

УДК 620.143

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ПАССИВИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КАНДИДАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЖСР ПОСРЕДСТВОМ ДОБАВЛЕНИЯ O^{2-} В СОЛЕВУЮ ФАЗУ ГАЛОГЕНИДНОГО РАСПЛАВА

© 2023 г. Э. А. Карфидов^а, Ю. П. Зайков^а, Е. В. Никитина^{а, *}, К. Е. Селиверстов^а^аИнститут высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: neekeetina@mail.ru

Поступила в редакцию 24.03.2022 г.

После доработки 04.04.2022 г.

Принята к публикации 11.04.2022 г.

Были проведены эксперименты по определению скорости коррозии нержавеющей стали AISI 316 во фторидных расплавах с различной концентрацией O^{2-} (путем добавления в расплав оксида лития в диапазоне концентраций от 0 до 5 мас. %). В результате серии экспериментов установлено, что происходит снижение скорости коррозии на порядок при концентрации анионов кислорода в расплаве от 0.2 до 0.4 мас. %, что может свидетельствовать об обнаружении явления высокотемпературной пассивации материала за счет модифицирования состава фторидного расплава и снижения его коррозионной активности. Кроме того, типичный для нержавеющей сталей тип межкристаллитной и питтинговой коррозии во фторидных расплавах, наиболее опасной с точки зрения конструкционного реакторного материала, при добавлении оксида лития изменяется на сплошной за счет “залечивания” отдельных коррозионных очагов избыточными кислородсодержащими соединениями. Установлено образование защитного слоя шпинельного типа толщиной 1 мкм.

Ключевые слова: коррозия, кандидатные материалы для ЖСР, расплав галогенидов щелочных металлов, высокотемпературное пассивирование, оксиды шпинельного типа

DOI: 10.31857/S0235010622040065, **EDN:** DHSZUO

ВВЕДЕНИЕ

Расплавленные фторидные соли обладают свойствами, которые позволяют их использовать в качестве солевых растворителей в жидкосолевом реакторе-сжигателе (ЖСР-С) [1–5].

Несмотря на то, что фториды щелочных металлов являются одними из самых агрессивных солей с точки зрения деградации конструкционного материала, применяемого в реакторостроении, именно эти солевые расплавы обладают огромными преимуществами из-за высокой теплопроводности, низкой вязкости, высоких температур кипения, наибольшей теплоемкости на единицу объема и нечувствительности к излучению.

Большие преимущества конструкции реакторных систем IV поколения с расплавленными солями заключаются в эффективном использовании топлива, минимальном количестве радиоактивных отходов и экономичном использовании при безопасной и экологически чистой эксплуатации [6–8]. Расплавленные соли можно использовать в качестве теплоносителя реактора или передаточной среды в высокотемпературных технологических тепловых контурах (от ядерных реакторов до производства водорода), однако серьезнейшей проблемой является коррозия металлических материалов [9–11].

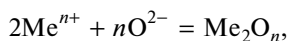
Попытки снизить скорость коррозии в расплавленных солевых системах сталкиваются с серьезными, подчас непреодолимыми ограничениями. В большинстве высокотемпературных технологий, где используются расплавленные соли вообще, традиционно используются сплавы, содержащие высокие концентрации хрома, кремния или алюминия, поскольку эти элементы легко образуют пассивные оксидные пленки, которые по всей вероятности замедляют перенос частиц между металлом и окружающей средой, препятствуя дальнейшей коррозии [12, 13]. Однако в расплавленных галогенидных солях эти оксиды либо не образуются, либо являются нестабильными из-за очень низкой активности кислорода в расплавленных солях. Следовательно, разрушение в значительной степени зависит от межфазных реакций между расплавленной солью и поверхностью чистого металла. Другими словами, механизм коррозии в расплавленных солях намного сложнее, чем в водных средах; образование пассивирующего оксидного слоя на коррозионнотстойких сплавах становится термодинамически невозможным, в связи с чем, использование многих коррозионнотстойких сплавов ограничено [14, 15].

Вопреки имеющемуся устоявшемуся мнению о нестойкости оксидного слоя в расплаве галогенидов [16], в частности фторидов, опубликован ряд работ [17–19], в которых есть сведения о значительном повышении стойкости конструкционного материала за счет образования на поверхности оксидного слоя шпинельного типа, тормозящего протекание коррозионного процесса.

Ранее защитное покрытие было нанесено в карбонатном расплаве на подложки из нержавеющей стали [20], наиболее оптимальный состав реакционной среды для создания оксидного покрытия нестехиометрического состава, хорошо сцепленного с основой —эвтектический расплав $K_2CO_3-Na_2CO_3-Li_2CO_3$. Подобные покрытия были получены посредством 4-х часовой выдержки образцов при температуре 550°C.

Однако такие покрытия могли бы быть использованы как защитные во фторидных расплавах с составами, подходящими для ЖСР, только при условии их изотермического переноса из одного расплава в другой, что не является технологичным. Основываясь на исследованных процессах взаимодействия кандидатных материалов с кислородсодержащими соединениями в расплавленных солях, нами была исследована возможность образования пассивирующего слоя на поверхности кандидатных материалов для ЖСР непосредственно во время коррозионной выдержки в расплаве FLiNaK посредством задания определенной концентрации от 0.05 до 0.8 мас. % ионов O^{2-} (в виде Li_2O). Данные эксперименты по формированию оксидного покрытия на стали AISI 316 непосредственно во фторидном расплаве показали, что при концентрации от 0.2 до 0.4 мас. % O^{2-} образцы обладают феноменальной коррозионной стойкостью. Таким образом, возможен процесс образования в расплаве фторидов щелочных металлов защитного оксидного слоя, являющегося результатом взаимодействия продуктов коррозии электроотрицательных компонентов стали и анионов кислорода.

Таким образом, реакция, происходящая в системе “расплав, содержащий оксид лития—кандидатный материал” упрощенно может быть представлена как:



где Me — электроотрицательный компонент кандидатного материала (Fe, Cr, Ti).

На основании полученных электрохимических и коррозионных данных были проведены эксперименты на нержавеющей стали AISI 316 с различной концентрацией O^{2-} во фторидном расплаве с определением возможности образования защитного шпинельного типа уже при бестоковой (коррозионной) выдержке.

Таблица 1. Элементный состав исходного FLiNaK и Li₂O

Элемент	Исходный компонент, мас. %	
	FLiNaK	Li ₂ O
Ti	0.0027	0.0007
Cr	0.0010	0.0011
Fe	0.0032	0.0120
Ni	0.0042	0.0014
Mn	0.0003	<0.0001
Ca	0.0040	0.0130
Co	0.0002	<0.0001
Cu	0.0018	0.0004
V	<0.0001	<0.0001
Zr	<0.0001	<0.0001
Mg	0.0083	0.0047

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты были выполнены в расплаве FLiNaK с добавкой высокочистого оксида лития с концентрацией до 0.8 мас. % по аниону O²⁻. Исследования проводились в перчаточном боксе, в котором непрерывно поддерживалась инертная атмосфера аргона. В качестве исследуемого материала служила сталь AISI 316. Эксперименты проводились в параллели по 3 образца при температуре 550°C и времени выдержки 24 ч.

Эвтектический расплав LiF–NaF–KF (46.5–11.5–42 мол. %) был приготовлен из индивидуальных солей NaF, LiF и KF·HF марок “х. ч.”, подробная методика представлена в работе [21].

Оксид лития синтезировали термическим разложением безводного гидроксида лития под вакуумом. Моногидрат гидроксида лития марки “х. ч.” (ТУ 6-09-3763-85) обезвоживали под вакуумом при температуре 300°C. Безводный LiOH помещали в тигель из оксида магния, тигель устанавливали в герметичную кварцевую пробирку и проводили разложение при температуре 450°C под вакуумом до прекращения выделения воды. После прекращения выделения воды температуру увеличивали до 800°C и обрабатывали синтезированный Li₂O водородом для разложения карбоната лития. Синтезированный оксид лития представлял из себя белый порошок с массовой долей оксида лития 99.0% и содержанием Li₂CO₃ не более 0.5 мас. %.

Образцы солевых плавлен, отобранных в процессе эксперимента, а также исходную солевую композицию FLiNaK и синтезированный Li₂O анализировали на содержание примесей с помощью масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой NexIon 2000 (Perkin Elmer, США). Результаты анализа исходного FLiNaK и Li₂O приведены в табл. 1.

В качестве исследуемых образцов использовалась сталь AISI 316 (70Fe–18Cr–10Ni мас. %). Перед испытанием образцы шлифовали и полировали абразивной бумагой различной зернистости, обезжиривали и сушили. После чего производили замеры габаритных размеров и массы на аналитических весах с точностью до 5-го знака после запятой, для составления материального баланса.

Для фиксирования количества анионов кислорода в расплаве FLiNaK осуществлялась электрохимическая диагностика расплава с помощью метода вольтамперной развертки в анодную область. В качестве измерительного устройства использовали потенциостат AutoLAB PGSTAT 302 N. Рабочий электрод – золотая проволока. В каче-

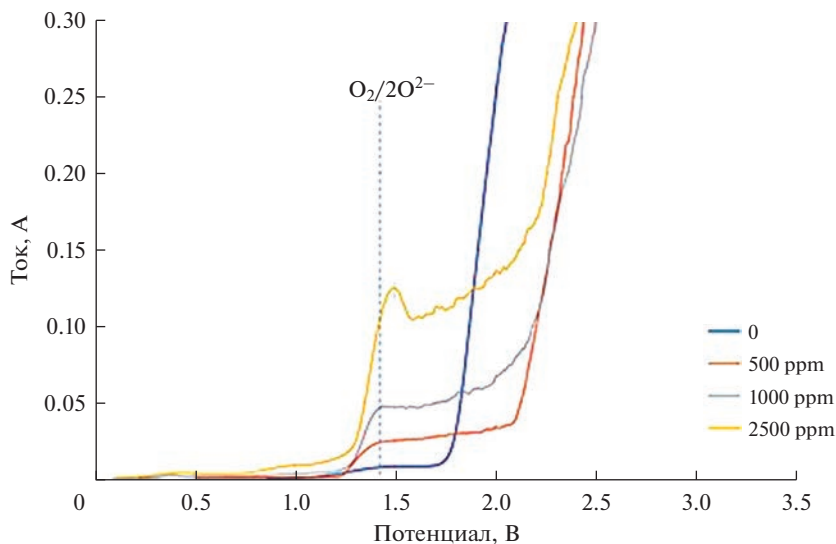


Рис. 1. Вольтамперная характеристика золотого анода при различном содержании кислорода в расплаве.

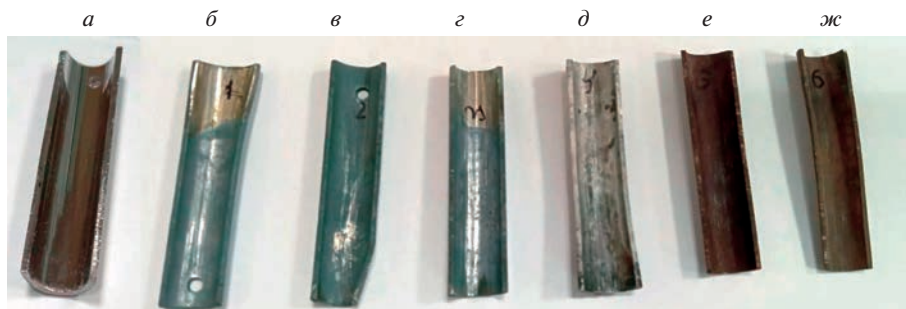


Рис. 2. Внешний вид исследуемых образцов. а – Исходный образец. Образцы, выдержанные в расплаве FLiNaK при концентрации O^{2-} , ppm: б – 500, в – 1000, г – 1500, д – 2500, е – 4500, ж – 8000.

стве электродов сравнения и вспомогательного были использованы молибденовые стержни. Скорость развертки 0.5 В/с. Полученные вольтамперные зависимости представлены на рис. 1.

По полученным вольтамперным зависимостям наблюдается четкая закономерность возрастания силы тока с увеличением концентрации оксида лития в расплаве.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлен внешний вид исследуемых образцов, а на рис. 3 – внешний вид отвердевшего расплава.

Скорость коррозии, полученная по данным гравиметрического и элементного анализа представлена в табл. 2.

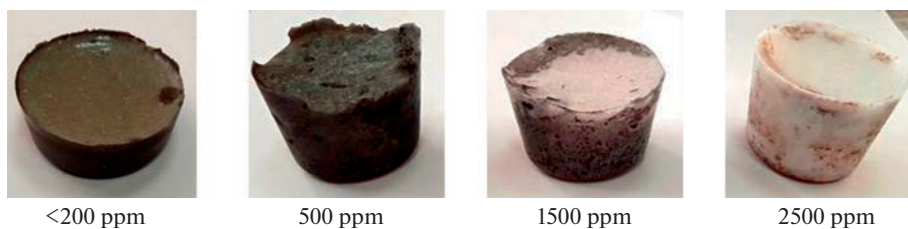


Рис. 3. Внешний вид расплава после коррозионных испытаний.

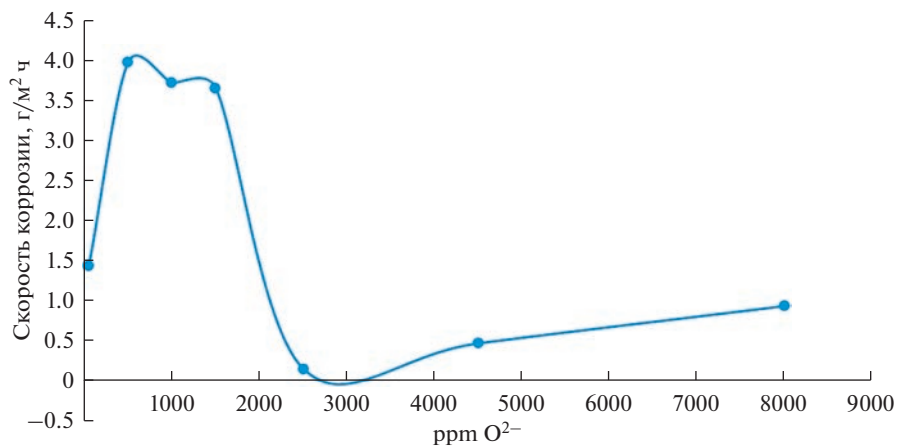


Рис. 4. Скорость коррозии стали AISI 316 в зависимости от концентрации оксида лития в расплаве по данным гравиметрического анализа.

На рис. 4 представлена скорость коррозии в зависимости от концентрации добавки оксида лития в расплаве FLiNaK, а также количество растворившегося компонента стали.

На рис. 5 представлена селективность перехода компонентов стали в расплав в зависимости от концентрации добавки оксида лития, полученные с помощью элементного анализа отвердевшего расплава после эксперимента.

Таблица 2. Скорость коррозии образцов стали AISI 316, выдержанной в расплаве FLiNaK при различной концентрации Li₂O

Концентрация O ²⁻		Скорость коррозии, г/м ² ·ч	
ppm	мас. %	по данным гравиметрического анализа	по данным элементного анализа
<200	<0.020	1.448	1.766
500	0.050	3.975	3.936
1000	0.100	3.717	3.516
1500	0.150	3.650	3.404
2500	0.250	0.162	0.541
4500	0.450	0.479	1.589
8000	0.800	0.943	1.705

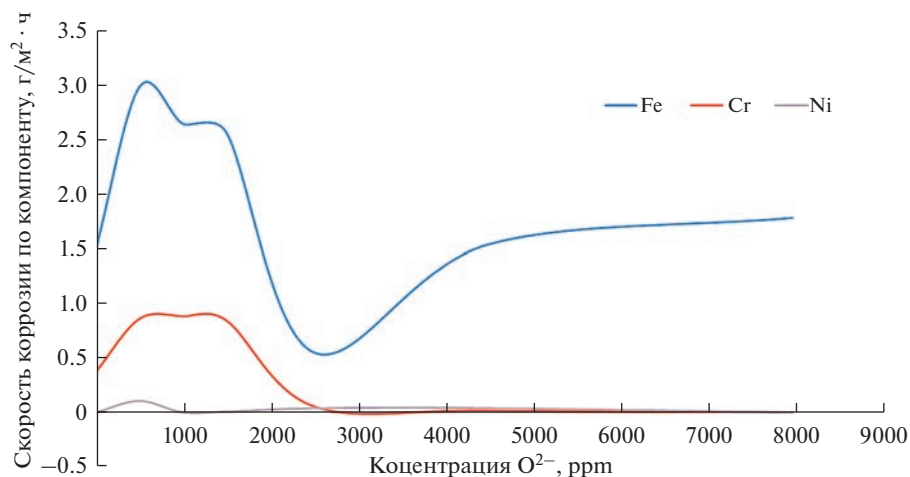


Рис. 5. Селективность перехода компонентов стали в расплав в зависимости от концентрации оксида лития в FLiNaK по данным элементного анализа.

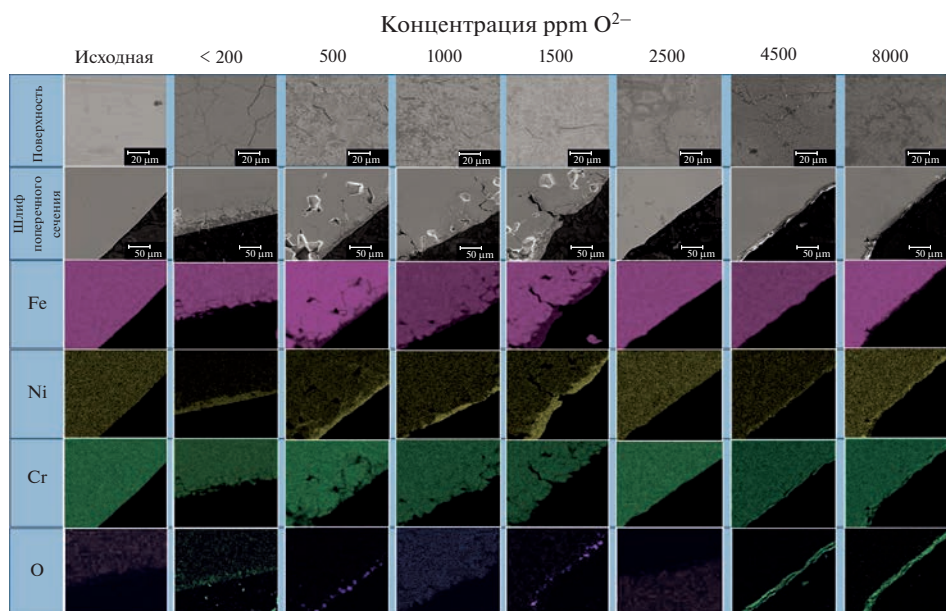


Рис. 6. Элементное картирование шлифа поперечного сечения исследуемых образцов стали AISI 316, выдержанных в расплаве FLiNaK, при различной концентрации Li_2O .

Наиболее значимые данные по изменению морфологии поверхности были получены с помощью МРСА шлифов поперечного сечения. Это связано с тем, что традиционно принято считать, что для нержавеющей стали аустенитного типа в галогенидных расплавах межкристаллитный тип коррозии является основным.

На рис. 6 представлено элементное картирование шлифа поперечного сечения исследуемых образцов стали AISI 316, выдержанных в расплаве FLiNaK, содержащем различные концентрации Li_2O .

По данным элементного (рис. 5) и МРСА (рис. 6) анализа можно отметить, что при концентрации выше 2500 ppm по O^{2-} наблюдается значительное снижение выхода хрома в расплав за счет того, что данный компонент стали задерживается в оксидном поверхностном слое. Кроме того, по данным микрорентгеноспектрального анализа, при концентрации свыше 2500 ppm O^{2-} наблюдается изменение характера коррозии с типичной для галогенидных сред межкристаллитной коррозии, на сплошную.

ВЫВОДЫ

Были проведены эксперименты по определению скорости коррозии нержавеющей стали AISI 316 в расплаве фторидов лития, натрия, калия с различной концентрацией O^{2-} (путем добавления в расплав оксида лития в диапазоне концентраций от 0 до 5 мас. %). На основании полученных электрохимических и коррозионных данных установлено образование защитного слоя шпинельного типа толщиной 1 мкм.

При увеличении концентрации анионов кислорода в расплаве от 0.2 до 0.4 мас. % происходит снижение скорости коррозии стали на порядок, что может свидетельствовать об обнаружении явления высокотемпературной пассивации материала за счет модифицирования состава фторидного расплава и снижения его коррозионной активности.

Типичный для нержавеющей сталей характер межкристаллитной и питтинговой коррозии во фторидных расплавах, наиболее опасной с точки зрения конструкционного реакторного материала, при добавлении оксида лития изменяется на сплошной за счет “залечивания” отдельных коррозионных очагов избыточными кислородсодержащими соединениями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации “Росатом” в рамках научного проекта № 20-21-00022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров В.Е., Смоленский В.В., Афоничкин В.К. Перспективы использования расплавленных солей в радиохимических технологиях // *Расплавы*. 2000. № 2. С. 59–65.
2. LeBlanc D. // *Nucl. Eng. Des.* 2010. **240**. P. 1644–1656.
<https://doi.org/10.101j.nucengdes.2009.12.033>
3. Khokhlov V., Ignatiev V., Afonichkin V. Evaluating physical properties of molten salt reactor fluoride mixtures // *J. Fluorine Chemistry*. 2009. **130**. P. 30–37.
4. Barnes J., Coutts R., Horne T., Thai J. Characterization of molten salts for application in molten salt reactors. *PAM Review*. 2019.
5. Magnusson J., Memmott M., Munro T. Review of thermophysical property methods applied to fueled and un-fueled molten salts // *Annals of Nuclear Energy*. 2020. **146**. P. 107608.
6. Serp J., Allibert M., Benes O., Delpech S., Feynberg O. and other. The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives // *Prog. Nucl. Energy*. 2014. **77**. P. 308–319.
7. Williams D.F. Assessment of candidate molten salt coolants for the advanced high-temperature reactor (AHTR), 2006.
8. Ядерные реакторы. Ч. 3. Материалы для ядерных реакторов. М.: Изд-во иностранной литературы, 1956.
9. Менли В., Кубс Д., де Ван Д., Дуглас Д., Инуи Х., Пэтриарка П., Роч Т., Скотт Д. Металлургические проблемы, связанные с использованием расплавленных систем фторидов // *Ядерное горючее и реакторные материалы*. 1959. С. 36–52.
10. Manly W.D., Adamson G.M., Coobs J.H., DeVan J.H., Douglas D.A., Hoffman E.E., Patriarca P., Aircraft reactor experiment-metallurgical aspects. ORNL-2349, 1957.
11. Игнатьев В.В., Крюков О.В., Хаперская А.В. и др. Жидкосолевого реактор для замыкания ядерного топливного цикла по всем актиноидам // *Атомная энергия*. 2018. **125**. № 5. С. 251–255.
12. Young D.J. *High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals*. Elsevier Science, 2016.
13. Guo S., Zhang J., Wub W., Zhou W. Corrosion in the molten fluoride and chloride salts and materials development for nuclear applications // *Progress in Material Science*. 2018. **97**. P. 448–487.
14. Wang Y., Zhang S., Ji X., Wang P., Li W. Material corrosion in molten fluoride salts // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2018. **13**. P. 4891–4900.

15. DeVan J.H., Evans R.B. Corrosion behavior of reactor materials in fluoride salt mixtures. ORNL-TM-328, 1962.
16. Janz G.J. // Molten Salts Handbook. 1967. P. 383–387.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-395642-2.50032-0>
17. Olson L.C., Ambrosek J.W., Sridharan K., Anderson M.H., Allen T.R. Materials corrosion in molten LiF–NaF–KF salt // J. Fluorine Chem. 2009. **130**. P. 67–73.
18. Kelleher B.C., Dolan K.P., Brooks P., Anderson M.H., Sridharan K. // J. Nucl. Eng. Radiat. Sci. 2015. **1**. № 4. P. 041010.
<https://doi.org/10.1115/1.4030963>
19. Zheng G., Kelleher B., Cao G., Anderson M., Allen T., Sridharan K. // J. Nucl. Mater. 2015. **46**. P. 143–150.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.03.004>
20. Yang X., Zhang D., Liu M., Feng S. and other // Corrosion Sci. 2016. **109**. P. 62–67.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.03.029>
21. De Van J.H. Effect of alloying additions of corrosion behavior of nickel-molybdenum alloys in fused fluoride mixtures. ORNL TM-2021, 1969.
22. Ozeryanaya I.N. Corrosion of metals by molten-salts in heat-treatment processes // Met. Sci. Heat Treat. 1985. **27**. № 3–4. P. 184–188.
23. Fabre S., Cabet C., Cassayre L., Chamelot P., Delepech S., Finne J., Massot L., Noel D. Use of electrochemical techniques to study the corrosion of metals in model fluoride melts // J. Nucl. Mater. 2013. **441**. P. 583–591.
24. Delpéch S., Cabet C., Slim C., Picard G.S. Molten fluorides for nuclear applications // Mater. Today. 2010. **13**. № 12. P. 34–41.
25. Raiman S.S., Lee S. Aggregation and data analysis of corrosion studies in molten chloride and fluoride salts // J. Nuclear Materials. 2018. **511**. P. 523–535.

HIGH-TEMPERATURE PASSIVATION OF THE SURFACE OF CANDIDATE MATERIALS FOR LSR BY ADDING O²⁻ TO THE SALT PHASE OF THE HALIDE MELT

E. A. Karfidov¹, Yu. P. Zaikov¹, E. V. Nikitina¹, K. E. Seliverstov¹

¹*Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia*

Experiments were carried out to determine the corrosion rate of stainless steel AISI 316 in a fluoride melt with different concentrations of O²⁻ (by adding lithium oxide to the melt in the concentration range from 0 to 5 wt %). The corrosion rate decreases by an order of magnitude at an oxygen anion concentration in the melt from 0.2 to 0.4 wt %, which may indicate the detection of the phenomenon of high-temperature passivation of the material due to the modification of the composition of the fluoride melt and a decrease in its corrosion activity. In addition, the type of intergranular and pitting corrosion typical of stainless steels in fluoride melts, which is the most dangerous from the point of view of the structural reactor material, changes to continuous when lithium oxide is added due to the “healing” of individual corrosion centers with excess oxygen-containing compounds. The formation of a protective layer of the spinel type with a thickness of 1 μm was established.

Keywords: corrosion, candidate materials for LSR, alkali metal halide melt, high-temperature passivation, spinel-type oxides

REFERENCES

1. Komarov V.Ye., Smolenskiy V.V., Afonichkin V.K. Perspektivy ispol'zovaniya rasplavlennykh soley v radiokhimicheskikh tekhnologiyakh [Prospects for the use of molten salts in radiochemical technologies] // Rasplavy. 2000. № 2. P. 59–65. [In Russian].
2. LeBlanc D. // Nucl. Eng. Des. 2010. **240**. P. 1644–1656.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.12.033>
3. Khokhlov V., Ignatiev V., Afonichkin V. Evaluating physical properties of molten salt reactor fluoride mixtures // Journal of Fluorine Chemistry. 2009. **130**. P. 30–37.
4. Barnes J., Coutts R., Horne T., Thai J. Characterization of molten salts for application in molten salt reactors. PAM Review. 2019.

5. Magnusson J., Memmott M., Munro T. Review of thermophysical property methods applied to fueled and un-fueled molten salts // *Annals of Nuclear Energy*. 2020. **146**. P. 107608.
6. Serp J., Allibert M., Benes O., Delpech S., Feynberg O. and other. The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives // *Prog. Nucl. Energy*. 2014. **77**. P. 308–319.
7. Williams D.F. Assessment of candidate molten salt coolants for the advanced high-temperature reactor (AHTR), 2006.
8. Yadernyye reaktory. Ch. 3. Materialy dlya yadernykh reaktorov [Materials for nuclear reactors]. M.: Izd-vo inostrannoy literatury, 1956. [In Russian].
9. Menli V., Kubs D., de Van D., Duglas D., Inui K.H., Petriarka P., Roch T., Skott D. Metallurgicheskiye problemy, svyazannyye s ispol'zovaniyem rasplavlennykh sistem fluoridov [Metallurgical problems associated with the use of molten fluoride systems] // *Yadernoye goryucheye i reaktornyye materialy*. 1959. P. 36–52. [In Russian].
10. Manly W.D., Adamson G.M., Coobs J.H., DeVan J.H., Douglas D.A., Hoffman E.E., Patriarca P., Aircraft reactor experiment-metallurgical aspects. ORNL-2349, 1957.
11. Ignat'yev V.V., Kryukov O.V., Khaperskaya A.V. i dr. Zhidkosolevoy reaktor dlya zamykaniya yadernogo toplivnogo tsikla po vsem aktinoidam [Liquid-salt reactor for closing the nuclear fuel cycle for all actinides] // *Atomnaya energiya*. 2018. **125**. № 5. P. 251–255. [In Russian].
12. Young D.J. High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals. Elsevier Science, 2016.
13. Guo S., Zhang J., Wub W., Zhou W. Corrosion in the molten fluoride and chloride salts and materials development for nuclear applications // *Progress in Material Science*. 2018. **97**. P. 448–487.
14. Wang Y., Zhang S., Ji X., Wang P., Li W. Material corrosion in molten fluoride salts // *Int. J. Electrochem. Sci*. 2018. **13**. P. 4891–4900.
15. DeVan J.H., Evans R.B. Corrosion behavior of reactor materials in fluoride salt mixtures. ORNL-TM-328, 1962.
16. Janz G.J. // *Molten Salts Handbook*. 1967. P. 383–387.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-395642-2.50032-0>
17. Olson L.C., Ambrosek J.W., Sridharan K., Anderson M.H., Allen T.R. Materials corrosion in molten LiF–NaF–KF salt // *J. Fluorine Chem*. 2009. **130**. P. 67–73.
18. Kelleher B.C., Dolan K.P., Brooks P., Anderson M.H., Sridharan K. // *J. Nucl. Eng. Radiat. Sci*. 2015. **1**. № 4. P. 041010.
<https://doi.org/10.1115/1.4030963>
19. Zheng G., Kelleher B., Cao G., Anderson M., Allen T., Sridharan K. // *J. Nucl. Mater*. 2015. **46**. P. 143–150.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.03.004>
20. Yang X., Zhang D., Liu M., Feng S. and other // *Corrosion Sci*. 2016. **109**. P. 62–67.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.03.029>
21. De Van J.H. Effect of alloying additions of corrosion behavior of nickel-molybdenum alloys in fused fluoride mixtures. ORNL TM-2021, 1969.
22. Ozeryanaya I.N. Corrosion of metals by molten-salts in heat-treatment processes // *Met. Sci. Heat Treat*. 1985. **27**. № 3–4. P. 184–188.
23. Fabre S., Cabet C., Cassayre L., Chamelot P., Delepech S., Finne J., Massot L., Noel D. Use of electrochemical techniques to study the corrosion of metals in model fluoride melts // *J. Nucl. Mater*. 2013. **441**. P. 583–591.
24. Delpech S., Cabet C., Slim C., Picard G.S. Molten fluorides for nuclear applications // *Mater. Today*. 2010. **13**. № 12. P. 34–41.
25. Raiman S.S., Lee S. Aggregation and data analysis of corrosion studies in molten chloride and fluoride salts // *J. Nuclear Materials*. 2018. **511**. P. 523–535.