

УДК (669.15-194.55+669.15-194.56+669.15-194.57):620.193.43

КОРРОЗИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ В ХЛОРАЛЮМИНАТНЫХ РАСПЛАВАХ

© 2019 г. В. В. Карпов^{а, *}, А. В. Абрамов^а, К. В. Дедов^а, А. В. Шак^а, А. Ю. Жиликов^а,
И. Б. Половов^а, С. В. Беликов^а, О. И. Ребрин^а

^аФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
620002 Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

*e-mail: karpov610@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.08.2018

В настоящей работе представлены результаты по изучению коррозионного поведения аустенитных (AISI 316L (аналог 03X16H15M3), 12X18H10T (аналог AISI 321), 06ХН28МДТ), ферритных и ферритно-мартенситных (12Х13 (аналог AISI 410), 08Х17Т (аналог AISI 439), 16Х12МВСФБР) сталей в хлоралюминатных расплавах при температуре 550°C. Определены скорости коррозии исследуемых материалов в электролите KCl–AlCl₃. Показано, что коррозионное разрушение поверхности нержавеющей сталей носит сплошной неравномерный характер с вытравливанием наиболее электроотрицательных элементов: хрома, железа и марганца.

Ключевые слова: коррозия, нержавеющая сталь, хлоралюминатный расплав, межкристаллитная коррозия, жидкосолевого реактор.

DOI: 10.1134/S0235010619010067

ВВЕДЕНИЕ

Низкие температуры плавления и хорошо изученные физико-химические свойства бинарных смесей KCl–AlCl₃ делают их перспективными средами для использования в качестве теплоносителя второго контура жидкосолевых ядерных реакторов (ЖСР) [1]. Однако применение данных хлоридных расплавов в подобных технологиях ограничено проблемами поиска подходящих коррозионностойких конструкционных материалов. В литературе детально описаны коррозионно-механические свойства никелевых сплавов в расплавах KCl–AlCl₃ [2, 3]. Исследований коррозионной стойкости более доступных и менее дорогих нержавеющей сталей в электролите KCl–AlCl₃ не проводилось. В связи с вышесказанным, настоящая работа посвящена изучению коррозионного поведения нержавеющей сталей различных классов в хлоралюминатных расплавах.

В качестве объектов исследования выбраны коррозионностойкие нержавеющие стали различных классов:

- ферритная коррозионностойкая жаропрочная сталь 08Х17Т/439;
- ферритно-мартенситная коррозионностойкая жаропрочная сталь 12Х13/410;
- ферритно-мартенситная высоколегированная сталь 16Х12МВСФБР;
- аустенитная коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т/321;
- аустенитная низкоуглеродистая коррозионностойкая сталь 316L/03Х16Н15М3;
- аустенитный коррозионностойкий сплав 06ХН28МДТ.

В литературе имеется достаточно сведений о коррозии в инертной атмосфере нержавеющей сталей в высокотемпературных расплавах на основе KCl–MgCl₂, MgCl₂, NaCl–KCl, LiCl при 650°C и выше [4–19]. В данных условиях зафиксированы значительные скорости разрушения материалов, включая процессы межкристаллитной

коррозии (МКК). Различными авторами [10–20] отмечен электрохимический характер процессов коррозии сталей, интенсификация которых обусловлена присутствием окислителей и влаги [4, 5, 9, 13], сплавообразованием с подложкой [10, 15, 16], а развитие МКК связано с эффектами образования микрогальванопар вследствие сенсибилизации метастабильных мартенсита и аустенита с образование вторичных карбидных и интерметаллидных фаз [11, 12, 14, 17, 20]. Присутствие металла-восстановителя в контакте с расплавом позволяет значительно снизить скорость коррозии материалов [9, 13].

Данные по коррозионной стойкости нержавеющей сталей в расплавах при температурах 600°C и ниже менее однозначны [4, 21–26]. Несмотря на общепризнанное положение о преимущественном выщелачивании хрома в ходе коррозии, полученные различными группами результаты зачастую противоречат друг другу и представленным выше данным. Так, авторами [23] отмечен аномальный рост скоростей коррозии стали 316L в электролите LiCl–KCl при 600°C с увеличением времени испытаний с 25 до 250 ч, а в работах [21, 25, 26] зафиксировано образование оксидных пленок на поверхности сталей типа 12X18H10T, AISI 310 и 347 при длительных выдержках в расплавах LiCl–KCl, NaCl–CaCl₂, LiCl–KCl–CsCl, NaCl–LiCl.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Основным экспериментальным методом для изучения коррозионного поведения материалов является гравиметрический способ определения скорости коррозии после выдержки в расплавленных солях. В данной работе использовали электролиты на основе хлоралюмината калия, для придания которым большей коррозионной активности [2, 27] исходное мольное соотношение AlCl₃ : KCl выбирали равным 1.2. Солевую композицию готовили в инертном боксе MBraun Unilab из предварительно просушенного и прохлорированного смесью хлора и хлороводорода хлорида калия (ХЧ) и безводного хлорида алюминия (99%, Acros Organics). Выдержку отполированных (до шероховатости 0.4 мкм) и обезжиренных образцов сталей осуществляли в алундовых тиглях при температуре 550°C в течении 30 ч. В ходе коррозионных тестов тигли с электролитом находились в герметичных ячейках из нержавеющей стали 12X18H10T под атмосферой аргона высокой чистоты (99.999%).

В дополнение к гравиметрическим испытаниям образцы в состоянии поставки и после испытаний подвергали микроанализу, который проводили с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM 6490 с приставкой Oxford Inca, позволяющей определять элементный состав с чувствительностью до 0.1 мас. %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Образцы исследуемых сталей в состоянии поставки были подвергнуты рентгенофлуоресцентному спектральному микроанализу (РФСА), который показал соответствие химического состава испытываемых образцов заявленному производителем (табл. 1).

На основании полученных данных о скоростях коррозии выбранных материалов после 30 ч выдержки в KCl–AlCl₃ при температуре 550°C (табл. 2), можно сделать вывод, что величина скорости коррозии зависит от состава и класса стали. Так, скорость коррозии аустенитных сталей в несколько раз ниже, а снижение содержания углерода в материале и повышение в нем концентрации более электроположительных элементов способствует повышению его коррозионной стойкости. Полученные скорости коррозии для стали 12X18H10T в расплаве KCl–AlCl₃ при 550°C сравнимы с таковыми для сплава AISI 304 (аналог 08X18H10) в электролите NaCl–KCl–ZnCl₂ (0.38 мм/год) при 500°C [19]. Вместе с тем определенные нами значения по гравиметрическому контролю процесса коррозии стали 316L существенно ниже данных, представленных в

Таблица 1

Состав исследуемых сталей (мас. %) согласно данным производителей (1) и РФСА (2)

Марка стали		Ni	Fe	Cr	Mo	W	Mn	C	Si	Другие
316L	1	10.0–14.0	Осн.	16.0–18.0	2.0–3.0	–	≤2.0	≤0.03	≤1.0	≤0.5 Ti, ≤0.03 S
	2	11.0	66.8	18.1	2.0	–	1.7	–	0.5	–
12X18Н10Т	1	9.0–11.0	Осн.	17.0–19.0	–	–	≤2.0	≤0.12	≤0.8	≤0.8 Ti, ≤0.02 S
	2	9.7	69.6	18.6	–	–	1.1	–	0.5	0.5 Ti
06ХН28МДТ	1	26.0–29.0	Осн.	22.0–25.0	2.5–3.0	–	≤0.8	≤0.06	≤0.8	2.5–3.5 Cu, 0.5–0.9 Ti
	2	26.7	44.1	23.3	2.6	–	0.4	–	0.47	2.7 Cu, 0.6 Ti
12X13	1	–	Осн.	12.0–14.0	–	–	≤0.8	0.09–0.15	≤0.8	≤0.03 P, ≤0.025 S
	2	–	85.8	13.1	–	–	0.7	–	0.5	–
08Х17Т	1	–	Осн.	16.0–18.0	–	–	≤0.8	≤0.08	≤0.8	≤0.025 S, ≤0.8 Ti
	2	0.6	80.6	17.2	–	–	0.5	–	0.4	0.7 Ti
16Х12МВCFБP	1	0.5–0.8	Осн.	10.0–12.0	0.6–0.9	0.5–0.8	0.5–0.8	0.14–0.18	1.0–1.3	0.2–0.4 V, 0.2–0.4 Nb
	2	0.7	83.7	11.5	0.9	0.8	0.8	–	0.9	0.4 V, 0.3 Nb

Таблица 2

Скорости коррозии нержавеющей сталей после выдержки в хлоралюминатных расплавах в течение 30 ч при температуре 550°C

Марка стали	Скорость коррозии	
	г/(м ² · ч)	мм/год
AISI 316L (аналог 03X16H15M3)	0.49	0.53
12X18H10T (аналог AISI 321)	0.73	0.80
06ХН28МДТ	0.32	0.35
12X13 (аналог AISI 410)	3.21	3.64
08Х17Т (аналог AISI 439)	3.92	4.46
16Х12МВCFБP	2.71	3.00

работе [24] для расплава LiCl–KCl. Это, на наш взгляд, обусловлено методическими особенностями исследования [24] – полученные при помощи гравиметрии и электрохимии авторами [24] скорости коррозии отличаются существенным образом (16.4 и 0.87 мм/год соответственно).

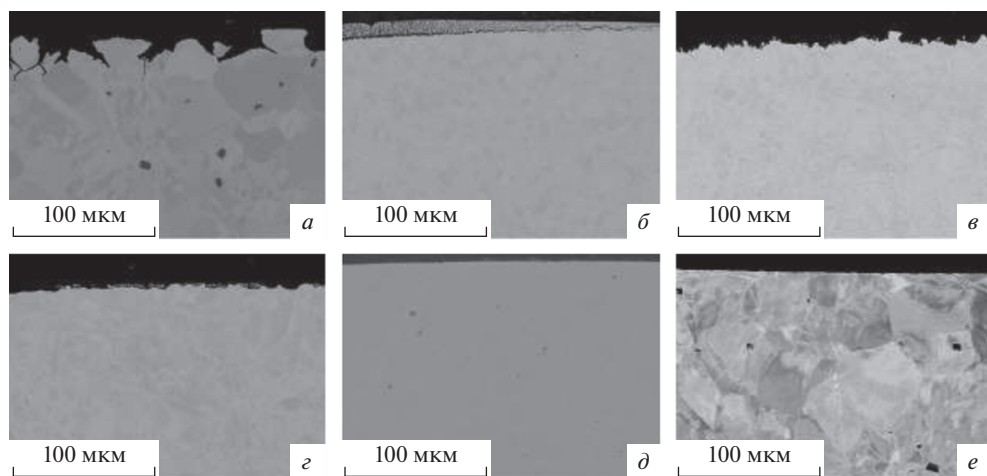


Рис. 1. Микроструктура исследуемых сплавов после 30 ч выдержки в $\text{KCl}-\text{AlCl}_3$ при 550°C (*a* – 08X17T, *б* – 12X13, *в* – 16X12МВСФБР, *г* – 316L, *д* – 12X18Н10Т, *е* – 06ХН28МДТ).

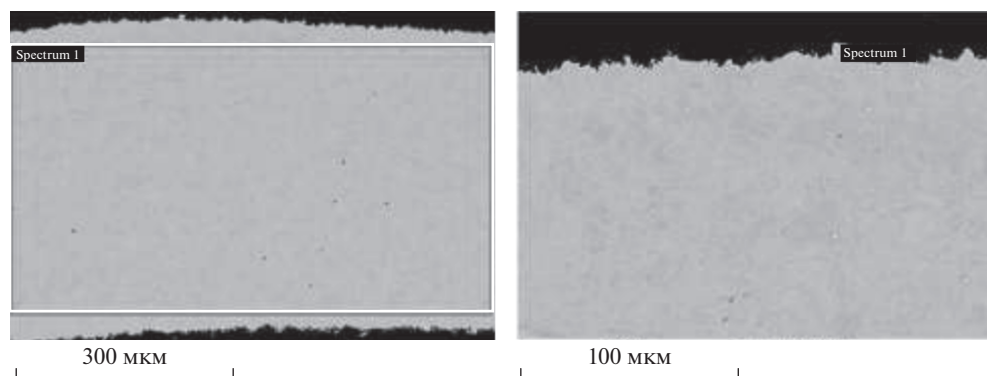


Рис. 2. РФСА сплава 06ХН28МДТ в объеме образца (слева) и в точке (справа) после 30 ч выдержки в расплаве $\text{KCl}-\text{AlCl}_3$ при 550°C .

Сделанные выводы подтверждаются результатами металлографического анализа (рис. 1). Видно, что исследуемые стали подвержены сплошной неравномерной коррозии, образования оксидной пленки не зафиксировано. На поперечном сечении образцов ферритных и ферритно-мартенситных сталей видно зарождение процессов МКК, обусловленное образованием вторичных фаз. Более высокие значения скоростей коррозии сталей 12X13, 08X17T и 16X12МВСФБР могут быть объяснены наличием большего количества электроотрицательных компонентов: хрома, железа и марганца. Данный вывод согласуется с электрохимическим характером фронтальной коррозии материалов (рис. 2, табл. 3). При этом коррозионная стойкость аустенитных сталей также неудовлетворительна с позиции их потенциального использования в атомной промышленности в контакте с расплавами $\text{KCl}-\text{AlCl}_3$ при 550°C .

Таблица 3

**Состав сплава 06ХН28МДТ в объеме образца и на поверхности (рис. 2)
после выдержки в расплаве KCl–AlCl₃ в течение 30 ч при 550°C**

Элемент		Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	W	Si	Nb	V
Объем	мас. %	11.5	0.8	83.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.3	0.4
Поверхность	мас. %	10.8	0.7	83.0	0.8	1.1	1.7	1.0	0.4	0.4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что нержавеющие стали обладают относительно низкой коррозионной стойкостью в контакте с хлоралюминатными расплавами при 550°C, а процессы разрушения имеют электрохимическую природу. Ферритные и ферритно-мартенситные стали 12Х13, 08Х17Т и 16Х12МВCFБР в этих условиях менее устойчивы, в дополнение они подвержены процессам МКК. Фазовая стабильность аустенитных материалов выше, однако, скорость их фронтальной коррозии также значительна. Нержавеющие стали не рекомендуется применять в качестве конструкционных материалов для ЖСР с расплавленным теплоносителем KCl–AlCl₃ при 550°C и выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивановский Л.Е., Хохлов В.А., Казанцев Г.Ф. Физическая химия и электрохимия хлоралюминатных расплавов. М.: Наука, 1993. 251 с.
2. Abramov A.V., Karpov V.V., Zhilyakov A.Yu., Gibadullina A.F., Polovov I.B., Volkovich V.A., Belikov S.V., Shak A.V., Rebrin O.I. Corrosion of corrosion-resistant and high-temperature nickel-based alloys in chloroaluminate melts // ECS Transactions. 2014. **64**. № 4. P. 217–226.
3. Polovov I.B., Abramov A.V., Karpov V.V., Gibadullina A.F., Zhilyakov A.Yu., Dedov K.V., Belikov S.V., Shak A.V., Volkovich V.A., Rebrin O.I. Corrosion of Nickel-Based Superalloys in Molten Chloroaluminates // ECS Transactions. 2017. **77**. № 11. P. 753–766.
4. Susskind H., Hill F.B., Green L., Lakish S., Kukacka L.E., McNulty W.E., Wirsing Jr. E. Corrosion studies for a fused salt-liquid metal extraction process for the liquid metal fuel reactor // Technical report BNL-585. Brookhaven National Laboratory, 1960. 41 p.
5. Степанов С.И., Качина-Пулло Е.Б. Коррозия сталей и никельхромистых сплавов в смесях расплавленных хлоридов // ЖПХ. 1962. **35**. С. 1852–1855.
6. Степанов С.И., Синева В.М. Действие расплавленного хлористого магния на сплавы железо–хром–никель // ЖНХ. 1963. **18**. С. 1702–1705.
7. Степанов С.И., Качина-Пулл Е.Б. Коррозия некоторых сталей и никеля в расплавленных хлоридах калия и магния // ЖПХ. 1964. **37**. С. 379–383.
8. Путина О.А., Нуриева Т.В., Путин А.А., Кочергин В.П. Коррозионная стойкость металлических материалов в расплавленном хлориде магния // Изв. ВУЗов: Химия и хим. техн. 1977. **20**. С. 129–131.
9. Indacochea J.E., Smith J.L., Litko K.R., Karell E.J. Corrosion performance of ferrous and refractory metals in molten salts under reducing conditions // J. Mater. Res. 1999. **14**. P. 1990–1995.
10. Abramov A.V., Polovov I.B., Volkovich V.A., Rebrin O.I., Griffiths T.R. Corrosion of constructive materials in niobium-containing melts // ECS Transactions. 2008. **16**. № 49. P. 357–365.
11. Abramov A.V., Polovov I.B., Volkovich V.A., Rebrin O.I., Griffiths T.R., May I., Kinoshita H. Spectroelectrochemical study of stainless steel corrosion in NaCl–KCl melt // ECS Transactions. 2010. **33**. № 7. P. 277–285.

12. Polovov I.B., Abramov A.V., Rebrin O.I., Volkovich V.A., Denisov E.I., Griffiths T.R., May I., Kinoshita H. Corrosion of stainless steels in NaCl–KCl based melts // ECS Transactions. 2010. **33**. № 7. P. 321–327.
13. Ambrosek J.W. Molten chloride salts for heat transfer in nuclear systems. Ph.D. thesis Madison, WI, USA: The University of Wisconsin-Madison, 2011. 238 p.
14. Polovov I.B., Vinogradov D.A., Abramov A.V., Shak A.V., Volkovich V.A., Rebrin O.I., Griffiths T.R. Corrosion of ferritic and ferritic-martensitic steels in NaCl–KCl–VCl₂ melts // ECS Transactions. 2012. **50**. № 11. P. 699–709.
15. Abramov A.V., Polovov I.B., Rebrin O.I., Volkovich V.A., Lisienko D.G. Corrosion behavior of austenitic steels and their components in niobium-containing chloride melts // Russ. Metall. 2014. № 2. P. 159–165.
16. Abramov A.V., Polovov I.B., Rebrin O.I., Lisienko D.G. Corrosion of austenitic steels and their components in vanadium-containing chloride melts // Russ. Metall. 2014. № 8. P. 624–632.
17. Polovov I.B., Abramov A.V., Volkovich V.A., Rebrin O.I. Corrosion of Austenitic Stainless Steels in Chloride Melts // Molten Salts Chemistry and Technology. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. 2014. P. 427–448.
18. Liu S., Liu Z., Wang Y., Tang J. A comparative study on the high temperature corrosion of TP347H stainless steel, C22 alloy and laser-cladding C22 coating in molten chloride salts // Corros. Sci. 2014. **83**. P. 396–408.
19. Vignarooban K., Xu X., Wang K., Molina E.E., Li P., Gervasio D., Kannan A.M. Vapor pressure and corrosivity of ternary metal-chloride molten-salt based heat transfer fluids for use in concentrating solar power systems // Appl. Energy. 2015. **159**. P. 206–213.
20. Polovov I.B., Abramov A.V., Dedov K.V., Karpov V.V., Zhilyakov A.Yu., Gibadullina A.F., Belikov S.V., Volkovich V.A., Rebrin O.I. Corrosion of austenitic steels and their components in uranium-containing chloride melts // ECS Transactions. 2017. **77**. № 11. P. 847–855.
21. Shamanova N.D., Esina N.O. The surface state of chromium- and chromium-nickel steels upon their exposure to a calcium-potassium chloride melt // Prot. Met. 1999. **35**. P. 43–46.
22. Abd El-Rahman H.A., Baraka A., Abd El-Gwad S.A. Effect of oxide ion donors on the corrosion and dechromization of stainless steels in KCl–NaCl–BaCl₂ melt // J. Appl. Electrochem. 1999. **29**. P. 1205–1210.
23. Ravi Shankar A., Kamachi Mudali U. Corrosion of type 316L stainless steel in molten LiCl–KCl salt // Mater. Corros. 2008. **59**. P. 878–882.
24. Wang L., Li B., Shen M., Li S.-Y., Yu J.-G. Corrosion resistance of steel materials in LiCl–KCl melts // Int. J. Miner. Metall. Mater. 2012. **19**. P. 930–933.
25. Hofmeister M., Klein L., Miran H., Rettig R., Virtanen S., Singer R.F. Corrosion behaviour of stainless steels and a single crystal superalloy in a ternary LiCl–KCl–CsCl molten salt // Corros. Sci. 2015. **90**. P. 46–53.
26. Gomez-Vidal J.C., Tirawat R. Corrosion of alloys in a chloride molten salt (NaCl–LiCl) for solar thermal technologies // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2016. **157**. P. 234–244.
27. Karpov V.V., Polovov I.B., Kudryashov D.V., Lisienko D.G., Volkovich V.A., Chukin A.V., Rebrin O.I. Indirect methods of determination of K : Al mole ratio in molten chloroaluminates // ECS Transactions. 2014. **64**. № 4. P. 461–472.

Corrosion of Various Types of Stainless Steels in Chloraluminat Melts

*V. V. Karpov¹, A. V. Abramov¹, K. V. Dedov¹, A. V. Shak¹, A. Yu. Zhilyakov¹,
I. B. Polovov¹, S. V. Belikov¹, O. I. Rebrin¹*

*¹FSAEI HE “Ural Federal University Named after the first President of Russia B.N. Yeltsin”,
620002 Russia, Yekaterinburg, Mira st., 19*

In the present work the corrosion behavior of 08Kh17T (analogue of AISI 439) ferritic steel, 12Kh13 (analogue of AISI 410) and 16Kh12MVSFBR ferritic-martensitic steels, and AISI 316L (analogue of 03Kh16N15M3), 12Kh18N10T (analogue of AISI 321) and 06KhN28MDT austenitic alloys was studied at 550°C in fused KCl–AlCl₃ mixture with the initial AlCl₃-to-KCl ratio of 1.1. The corrosion rates of the studied materials in the KCl–

AlCl_3 were determined. The corrosion processes in all the studied iron-based steels were caused by the red-ox reactions resulting in dissolution of the most electronegative alloy components (Cr, Fe and Mn), that indicate the electrochemical nature of corrosion phenomena.

Keywords: corrosion, stainless steel, chloraluminate melts, intergranular corrosion, molten salt reactor

REFERENCES

1. Ivanovskiy L.Ye., Khokhlov V.A., Kazantsev G.F. [*Fizicheskaya khimiya i elektrokimiya khloralyuminatnykh rasplavov*] Physical chemistry and electrochemistry of chlorine aluminate melts. M.: Nauka, 1993. 251 p. [In Rus.].
2. Abramov A.V., Karpov V.V., Zhilyakov A.Yu., Gibadullina A.F., Polovov I.B., Volkovich V.A., Belikov S.V., Shak A.V., Rebrin O.I. Corrosion of corrosion-resistant and high-temperature nickel-based alloys in chloroaluminate melts // ECS Transactions. 2014. **64**. № 4. P. 217–226.
3. Polovov I.B., Abramov A.V., Karpov V.V., Gibadullina A.F., Zhilyakov A.Yu., Dedov K.V., Belikov S.V., Shak A.V., Volkovich V.A., Rebrin O.I. Corrosion of Nickel-Based Superalloys in Molten Chloroaluminates // ECS Transactions. 2017. **77**. № 11. P. 753–766.
4. Susskind H., Hill F.B., Green L., Lakish S., Kukacka L.E., McNulty W.E., Wirsing Jr.E. Corrosion studies for a fused salt-liquid metal extraction process for the liquid metal fuel reactor // Technical report BNL-585. Brookhaven National Laboratory, 1960. 41 p.
5. Stepanov S.I., Kachina-Pullo Ye.B. Corrosion of steels and nickel-chromium alloys in mixtures of molten chlorides [*Korroziya staley i nikel'khromistyykh splavov v smesnyakh rasplavlennykh khloridov*] // ZHPKH. 1962. **35**. P. 1852–1855. [In Rus.].
6. Stepanov S.I., Sineva V.M. The effect of molten magnesium chloride on iron-chromium-nickel alloys [*Deystviye rasplavlennogo khlolistogo magniya na splavy zhelezo-khrom-nikel'*] // ZHNKH. 1963. **18**. P. 1702–1705. [In Rus.].
7. Stepanov S.I., Kachina-Pull Ye.B. Corrosion of some steels and nickel in molten potassium and magnesium chlorides [*Korroziya nekotorykh staley i nikelya v rasplavlennykh khloridakh kaliya i magniya*] // ZHPKH. 1964. **37**. P. 379–383. [In Rus.].
8. Putina O.A., Nuriyeva T.V., Putin A.A., Kochergin V.P. Corrosion resistance of metallic materials in molten magnesium chloride [*Korroziyonnaya stoykost' metallicheskiykh materialov v rasplavlennom khloride magniya*] // Izv. VUZov: Khimiya i khim. tekhn. 1977. **20**. P. 129–131. [In Rus.].
9. Indacochea J.E., Smith J.L., Litko K.R., Karell E.J. Corrosion performance of ferrous and refractory metals in molten salts under reducing conditions // J. Mater. Res. 1999. **14**. P. 1990–1995.
10. Abramov A.V., Polovov I.B., Volkovich V.A., Rebrin O.I., Griffiths T.R. Corrosion of constructive materials in niobium-containing melts // ECS Transactions. 2008. **16**. № 49. P. 357–365.
11. Abramov A.V., Polovov I.B., Volkovich V.A., Rebrin O.I., Griffiths T.R., May I., Kinoshita H. Spectroelectrochemical study of stainless steel corrosion in NaCl-KCl melt // ECS Transactions. 2010. **33**. № 7. P. 277–285.
12. Polovov I.B., Abramov A.V., Rebrin O.I., Volkovich V.A., Denisov E.I., Griffiths T.R., May I., Kinoshita H. Corrosion of stainless steels in NaCl-KCl based melts // ECS Transactions. 2010. **33**. № 7. P. 321–327.
13. Ambrosek J.W. Molten chloride salts for heat transfer in nuclear systems. Ph.D. thesis Madison, WI, USA: The University of Wisconsin-Madison, 2011. 238 p.
14. Polovov I.B., Vinogradov D.A., Abramov A.V., Shak A.V., Volkovich V.A., Rebrin O.I., Griffiths T.R. Corrosion of ferritic and ferritic-martensitic steels in NaCl-KCl-VCl_2 melts // ECS Transactions. 2012. **50**. № 11. P. 699–709.
15. Abramov A.V., Polovov I.B., Rebrin O.I., Volkovich V.A., Lisienko D.G. Corrosion behavior of austenitic steels and their components in niobium-containing chloride melts // Russ. Metall. 2014. № 2. P. 159–165.
16. Abramov A.V., Polovov I.B., Rebrin O.I., Lisienko D.G. Corrosion of austenitic steels and their components in vanadium-containing chloride melts // Russ. Metall. 2014. № 8. P. 624–632.
17. Polovov I.B., Abramov A.V., Volkovich V.A., Rebrin O.I. Corrosion of Austenitic Stainless Steels in Chloride Melts // Molten Salts Chemistry and Technology. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. 2014. P. 427–448.

18. Liu S., Liu Z., Wang Y., Tang J. A comparative study on the high temperature corrosion of TP347H stainless steel, C22 alloy and laser-cladding C22 coating in molten chloride salts // *Corros. Sci.* 2014. **83**. P. 396–408.
19. Vignarooban K., Xu X., Wang K., Molina E.E., Li P., Gervasio D., Kannan A.M. Vapor pressure and corrosivity of ternary metal-chloride molten-salt based heat transfer fluids for use in concentrating solar power systems // *Appl. Energy*. 2015. **159**. P. 206–213.
20. Polovov I.B., Abramov A.V., Dedov K.V., Karpov V.V., Zhilyakov A.Yu., Gibadullina A.F., Belikov S.V., Volkovich V.A., Rebrin O.I. Corrosion of austenitic steels and their components in uranium-containing chloride melts // *ECS Transactions*. 2017. **77**. № 11. P. 847–855.
21. Shamanova N.D., Esina N.O. The surface state of chromium- and chromium-nickel steels upon their exposure to a calcium-potassium chloride melt // *Prot. Met.* 1999. **35**. P. 43–46.
22. Abd El-Rahman H.A., Baraka A., Abd El-Gwad S.A. Effect of oxide ion donors on the corrosion and dechromization of stainless steels in KCl–NaCl–BaCl₂ melt // *J. Appl. Electrochem.* 1999. **29**. P. 1205–1210.
23. Ravi Shankar A., Kamachi Mudali U. Corrosion of type 316L stainless steel in molten LiCl–KCl salt // *Mater. Corros.* 2008. **59**. P. 878–882.
24. Wang L., Li B., Shen M., Li S.-Y., Yu J.-G. Corrosion resistance of steel materials in LiCl–KCl melts // *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 2012. **19**. P. 930–933.
25. Hofmeister M., Klein L., Miran H., Rettig R., Virtanen S., Singer R.F. Corrosion behaviour of stainless steels and a single crystal superalloy in a ternary LiCl–KCl–CsCl molten salt // *Corros. Sci.* 2015. **90**. P. 46–53.
26. Gomez-Vidal J.C., Tirawat R. Corrosion of alloys in a chloride molten salt (NaCl–LiCl) for solar thermal technologies // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2016. **157**. P. 234–244.
27. Karpov V.V., Polovov I.B., Kudryashov D.V., Lisienko D.G., Volkovich V.A., Chukin A.V., Rebrin O.I. Indirect methods of determination of K : Al mole ratio in molten chloroaluminates // *ECS Transactions*. 2014. **64**. № 4. P. 461–472.