

УДК 620.143

**КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СТАЛИ 12Х18Н10Т В РАСПЛАВЕ LiCl–KCl,  
СОДЕРЖАЩЕМ ДОБАВКИ ХЛОРИДОВ f-ЭЛЕМЕНТОВ**

© 2023 г. Э. А. Карфидов<sup>а</sup>, Е. В. Никитина<sup>а, \*</sup>, К. Е. Селиверстов<sup>а</sup>,  
П. Н. Мушников<sup>а</sup>, К. Р. Каримов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

\*e-mail: neekeetina@mail.ru

Поступила в редакцию 29.01.2023 г.

После доработки 03.04.2023 г.

Принята к публикации 03.04.2023 г.

При переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) предполагается использовать расплав LiCl–KCl (0.49 : 0.51) в инертной атмосфере. Все металлические материалы в данном солевом расплаве крайне подвержены коррозии, к тому же в процессе переработки ОЯТ как жидкая фаза (расплав), так и газовая, насыщаются продуктами распада, которые могут выступать в качестве дополнительных окислителей, усиливая агрессивность среды. В пирохимическую технологию ОЯТ включены операции, такие как мягкое хлорирование, электрорафинирование и металлизация, подразумевающие наличие в расплаве соединений хлоридов редкоземельных металлов (РЗМ) лантана, церия и неодима, а также хлоридов урана(III, IV). В данной работе было исследовано коррозионное поведение стали 12Х18Н10Т в расплаве LiCl–KCl, содержащем добавки NdCl<sub>3</sub>, CeCl<sub>3</sub>, LaCl<sub>3</sub>, UCl<sub>3</sub> и UCl<sub>4</sub> до 2 мас. %. Коррозионные испытания длительностью 100 ч были выполнены при температуре 500°C в инертной атмосфере аргона. Было установлено, что наличие хлоридов РЗМ значительно снижает деградацию исследуемой стали. Добавление (РЗМ)Cl<sub>3</sub> приводит к формированию на поверхности образцов соединения (РЗМ)OCl, толщина и сплошность которых увеличивается в следующем ряду: LaCl<sub>3</sub> < NdCl<sub>3</sub> < CeCl<sub>3</sub>. Формирование подобного соединения приводит к торможению коррозионного процесса стали 12Х18Н10Т за счет солевой пассивации поверхности. Добавление в расплав UF<sub>4</sub> вызывает значительную коррозию стали 12Х18Н10Т межкристаллитного типа. Введение в расплав UF<sub>3</sub> приводит к снижению скорости коррозии, что связано с преимущественным взаимодействием трехвалентного хлорида урана с содержащимся в расплаве растворенным молекулярным кислородом, и формированию на поверхности образцов нестехиометрического соединения с кристаллохимической формулой U<sub>3</sub>O<sub>7</sub> по данным микрорентгеноспектрального анализа.

*Ключевые слова:* коррозия, хлориды щелочных металлов, отработавшее ядерное топливо

DOI: 10.31857/S0235010623040035, EDN: XFTQCA

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) осуществляется с использованием водных технологий, предполагающих длительную выдержку ОЯТ до начала переработки, а также существенное количество жидких отходов и др. Разрабатываемая технология высокотемпературной переработки с последующей регенерацией ОЯТ включает несколько основных операций, физико-химические основы которых и механизмы протекания химических реакций до сих пор полностью не изу-

**Таблица 1.** Состав стали 12X18H10T согласно ее марочным данным, мас. %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Cu	W	Fe
<0.12	<0.8	<2.0	<0.035	<0.02	17.0–19.0	<0.5	9.0–11.0	<0.2	<0.8	<0.4	<0.2	Осн.

чены. Для реализации технологии необходимы материалы, устойчивые в этих условиях как с химической точки зрения, так и по механическим характеристикам.

Перспективные технологические среды из-за возможности их использования при переработке облученного ядерного топлива с малым временем выдержки – солевые расплавы. Это связано с увеличением эффективности разделения основных компонентов топлива, удалении продуктов деления, в первую очередь редкоземельных элементов, которые являются нейтронными ядами.

Высокотемпературная электрохимическая технология переработки ОЯТ лишена ряда недостатков существующих ныне технологий. Расплавленные соли практически не подвергаются радиолизу, поэтому выдержка ОЯТ до переработки может быть сокращена примерно до одного года.

При переработке отработавшего ядерного топлива реактора на быстрых нейтронах (ОЯТ РБН) предполагается использовать расплав LiCl–KCl (0.49 : 0.51) в инертной атмосфере. Все металлические материалы в данном солевом расплаве крайне подвержены коррозии, к тому же в процессе переработки ОЯТ как жидкая фаза (расплав), так и газовая, насыщаются продуктами распада, которые могут выступать в качестве дополнительных окислителей, усиливая агрессивность среды.

Разрушение и деградация материалов под действием химически агрессивных сред – коррозия – серьезная проблема для любого технологического процесса. Оборудование для высокотемпературных электрохимических технологий и переработки ОЯТ и разделения его компонентов подвергается воздействию ряда факторов, усугубляющих коррозию. Высокая температура, большой температурный диапазон эксплуатации различных технологических узлов, высокая коррозионная активность среды, ее движение и неоднородный состав, высокая вероятность гидролиза при контакте с воздухом, возможность образования шламовых продуктов, оказывающих абразивное действие – все это значительно снижает срок эксплуатации металлических и керамических материалов.

Пирохимическая технология переработки ОЯТ включает реализацию ряда процессов в расплавленных солях, при их проведении в электролите будут накапливаться соединения, в качестве имитаторов которых могут быть изучены хлориды редкоземельных металлов – лантана, церия и неодима, а также хлориды урана(III, IV).

В данной работе в качестве объекта исследования выбрана нержавеющая сталь 12X18H10T, поскольку данный материал имеет относительно высокую скорость коррозии, что позволяет посредством непродолжительных коррозионных испытаний (не более 100 часов) оценить влияние различных условий проведения процесса, в том числе состава солевой и газовой фазы, на характер деградации исследуемого материала.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Состав исследуемого материала (нержавеющая сталь 12X18H10T) согласно ГОСТ 5632–72 представлен в табл. 1.

Эвтектический расплав LiCl–KCl (58.2 и 41.8 мол. %, соответственно), имеющий температуру плавления 352°C, был приготовлен из индивидуальных солей LiCl и KCl марок “х. ч.”. Предварительно индивидуальные соли были подвергнуты двукратной зонной плавке в токе аргона (температура зоны нагрева: 750°C для LiCl и 850°C для KCl) для удаления примесей.

**Таблица 2.** Полученные скорости коррозии стали 12Х18Н10Т в расплаве LiCl–KCl–(РЗМ)Cl<sub>3</sub> в результате 100 часовой выдержки

Расплав	Скорость коррозии, г/м <sup>2</sup> · ч	
	по данным гравиметрического анализа	по данным элементного анализа
LiCl–KCl	0.062	0.148
LiCl–KCl–2 мас. % LaCl <sub>3</sub>	–0.099	0.025
LiCl–KCl–2 мас. % NdCl <sub>3</sub>	–0.060	0.061
LiCl–KCl–2 мас. % CeCl <sub>3</sub>	–0.008	0.105
LiCl–KCl–2 мас. % UCl <sub>3</sub>	0.687	0.702
LiCl–KCl–2 мас. % UCl <sub>4</sub>	–0.060	0.020

Для приготовления расплава LiCl–KCl–2 мас. % UCl<sub>4</sub> использовали металлический уран. Синтез расплавов LiCl–KCl–2 мас. % UCl<sub>4</sub> осуществлялся при температуре 700°С прямым хлорированием по уравнению (1):



В навеску эвтектики LiCl–KCl помещали расчетное количество металлического урана (рассчитанное по стехиометрии +10%). После чего, через солевой расплав пропускали газообразный хлор в течение 24 ч. В качестве контейнера использовали стеклоглеродный тигель.

Часть полученного хлоридного расплава, содержащего четырехвалентный уран, использовалась для приготовления расплава LiCl–KCl–2 мас. % UCl<sub>3</sub>, синтез которого можно описать следующим уравнением (2):



Для большей достоверности получаемых результатов, коррозионную выдержку проводили в параллели по три образца. Коррозионные испытания проводились в перчаточном боксе СПЕКС ГБ-02М, в котором непрерывно поддерживалась инертная атмосфера аргона с влажностью не более 2 ppm и содержанием кислорода 2–9 ppm. В качестве материала тигля использовали стеклоглерод, как наиболее стойкий и инертный материал в галогенидных средах.

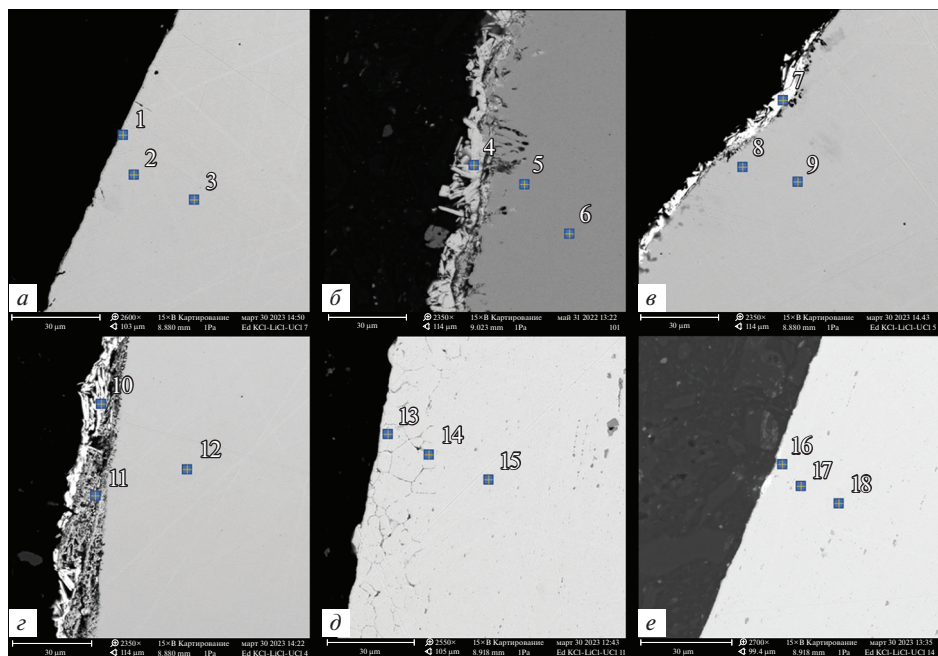
После испытаний образцы извлекались из отвердевшего расплава, отмывались от остатка солей в дистиллированной воде в термостате Tagler при 70°С в течение 60 мин, сушились в термо-шкафу в течение 180 мин и повторно взвешивались, для выполнения гравиметрического и микрорентгеноспектрального анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Скорости коррозии, полученные в результате 100-часовых коррозионных испытаний образцов стали 12Х18Н10Т в расплаве системы LiCl–KCl–(РЗМ)Cl<sub>3</sub>, представлены в табл. 2.

В результате 100 часовой коррозионной выдержки образцов стали 12Х18Н10Т в атмосфере аргона было установлено, что введение хлоридов РЗМ в расплав приводит к значительному снижению скорости коррозии стали. Влияние хлоридов РЗМ на снижение скорости коррозии увеличивается в ряду: CeCl<sub>3</sub> < NdCl<sub>3</sub> < LaCl<sub>3</sub>.

Введение в расплав UCl<sub>3</sub> приводит к значительному снижению скорости коррозии относительно образцов, выдержанных в эвтектическом расплаве KCl–LiCl. В свою



**Рис. 1.** Морфология шлифа поперечного сечения образцов стали 12X18H10T после коррозионных испытаний. Исследуемый расплав: *а* – KCl–LiCl, *б* – KCl–LiCl–2 мас. % LaCl<sub>3</sub>, *в* – KCl–LiCl–2 мас. % NdCl<sub>3</sub>, *г* – KCl–LiCl–2 мас. % CeCl<sub>3</sub>, *д* – KCl–LiCl–2 мас. % UCl<sub>4</sub>, *е* – KCl–LiCl–2 мас. % UCl<sub>3</sub>.

очередь, введение в расплав UCl<sub>4</sub> приводит к значительному увеличению деградации исследуемого материала.

На рис. 1 и в табл. 3 представлены результаты МРСА образцов стали 12X18H10T после 100 часов коррозионной выдержки в хлоридном расплаве при температуре 500°C.

По результатам МРСА установлено, что введение в расплав хлоридов РЗМ приводит к формированию на поверхности образцов стали 12X18H10T стехиометрического соединения (РЗМ)OCl. Толщина данного слоя увеличивается в ряду: CeCl<sub>3</sub> (3.4 мкм) → → NdCl<sub>3</sub> (3.9 мкм) → LaCl<sub>3</sub> (7.5 мкм). При введении в расплав CeCl<sub>3</sub> наблюдается приповерхностное обеднение исследуемой стали 12X12H10T по хрому.

Введение в расплав UCl<sub>3</sub> приводит к формированию на поверхности стали оксидных слоев с кристаллохимической формулой U<sub>3</sub>O<sub>7</sub>. Значительных изменений в морфологии поверхности не наблюдается. Снижение деградации материала связано с взаимодействием трехвалентного урана с растворенным молекулярным кислородом в расплаве, тем самым снижая долю кислорода взаимодействующего с компонентами исследуемой стали.

Введение в расплав UCl<sub>4</sub> приводит к возникновению значительной межкристаллитной коррозии равномерно распределенной по всему контуру шлифа поперечного сечения, с глубиной проникновения в среднем 25.6 мкм. Увеличение деградации материала связано с тем, что уран (+4) может являться дополнительным окислителем, помимо молекулярного кислорода, присутствующего как в газовой, так и в солевой фазе.

**Таблица 3.** Результаты МРСА шлифов поперечного сечения образцов стали 12Х18Н10Т после коррозионных испытаний

Элемент	Содержание, ат. %								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fe	71.65	71.07	71.07	–	71.66	71.60	1.16	72.28	72.64
Cr	17.47	18.17	18.48	–	17.78	17.98	0.87	17.15	17.42
Ni	10.02	9.24	9.18	–	8.89	8.82	0.12	9.30	8.89
Ti	0.55	0.88	0.76	–	0.89	0.76	0.06	0.83	0.55
Mn	0.32	0.63	0.51	–	0.78	0.83	–	0.44	0.50
U/РЗМ	–	–	–	34.19			24.87	–	
O	–	–	–	29.77			47.32		
Cl				36.05			25.59		

Элемент	Содержание, ат. %								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Fe	3.00	31.90	72.86	78.41	70.90	71.06	–	71.39	71.17
Cr	1.58	2.80	17.43	11.18	18.48	18.70	–	18.16	18.50
Ni	–	36.65	9.25	9.06	9.11	8.77	–	9.13	8.95
Ti	0.07	–	0.45	0.68	0.77	0.80	–	0.70	0.73
Mn	0.04	–	0.00	0.67	0.74	0.67	–	0.62	0.64
U/РЗМ	28.77	2.91		–	–	–	29.3	–	–
O	38.13	25.75		–	–	–	70.7	–	–
Cl	28.42								

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано коррозионное поведение стали 12Х18Н10Т в расплаве LiCl–KCl, содержащем добавки NdCl<sub>3</sub>, CeCl<sub>3</sub>, LaCl<sub>3</sub>, UCl<sub>3</sub> и UCl<sub>4</sub>.

Установлено, что наличие хлоридов РЗМ значительно снижает деградацию исследуемой стали. Добавление (РЗМ)Cl<sub>3</sub> приводит к формированию на поверхности образцов соединений (РЗМ)OCl, толщина и сплошность которых увеличивается в следующем ряду: CeCl<sub>3</sub> (3.4 мкм) → NdCl<sub>3</sub> (3.9 мкм) → LaCl<sub>3</sub> (7.5 мкм). Формирование подобного соединения приводит к пассивации поверхности стали 12Х18Н10Т экранирующего типа.

Введение в расплав UF<sub>4</sub> вызывает значительную коррозию стали 12Х18Н10Т межкристаллитного типа.

Введение в расплав UF<sub>3</sub> приводит к снижению скорости коррозии, что связано с преимущественным взаимодействием трехвалентного хлорида урана, содержащимися в расплаве в виде молекулярного кислорода, и формированию на поверхности образцов U<sub>3</sub>O<sub>7</sub>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов М.В., Озерная И.Н. Коррозия металлов в расплавленных солевых средах и защита от коррозии // Коррозия и защита металлов. Итоги науки и техники. 1973. 2. С. 171–209.

2. Кочергин В.П. Защита металлов от коррозии в ионных расплавах и растворах электролитов. Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 1991.
3. Abramov A.V., Polovov I.B., Rebrin O.I., Volkovich V.A., Lisenko D.G. Corrosion behavior of austenitic steels and their components in niobium-containing chloride melts // *Russian Metallurgy*. 2014. № 2. P. 159–165.
4. Никитина Е.В., Ткачева О.Ю., Карфидов Э.А., Руденко А.В., Муллабаев А.Р., Медведев Д.А. Высокотемпературная коррозия в расплавленных солях: уч. пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 2021.
5. Guo Sh., Zhang J., Wu W., Zhou W. // *Progress in Materials Science*. 2018. **97**. P. 448–487. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.003>
6. Wang Y., Zhang Sh., Ji X., Wang P., Li W. // *Int. J. Electrochem. Sci*. 2018. **13**. P. 4891–4900. <https://doi.org/10.20964/2018.05.33>
7. Lambrinou K., Charalampopoulou E., Van der Donck T., Delville R., Schryvers D. // *J. Nuclear Materials*. 2017. **490**. P. 9–27. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.04.004>
8. Knödler R. // *J Appl Electrochem*. 1988. **18**. P. 653–656. <https://doi.org/10.1007/BF01022265>
9. Shulga A.V. // *J. Nuclear Materials*. 2008. **373**. № 1–3. P. 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.04.050>
10. Raiman S.S., Bartels D.M., Was G.S. Radiolysis driven changes to oxide stability during irradiation-corrosion of 316L stainless steel in high temperature water // *J. Nuclear Materials*. 2017. **493**. P. 40–52.
11. Kim S.T., Jeon S., Lee I., Park, Y. Effects of rare earth metals addition on the resistance to pitting corrosion of super duplex stainless steel – Part 1. // *Corrosion Science*. 2010. **52**. P. 1897–1904.
12. Gou J., Wang Y., Li X., Zhou F. Effect of rare earth oxide nano-additives on the corrosion behavior of Fe-based hardfacing alloys in acid, near-neutral and alkaline 3.5 wt % NaCl solutions // *Applied Surface Science*. 2018. **431**. P. 143–151.
13. 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.
14. Укше Е.А., Леонова Л.С., Букун Н.Г. Газы в расплавленных солях // *Сб. Ионные расплавы*. 1974. № 1.
15. Николаева Е.В. Кинетика катодного восстановления кислорода в расплавленных хлоридах щелочных металлов. Дис. ... на соиск. ст. к. х. н. Екатеринбург, 2001.
16. Hofmeister M., Klein L., Miran H., Rettig R., Virtanen S., Singer R.F. Corrosion behavior of stainless steels and a single crystal superalloy in a ternary LiCl–KCl molten salt // *Corrosion Science*. 2015. **90**. P. 46–53.
17. Hoover R.O., Shaltry M.R., Martin S., Sridharan K., Phongikaroon S. Electrochemical studies and analysis of 1–10 wt % UCl<sub>3</sub> concentrations in molten LiCl–KCl eutectic // *J. Nuclear Materials*. 2014. **452**. P. 389–396.
18. Luo L.-X., Liu Y.-L., Liu N., Wang L., Yuan L.-Y., Chai Z.-F., Shi W.-Q. Electrochemical and thermodynamic properties of Nd(III)/Nd(0) couple at liquid Zn electrode in LiCl–KCl melt // *Electrochimica Acta*. 2016. **191**. P. 1026–1036.
19. Liu Y.-L., Yuan L.-Y., Ye G.-A. et al. Co-reduction behaviors of lanthanum and aluminum ions in LiCl–KCl eutectic // *Electrochimica Acta*. 2014. **147**. P. 104–113.
20. Bargi P., Simpson M.F. Potentiometric measurement of activity of rare earth chlorides (La, Gd, Ce, Nd) in LiCl–KCl eutectic salt // *Electrochimica Acta*. 2018. **259**. P. 1120–1128.
21. Delpech S., Jaskiewicz S., Rodrigues D. Electrochemistry of thorium fluoride in LiCl–KCl eutectic melts and methodology for speciation studies with fluorides ions // *Electrochimica Acta*. 2014. **144**. P. 383–390.
22. Kumar K., Smith N. D., Lichtenstein T., Kim H. Electrochemical studies of molten sulfates in LiCl–KCl–Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at 700°C // *Corrosion Science*. 2018. **133**. P. 17–24.
23. Bargi P., Simpson M.F. Determination of activity coefficient of lanthanum chloride in molten LiCl–KCl eutectic salt as a function of cerium chloride and lanthanum chloride concentrations using electromotive force measurements // *J. Nuclear Materials*. 2016. **482**. P. 248–256.
24. Guo Gh., Zhuo W., Wang Y., Zhang J. Europium induced alloy corrosion and creaking in molten chloride media for nuclear applications // *Corrosion Science*. 2020. **163**. 108279.
25. Barraza-Fierro J.I., Espinosa-Medina M.A., Hernandez-Hernandez M., Liu H.D., Sosa-Hernandez E. Effect of Li and Cu addition on corrosion of Fe–40 at % Al intermetallics in molten LiCl–KCl eutectic salt // *Corrosion Science*. 2012. **59**. P. 119–126.

**CORROSION BEHAVIOR OF 12Cr18Ni10Ti STEEL IN LiCl–KCl MELT CONTAINING ADDITIVES OF *f*-ELEMENT CHLORIDES****E. A. Karfidov<sup>1</sup>, E. V. Nikitina<sup>1</sup>, K. E. Seliverstov<sup>1</sup>, P. N. Mushnikov<sup>1</sup>, K. R. Karimov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Institute of High-Temperature Electrochemistry of the UB of the RAS, Yekaterinburg, Russia*

When reprocessing spent nuclear fuel, it is supposed to use LiCl–KCl melt (0.49:0.51) in an inert atmosphere, all metal materials in this salt melt are extremely susceptible to corrosion, besides, during the processing of spent fuel, both the liquid (melt) and the gas phase are saturated with decay products that can act as additional oxidizing agents, increasing the aggressiveness of the environment. The pyrochemical technology of SNF includes operations such as soft chlorination, electrofining and metallization, implying the presence in the melt of compounds of chlorides of rare earth metals lanthanum, cerium and neodymium, as well as uranium(III, IV) chlorides. In this work, the corrosion behavior of 12CR18NI10TI steel in LiCl–KCl melt containing NdCl<sub>3</sub>, CeCl<sub>3</sub>, LaCl<sub>3</sub>, UCl<sub>3</sub> and UCl<sub>4</sub> additives up to 2 wt % was investigated. Corrosion tests lasting 100 hours were performed at a temperature of 500°C in an inert argon atmosphere. It was found that the presence of REM chlorides significantly reduces the degradation of the steel under study. The addition of (REM)Cl<sub>3</sub> leads to the formation of a compound (REM) on the surface of the samples OCl, the thickness and continuity of which increases in the following row: LaCl<sub>3</sub> < NdCl<sub>3</sub> < CeCl<sub>3</sub>. The formation of such a compound leads to the inhibition of the corrosion process of steel 12CR18NI10TI due to salt passivation of the surface. The addition of UF<sub>4</sub> to the melt causes significant corrosion of 12CR18NI10TI intercrystalline steel. The introduction of UF<sub>3</sub> into the melt leads to a decrease in the corrosion rate, which is associated with the predominant interaction of trivalent uranium chloride with dissolved molecular oxygen contained in the melt, and the formation of a non-stoichiometric compound with the crystal chemical formula U<sub>3</sub>O<sub>7</sub> on the surface of samples according to microrentenospectral analysis.

*Keywords:* corrosion, alkali metal chlorides, spent nuclear fuel

**REFERENCES**

1. Smirnov M.V., Ozeryanaya I.N. Korroziya metallov v rasplavlennykh solevykh sredakh i zashchita ot korrozii [Corrosion of metals in molten salt media and protection against corrosion] // Korroziya i zashchita metallov. Itogi nauki i tekhniki. 1973. **2**. P. 171–209. [In Russian].
2. Kochergin V.P. Zashchita metallov ot korrozii v ionnykh rasplavakh i rastvorakh elektrolitov [Protection of metals from corrosion in ionic melts and electrolyte solutions]. Yekaterinburg: Izd-vo UrGU, 1991. [In Russian].
3. Abramov A.V., Polovov I.B., Rebrin O.I., Volkovich V.A., Lisenko D.G. Corrosion behavior of austenitic steels and their components in niobium-containing chloride melts // Russian Metallurgy. 2014. № 2. P. 159–165.
4. Nikitina Ye.V., Tkacheva O.Yu., Karfidov E.A., Rudenko A.V., Mullabayev A.R., Medvedev D.A. Vysokotemperaturnaya korroziya v rasplavlennykh solyakh: uch. Posobiye [High-temperature corrosion in molten salts: a textbook]. Yekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta. [In Russian].
5. Guo Sh., Zhang J., Wu W., Zhou W. // Progress in Materials Science. 2018. **97**. P. 448–487. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.003>
6. Wang Y., Zhang Sh., Ji X., Wang P., Li W. // Int. J. Electrochem. Sci. 2018. **13**. P. 4891–4900. <https://doi.org/10.20964/2018.05.33>
7. Lambrinou K., Charalampopoulou E., Van der Donck T., Delville R., Schryvers D. // J. Nuclear Materials. 2017. **490**. P. 9–27. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.04.004>
8. Knödler R. // J Appl Electrochem. 1988. **18**. P. 653–656. <https://doi.org/10.1007/BF01022265>
9. Shulga A.V. // J. Nuclear Materials. 2008. **373**. № 1–3. P. 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.04.050>
10. Raiman S.S., Bartels D.M., Was G.S. Radiolysis driven changes to oxide stability during irradiation-corrosion of 316L stainless steel in high temperature water // J. Nuclear Materials. 2017. **493**. P. 40–52.
11. Kim S.T., Jeon S., Lee I., Park, Y. Effects of rare earth metals addition on the resistance to pitting corrosion of super duplex stainless steel – Part 1. // Corrosion Science. 2010. **52**. P. 1897–1904.

12. Gou J., Wang Y., Li X., Zhou F. Effect of rare earth oxide nano-additives on the corrosion behavior of Fe-based hardfacing alloys in acid, near-neutral and alkaline 3.5 wt % NaCl solutions // *Applied Surface Science*. 2018. **431**. P. 143–151.
13. 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.
14. Ukshe Ye.A., Leonova L.S., Bukun N.G. Gazy v rasplavlennykh solyakh [Gases in molten salts] // *Sb. Ionnyye rasplavy*. 1974. № 1. [In Russian].
15. Nikolayeva Ye.V. Kinetika katodnogo vosstanovleniya kisloroda v rasplavlennykh khloridakh shchelochnykh metallov [Kinetics of cathodic oxygen reduction in molten alkali metal chlorides]. Dissertation for the degree of Ph.D. Yekaterinburg, 2001. [In Russian].
16. Hofmeister M., Klein L., Miran H., Rettig R., Virtanen S., Singer R.F. Corrosion behavior of stainless steels and a single crystal superalloy in a ternary LiCl–KCl molten salt // *Corrosion Science*. 2015. **90**. P. 46–53.
17. Hoover R.O., Shaltry M.R., Martin S., Sridharan K., Phongikaroon S. Electrochemical studies and analysis of 1–10 wt %  $UCl_3$  concentrations in molten LiCl–KCl eutectic // *J. Nuclear Materials*. 2014. **452**. P. 389–396.
18. Luo L.-X., Liu Y.-L., Liu N., Wang L., Yuan L.-Y., Chai Z.-F., Shi W.-Q. Electrochemical and thermodynamic properties of Nd (III)/Nd (0) couple at liquid Zn electrode in LiCl–KCl melt // *Electrochimica Acta*. 2016. **191**. P. 1026–1036.
19. Liu Y.-L., Yuan L.-Y., Ye G.-A. et al. Co-reduction behaviors of lanthanum and aluminum ions in LiCl–KCl eutectic // *Electrochimica Acta*. 2014. **147**. P. 104–113.
20. Bagri P., Simpson M.F. Potentiometric measurement of activity of rare earth chlorides (La, Gd, Ce, Nd) in LiCl–KCl eutectic salt // *Electrochimica Acta*. 2018. **259**. P. 1120–1128.
21. Delpech S., Jaskieowicz S., Rodrigues D. Electrochemistry of thorium fluoride in LiCl–KCl eutectic melts and methodology for speciation studies with fluorides ions // *Electrochimica Acta*. 2014. **144**. P. 383–390.
22. Kumar K., Smith N.D., Lichtenstein T., Kim H. Electrochemical studies of molten sulfates in LiCl–KCl– $Na_2SO_4$  at 700°C // *Corrosion Science*. 2018. **133**. P. 17–24.
23. Bargi P., Simpson M.F. Determination of activity coefficient of lanthanum chloride in molten LiCl–KCl eutectic salt as a function of cerium chloride and lanthanum chloride concentrations using electromotive force measurements // *J. Nuclear Materials*. 2016. **482**. P. 248–256.
24. Guo Gh., Zhuo W., Wang Y., Zhang J. Europium indaced alloy corrosion and cacking in molten chloride media for nuclear applications // *Corrosion Science*. 2020. **163**. 108279.
25. Barraza-Fierro J.I., Espinosa-Medina M.A., Hernandez-Hernandez M., Liu H.D., Sosa-Hernandez E. Effect of Li and Cu addition on corrosion of Fe–40 at % Al intermetallics in molten LiCl–KCl eutectic salt // *Corrosion Science*. 2012. **59**. P. 119–126.