal J.M., da Silva, M.R., de Oliveira, C.A.S. Failure analysis of a duplex stainless steel flange in a chloride environment due to crevice and differential aeration corrosion. *Engineering Failure Analysis*, 2019. Vol. 103. P. 308 – 315.
10. Zhou E., Li H., Xu D., Zhang L., Liu C., Wang J., Li Y., Wang F. Accelerated corrosion of 2205 du-plex stainless steel caused by marine aerobic *Pseudomonas aeruginosa* biofilm. *Bioelectrochemistry*. 2019. Vol. 123. P. 34 – 41.
11. Ghods P., Isgor O.B., Bensebaa F., Kingston D. Angle-resolved XPS study of carbon steel passivity at different pH values. *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 495. article 143562. P. 1 – 9.
12. Bhola S.M., Bhola R., Jain L., Bhola A. Corrosion issues in potassium chloride mining and processing: a review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2021. Vol. 10.No. 3. P. 1024 – 1045.
13. Chen X., Li X., Zhang L., Wang J., Li Y. Synergistic effect of abrasion and corrosion on wear re-sistance of 2205 duplex stainless steel in simulated seawater with sand. *Tribology International*. 2021. Vol. 155, article 106767. P. 1 – 12.
14. Oskarsson R., Stenvall P., Leffler B. The influence of sand content on erosion-corrosion of stainless steels in seawater. *Wear*. 2022. Vol. 488 – 489. article 204157. P. 1 – 11.
15. Kocijan A., Donik Č., Jenko M. Electrochemical study of the corrosion behavior of duplex stainless steel in simulated concrete pore solution with chlorides under oxygen diffusion control. *Journal of the Electrochemical Society*. 2020. Vol. 167.No. 8. article 081501. P. 1 – 9.
16. Zhao H., Zhang Z., Zhang H., Hu J., He L. Effect of chloride ion concentration and temperature on the corrosion behavior of duplex stainless steel in simulated concrete pore solutions. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 320. article 126251. P. 1 – 12.
17. Silva C.C., Miranda H.C., Farias J.P., de Albuquerque V.H.C. Microstructure and corrosion resistance of welded joints of duplex stainless steel UNS S32205. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8.No. 2. P. 2227 – 2236.
18. Wang Q., Zhang B., Qiu S., Li W., Liu Y. Effect of temperature on passive film and pitting corrosion of 2507 super duplex stainless steel in chloride solutions. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 18. P. 2985 – 2997.
19. Kumar S., Sharma C., Gupta P. A review on erosion-corrosion of engineering materials in aggressive slurry environments. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 2022. Vol. 8.No. 1. article 15. P. 15 – 32.
20. Li J., Jiang Y., Wang F. Effect of microstructure on the corrosion and erosion-corrosion behavior of 2507 super duplex stainless steel. *Corrosion Science*. 2021. Vol. 183. article 109305. P. 109305 – 109315.

Информация об авторе

Наумович П.Н., инженер-химик-технолог, ООО «Проектная организация УМКА», г. Солигорск, Республика Беларусь, naumovich@umkapro.by

© Наумович П.Н., 2026

Information about the author

Naumovich P.N., Chemical Engineer, LLC "Design organization UMKA", Soligorsk, Republic of Belarus, naumovich@umkapro.by

© Naumovich P.N., 2026