

УДК: 620.143

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ НИКЕЛЯ  
В РАСПЛАВЕ LiCl-KCl ПРИ 500°C В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ СОДЕРЖАНИЯ Li<sub>2</sub>O И LiOH**

© 2024 г. К. Е. Селиверстов<sup>1</sup>, Е. В. Никитина<sup>1,\*</sup>, Э. А. Карфидов<sup>1</sup>,  
А. Е. Дедюхин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

\*e-mail: neekeetina@mail.ru

Поступила в редакцию 11.01.2024

После исправления 25.01.2024

Принята к публикации 30.01.2024

Расплавленные хлориды щелочных металлов, используемые в пиротехнологиях, являются агрессивными коррозионными агентами. Высокая рабочая температура процесса, неоднородность среды, значительная коррозионная активность солевого расплава обуславливают необходимость как поиска устойчивых конструкционных материалов, так и разработки способов защиты конструкционных элементов высокотемпературных технологических устройств. Методы снижения коррозионных потерь, традиционно используемые в низкотемпературных средах, неприменимы при высоких температурах.

В статье рассмотрено влияние кислородосодержащих примесей (оксида и гидроксида лития) на коррозионное поведение металлического никеля (марка НП1) – основного компонента кандидатных конструкционных сплавов, термодинамически и структурно устойчивого материала в расплаве для осуществления процесса электролитического рафинирования ОЯТ. Описана методика подготовки солевого электролита LiCl–KCl и получения оксида лития путем термического разложения безводного гидроксида лития под вакуумом, определены концентрации примесей в электролите и синтезированном оксиде лития. Представлена установка для проведения коррозионных испытаний в условиях инертной атмосферы перчаточного бокса.

Для оценки коррозионной стойкости материала были использованы: гравиметрический анализ, МРСА поверхности и шлифов поперечного сечения и РФА поверхности образцов. Получены зависимости скорости коррозии материала от концентрации кислородосодержащих добавок Li<sub>2</sub>O и LiOH. По совокупности данных гравиметрического, микрорентгоспектрального и рентгенофазового анализов установлено, что образцы металлического никеля демонстрируют высокую коррозионную стойкость в исследуемых расплавах с введением добавок Li<sub>2</sub>O и LiOH.

*Ключевые слова:* коррозия, никель, хлоридный расплав, LiCl–KCl, кислородсодержащие добавки.

DOI: 10.31857/S0235010624030088

## ВВЕДЕНИЕ

Солевые расплавы – перспективные технологические среды для переработки облученного ядерного топлива, поскольку практически не подвергаются радиолитизации и длительность выдержки ОЯТ до переработки может быть сокращена примерно до одного года [1]. Тем не менее в солевых расплавах высокая температура и концентрация агрессивных веществ, высокая скорость протекания процесса приводят к разрушению металлического материала – и настоятельной необходимости поиска способов защиты конструкционного материала от агрессивного воздействия расплавленных сред. В данной работе рассмотрено влияние кислородсодержащих примесей (оксида лития и гидроксида лития), вводимых в расплав LiCl–KCl, на коррозионное поведение никеля марки НП1.

Никель является наиболее перспективным для использования в качестве основного компонента конструкционных материалов в реакторостроении за счет его термодинамической устойчивости. Тем не менее никель подвержен коррозии, особенно в расплавах, содержащих примесные элементы как из исходного сырья, так и искусственно вводимых добавок веществ.

Целью работы является оценка влияния кислородсодержащих примесей (оксида лития и гидроксида лития) на коррозионное поведение металлического никеля марки НП1.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

### *Подготовка и аттестация исследуемых образцов металлического никеля*

В данной работе в качестве исследуемого материала использовали металлический никель марки НП1. Состав материала согласно ГОСТ 492-2006 [2] представлен в табл. 1.

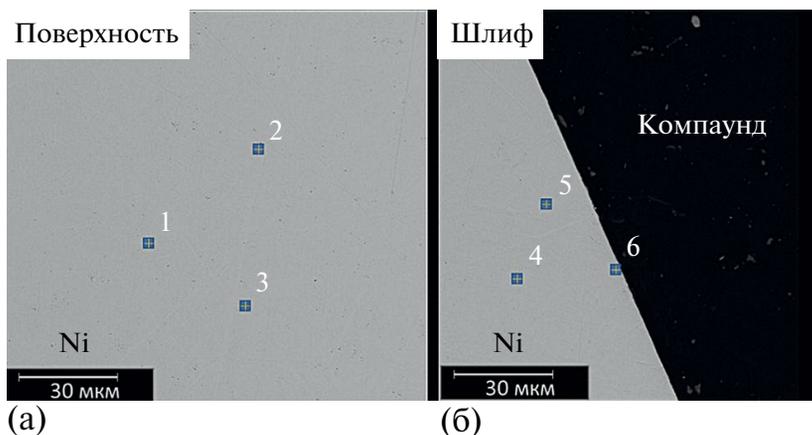
Для оценки соответствия химического состава исследуемых образцов марочному проводился микрорентгеноспектральный анализ поверхности и шлифов поперечного сечения, а также рентгенофазовый анализ (рис. 1, табл. 2).

По результатам МРСА, на исходных образцах металлического никеля не наблюдается неоднородности поверхности, а компонентный состав никеля НП1 соответствует марочному (табл. 1).

Исходные образцы никеля НП1 для экспериментов нарезали из листов проката с помощью отрезного станка Srtuers Secotom-20. Размер пластин составлял 10×15–20×1.5 мм. Далее образцы шлифовали и полировали абразивной бумагой различной зернистости (марочное значение от P160, P400, P800 до P2000, согласно ГОСТ 52381-2005[3]). Измерение площади образцов производили

**Таблица 1.** Состав исследуемых материалов согласно марочным данным

Исследуемый материал	Содержание, мол. %										
	Si	Mn	C	Zn	Cr	Al	Ni	Co	Ti	Cu	Fe
НП1	< 0.03	<0.002	<0.01	<0.005	–	–	99.9	–	–	<0.015	< 0.04



**Рис. 1.** МРСА и РФА исходных образцов металлического никеля: *а)* поверхность образца, *б)* шлиф поперечного сечения образца, *в)* результаты РФА анализа.

**Таблица 2.** Результаты МРСА исходного образца никеля НП1 в отдельных точках

Элемент	Содержание, мол, %					
	Поверхность			Шлиф		
	1	2	3	4	5	6
Ni	100	100	100	97.95	99.1	99.88
C	—	—	—	—	—	0.12
Si	—	—	—	1.45	0.9	—
O	—	—	—	0.6	—	—

цифровым штангенциркулем с точностью до 2-го знака после запятой. Обезжиривание осуществляли в спиртово-ацетоновой смеси для удаления органических и неорганических примесей с поверхности материалов с последующей сушкой в термощкафу для удаления влаги. Измерение массы образцов испытаний производили с помощью весов AND GR-202 с точностью до 5-го знака после запятой.

Для большей достоверности получаемых результатов коррозионную выдержку проводили в параллели по три образца. Определение коррозионных характеристик осуществлялось в перчаточном боксе СПЕКС ГБ-02М, в котором непрерывно поддерживалась инертная атмосфера аргона с влажностью не более 0.1 ppm и содержанием кислорода не более 14 ppm.

*Подготовка и аттестация эвтектического расплава  $\text{LiCl-KCl}$ ,  
 $\text{LiCl-KCl-nLiOH}$ ,  $\text{LiCl-KCl-nLi}_2\text{O}$*

Эвтектический расплав  $\text{LiCl-KCl}$  (58.2 и 41.8 мол.% соответственно), имеющий температуру плавления 352°C, был приготовлен из индивидуальных солей  $\text{LiCl}$  и  $\text{KCl}$  марки «х.ч.».

После сушки при температуре 300°C в течение 6 ч индивидуальные соли были подвергнуты двукратной зонной плавке в токе аргона (температура зоны нагрева: 750°C для  $\text{LiCl}$  и 850°C для  $\text{KCl}$ ) для удаления примесей. Полученные солевые слитки индивидуальных солей были перенесены в перчаточный бокс СПЕКС ГБ-02М, где осуществляли отделение очищенной части от хвостовой.

Навески солей необходимой массы взвешивали на аналитических весах DA-224С, размещенных непосредственно в перчаточном боксе.

Все технологические процессы после переноса в закрытой ячейке индивидуальных солей из зонной плавки, в том числе размол, измерение массы навесок, необходимых для приготовления эвтектического расплава  $\text{LiCl-KCl}$ , смешивание и загрузка ячеек для дальнейшего проведения испытаний, были осуществлены в перчаточном боксе. Необходимость выполнения данных операций в инертной атмосфере обусловлена крайне высокой гигроскопичностью хлорида лития.

Для определения примесного состава был проведен элементный анализ синтезированного эвтектики несогласованность  $\text{LiCl-KCl}$  с использованием масс-спектропии с индуктивно-связанной плазмой (табл. 3).

По результатам химического анализа эвтектического солевого электролита  $\text{LiCl-KCl}$  следует, что данный расплав может быть использован как основа для синтеза солевых композиций  $\text{LiCl-KCl-Li}_2\text{O}$  и  $\text{LiCl-KCl-LiOH}$ .

Для приготовления солевой композиции  $\text{LiCl-KCl-LiOH}$  использовался моногидрат гидроксида лития марки «х.ч.».

Оксид лития получали термическим разложением безводного гидроксида лития под вакуумом. Моногидрат гидроксида лития марки обезвоживали под вакуумом при температуре 300°C. Безводный  $\text{LiOH}$  помещали в тигель из оксида магния, тигель устанавливали в герметичную кварцевую пробирку и проводили удаление остаточных следов влаги при температуре 450°C под вакуумом до

**Таблица 3.** Примесный состав синтезированной эвтектической смеси  $\text{LiCl-KCl}$

Элемент	Содержание, мас. %	Элемент	Содержание, мас. %
Ti	0.0003	Co	<0.0001
Cr	0.0002	Cu	0.0001
Fe	0.0003	V	<0.0001
Ni	<0.0001	Zr	<0.0001
Mn	0.0001	Mg	0.0002
Ca	0.0014		

прекращения выделения газообразных продуктов. После прекращения газообразования температуру увеличивали до 800°C и обрабатывали синтезированный  $\text{Li}_2\text{O}$  водородом до полной термической диссоциации примесного карбоната лития [4]. Синтезированный оксид лития представлял собой белый порошок с массовой долей оксида лития 99% и содержанием  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  не более 0.5 мас. %.

В табл. 4 представлены результаты элементного анализа (анализ выполнен в количестве 3 параллелей) для синтезированного оксида лития.

По результатам элементного анализа в исходном оксиде лития наблюдается повышенная концентрация примесей (Ca, Mg) сравнительно с синтезированной смесью  $\text{KCl-LiCl}$ , что обусловлено технологией получения данного вещества и чистотой исходных реагентов.

#### *Установка для проведения коррозионных испытаний*

Для проведения коррозионных экспериментальных исследований в инертной газовой среде высокочистого аргона, непрерывно поддерживающейся в перчаточном боксе, использовали запатентованную экспериментальную установку (Патент № 2758772 [5], рис. 2).

Предложенная установка, имеющая изолированные друг от друга металлические трубы, обеспечивает физическое разделение рабочих зон отдельных экспериментов, что необходимо в условиях работы с расплавами галогенидов щелочных металлов. Конструкция устройства позволяет проводить одновременно три параллельных, то есть независимых друг от друга, эксперимента.

В качестве контейнера, в котором непосредственно размещался солевой электролит, использовали стеклоуглеродный тигель.

Коррозионные испытания проводили при температуре 500°C в течение 100 ч.

#### *Методы анализа*

После испытаний образцы извлекали из отвердевшего расплава, отмывали от остатка солей в дистиллированной воде в термостате Tagler при температуре 70°C в течение 120 мин. Изменение морфологии поверхности исследуемых образцов в результате коррозионной выдержки фиксировали с помощью МРСА поверхности и шлифов поперечного сечения, выполненного на микроскопе KY-KY EM8200. Фазовый состав исследуемых образцов после коррозионных испытаний определяли с помощью РФА, выполненного на дифрактометре Rigaku D/MAX-2200VL/PC.

**Таблица 4.** Примесный состав синтезированного  $\text{Li}_2\text{O}$

Элемент	Содержание примесей, мас. %	Элемент	Содержание примесей, мас. %
Ti	0.0007	Co	<0.0001
Cr	0.0001	Cu	0.0004
Fe	0.0004	V	<0.0001
Ni	0.0003	Zr	<0.0001
Mn	<0.0001	Mg	0.0014
Ca	0.0030		



**Рис. 2.** Конструкция используемой в перчаточном боксе сборной установки для изучения высокотемпературной коррозии: *а)* внешний вид рабочей ячейки, *б)* конструкция рабочей ячейки

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлен внешний вид образцов металлического Ni после высокотемпературных коррозионных испытаний, выполненных в хлоридных расплавах на основе LiCl–KCl при температуре 500°C продолжительностью 100 ч.

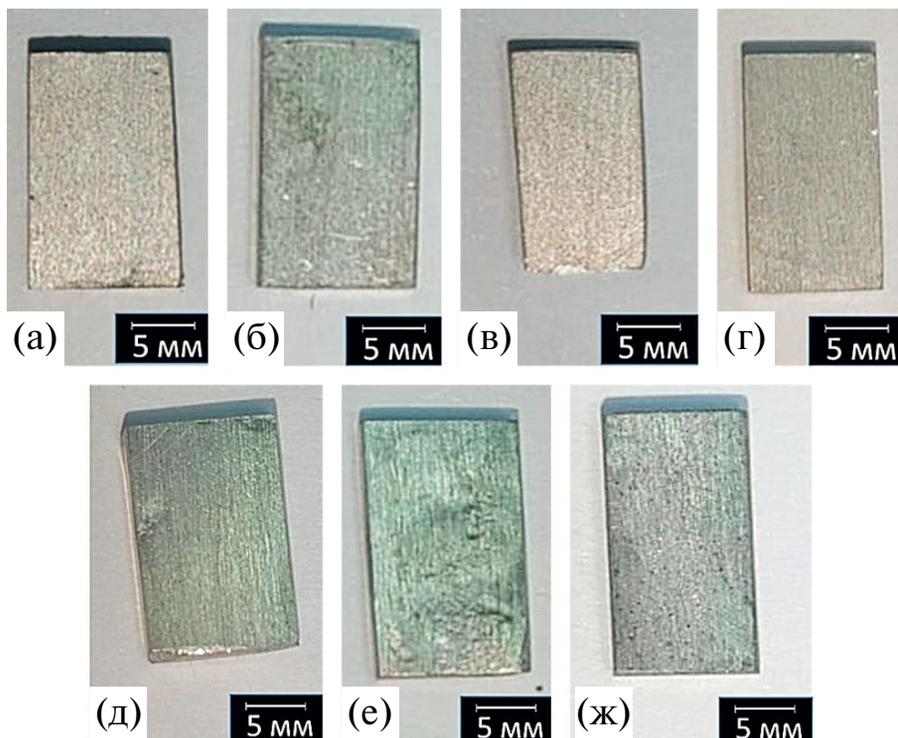
Видимых визуальных изменений образцов никеля в результате коррозионной выдержки в расплаве LiCl–KCl, содержащем добавки LiOH и Li<sub>2</sub>O, не наблюдалось.

Скорости коррозии для образцов металлического никеля, выдержанных в расплаве LiCl–KCl, содержащем добавки до 2 мол. % LiOH и Li<sub>2</sub>O, представлены на рисунке 4.

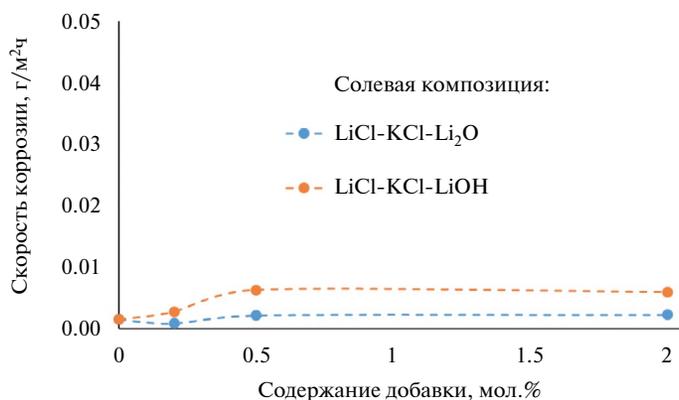
По результатам гравиметрического анализа было установлено, что образцы металлического никеля подвержены незначительной деградации в исследуемых расплавах (скорость коррозии составляет менее 0.007 г/м<sup>2</sup>ч). Также отмечено, что скорость коррозии никеля незначительно возрастает при введении в солевой электролит оксидов и гидроксидов лития.

На рис. 5 представлены результаты МРСА образцов металлического никеля после коррозионных испытаний в расплаве LiCl–KCl, содержащем добавку оксида лития или гидроксида лития.

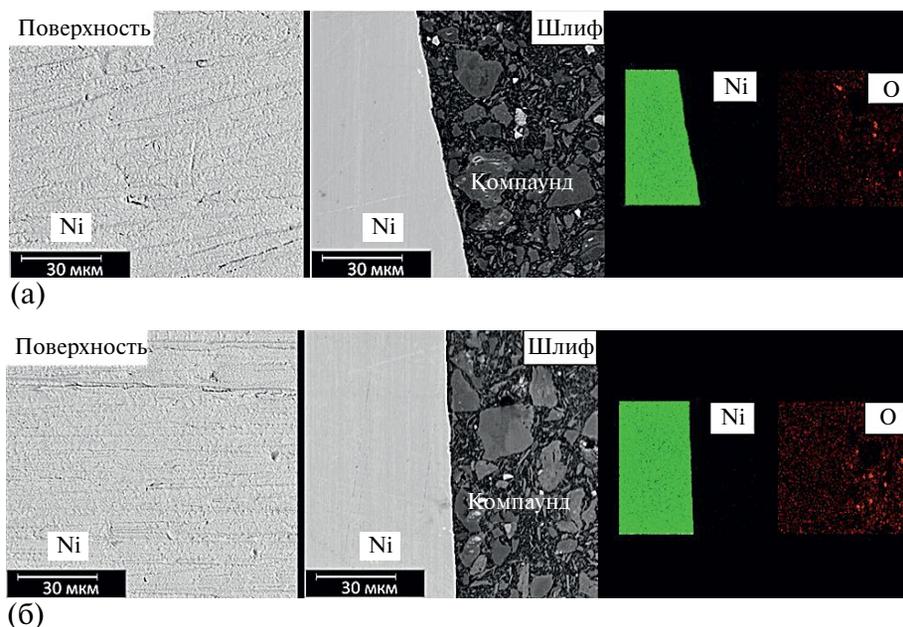
По результатам СЭМ, на поверхности образцов, выдержанных в эвтектическом расплаве и в расплавах, содержащих добавку Li<sub>2</sub>O или LiOH, наблюдаются



**Рис. 3.** Внешний вид образцов металлического Ni после коррозионных испытаний в расплаве: а) LiCl–KCl; б) LiCl–KCl–0.2%Li<sub>2</sub>O; в) LiCl–KCl–0.5%Li<sub>2</sub>O; г) LiCl–KCl–2.0%Li<sub>2</sub>O; д) LiCl–KCl–0.2%LiOH; е) LiCl–KCl–0.5%LiOH; ж) LiCl–KCl–2.0%LiOH.



**Рис. 4.** Скорости коррозии образцов металлического никеля в солевых композициях на основе LiCl–KCl.



**Рис. 5.** СЭМ поверхности и шлифов поперечного сечения образцов металлического никеля, выдержанных в расплавах на основе LiCl-KCl при температуре 500°C. Солевой электролит: а) LiCl-KCl; б) LiCl-KCl-2%Li<sub>2</sub>O; в) LiCl-KCl-2%LiOH.

единичные очаги точечной коррозии глубиной до 2 мкм. В приповерхностном слое не обнаружено кислородсодержащих соединений.

На рис. 6 представлены результаты РФА образцов металлического никеля после коррозионных испытаний в расплаве LiCl-KCl, содержащем добавку оксида лития или гидроксида лития.

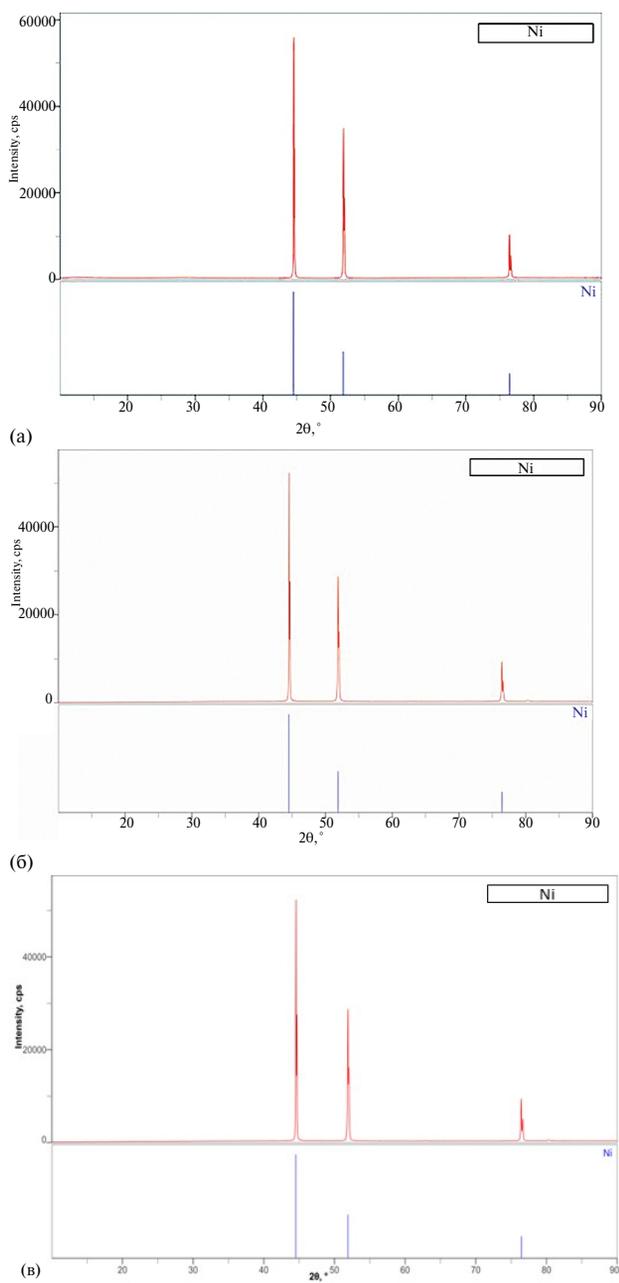
По результатам РФА было установлено отсутствие образования новых фаз на поверхности образцов металлического никеля в результате коррозионных испытаний.

Таким образом, можно заключить, что никель обладает высокой структурной и химической устойчивостью в исследуемых солевых электролитах при температуре 500°C.

Наблюдаемые единичные очаги точечной коррозии связаны с присутствием в составе металлического никеля марки «НП1» примесных металлов, таких как Fe, Zn (общее содержание примесей менее 0.1%).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы были установлены закономерности процессов взаимодействия металлического никеля марки НП1 с расплавом хлоридов лития и калия при температуре 500°C, при выдержке в течение 100 ч, который содержит добавки гидроксида лития или оксида лития:



**Рис. 6.** РФА поверхности образцов металлического никеля, выдержанных в расплавах на основе LiCl–KCl при температуре 500°C. Солевой электролит: а) LiCl–KCl; б) LiCl–KCl–2%Li<sub>2</sub>O; в) LiCl–KCl–2%LiOH.

- 1) образцы металлического никеля в исследуемых расплавах с введением добавок  $\text{Li}_2\text{O}$  и  $\text{LiOH}$  до 2 мол. % демонстрируют высокую коррозионную стойкость;
- 2) на поверхности образцов, выдержанных в расплавах, наблюдаются единичные очаги точечной коррозии глубиной до 2 мкм;
- 3) скорости коррозии для никеля марки НП1 составляют менее  $0.007 \text{ г/м}^2\text{ч}$  при выдержке в расплаве с введением  $\text{LiOH}$  до 2 мол. %, менее  $0.003 \text{ г/м}^2\text{ч}$  при выдержке в расплаве с введением  $\text{Li}_2\text{O}$  до 2 мол. %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитина Е.В., Ткачева О.Ю., Карфидов Э.А., Руденко А.В., Муллабаев А.Р. Высокотемпературная коррозия в расплавленных солях: уч. пособие. Изд-во Урал. ун-та, 2021.
2. ГОСТ 492-2006. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки. М.: Стандартиформ, 2008.
3. ГОСТ 52381-2005. Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава. М.: Стандартиформ, 2020.
4. Муллабаев А.Р. Анодные процессы в расплавах  $\text{LiCl-KCl-Li}_2\text{O}$ : автореф. дис. ... канд. хим. наук: 2.6.9. Екатеринбург, 2022.
5. Ерженков М.В., Борисов Г.В., Зайков Ю.П., Никитина Е.В., Дедюхин А.Е., Карфидов Э.А. Установка для определения скорости коррозии материалов в расплавленных солях. Патент РФ № 2758772. Заявл. 29.03.2021; опубл. 01.11.2021.
6. Пфанн В. Зонная плавка. М.: Мир, 1970.
7. Шишкин В.Ю., Митяев В.С. Очистка галогенидов щелочных металлов методом зонной плавки // Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1982. **18**. № 11. С. 1917–1918.
8. Raiman S.S., Lee S. Aggregation and data analysis of corrosion studies in molten chloride and fluoride salts // Journal of Nuclear Materials. 2018. **511**. P. 523–535.
9. Sridharan K., Allen T.R. Corrosion in molten salts // Molten Salts Chemistry. 2013. P. 241–267.
10. Indacochea J.E., Smith J.L., Litko K.R., Karell E.J., Raraz A.G. High-temperature oxidation and corrosion of structural materials in molten chlorides // Oxid. Met. 2001. **55**. P. 1–16.
11. Shankar A.R., Thyagarajan K., Mudali U.K. Ravi corrosion behavior of candidate materials in molten  $\text{LiCl-KCl}$  salt under argon atmosphere // Corrosion. 2013. **69**. № 7. P. 655–665.
12. Karfidov E.A., Zaikov Y.P., Nikitina E.V., Seliverstov K.E., Dub A.V. High-temperature passivation of the surface of candidate materials for MSR by adding oxygen ions to  $\text{FLiNaK}$  salt // Materials. 2022. **15**. P. 5174.
13. Никитина Е.В., Карфидов Э.А., Селиверстов К.Е. Исследование коррозионного поведения никеля и его сплавов  $\text{NiTi}$ ,  $\text{NiCr}$  в расплаве  $\text{LiCl-KCl}$  с добавлением 1 и 5%  $\text{CeCl}_3$  и  $\text{Li}_2\text{O}$  // Инновационные материалы и технологии: материалы Междунар. научно-технич. конф. молодых ученых. Минск. 2022. С. 558.
14. Feng X.K., Melendres C.A. Anodic corrosion and passivation behavior of some metals in molten  $\text{LiCl-KCl}$  containing oxide ions // J. Electrochem. Soc. 1982. **129**. P. 1245–1249.
15. Ambrosek J. Molten chloride salts for heat transfer in nuclear systems // University of Wisconsin. 2011. P. 238.
16. Du X., Guo Sh., Wang Sh. Mechanism of tellurium induced nickel alloy corrosion in molten  $\text{LiCl-KCl}$  salt // Corrosion Science. 2022. P. 209.
17. Young D.J. High temperature oxidation and corrosion of metal // Elsevier Science. 2016. P. 758.
18. Озерная И.Н. Коррозия металлов в расплавленных солях при термической обработке // Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. **3**. С. 14–17.

19. Guo Sh., Zhang J., Wu W., Zhou W. Corrosion in the molten fluoride and chloride salts and materials development for nuclear applications // Progress in Materials Science. 2018. 97. P. 448–487.

**STUDY OF THE CORROSION BEHAVIOR OF NICKEL  
IN THE LiCl–KCl MELT AT 500°C DEPENDING ON THE CONTENT  
OF Li<sub>2</sub>O AND LiOH**

**K. E. Seliverstov<sup>1</sup>, E. V. Nikitina<sup>1,\*</sup>, E. A. Karfidov<sup>1</sup>, A. E. Dedyukhin<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Institute of High Temperature Electrochemistry, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia*

Molten alkali metal chlorides used in pyrotechnologies are aggressive corrosive agents. The high operating temperature of the process, the heterogeneity of the environment, and the significant corrosion activity of the molten salt necessitate both the search for stable structural materials and the development of methods for protecting the structural elements of high-temperature technological devices. Corrosion loss reduction techniques traditionally used in low temperature environments are not applicable at high temperatures.

The article examines the influence of oxygen-containing impurities (lithium oxide and hydroxide) on the corrosion behavior of metallic nickel (grade NP1) – the main component of candidate structural alloys, a thermodynamically and structurally stable material in the melt for the process of electrolytic refining of spent nuclear fuel. A method for preparing the LiCl–KCl salt electrolyte and obtaining lithium oxide by thermal decomposition of anhydrous lithium hydroxide under vacuum is described, and the concentrations of impurities in the electrolyte and the synthesized lithium oxide are determined. An installation for conducting corrosion tests in an inert atmosphere of a glove box is presented.

To assess the corrosion resistance of the material, the following were used: gravimetric analysis, X-ray diffraction analysis of the surface and cross-sectional sections, and X-ray diffraction analysis of the surface of the samples. The dependences of the corrosion rate of the material on the concentration of oxygen-containing additives Li<sub>2</sub>O and LiOH were obtained. Based on a combination of gravimetric, X-ray microspectral and X-ray phase analysis data, it was established that metallic nickel samples demonstrate high corrosion resistance in the studied melts with the introduction of Li<sub>2</sub>O and LiOH additives.

*Key words:* corrosion, nickel, chloride melt, LiC–KCl, oxygen-containing additives.

## REFERENCES

1. Nikitina Ye.V., Tkacheva O.Yu., Karfidov E.A., Rudenko A.V., Mullabayev A.R. Vysokotemperaturnaya korroziya v rasplavlennykh soleyakh: uch. Posobiye [High-temperature corrosion in molten salts: textbook]. Izd-vo Ural. un-ta, 2021. [In Russian].

2. GOST 492-2006. Nikel', splavy nikelvyeye i medno-nikelvyeye, obrabatyvayemye davleniyem. Marki [Nickel, nickel and copper-nickel alloys processed by pressure. Stamps]. M.: Standartinform, 2008. [In Russian].
3. GOST 52381-2005. Materialy abrazivnyye. Zernistost' i zernovoy sostav shlifoval'nykh poroshkov. Kontrol' zernovogo sostava [Abrasives materials. Grain size and grain composition of grinding powders. Control of grain composition. M.: Standartinform, 2020. [In Russian].
4. Mullabayev A.R. Anodnyye protsessy v rasplavakh LiCl-KCl-Li<sub>2</sub>O [Anodic processes in LiCl-KCl-Li<sub>2</sub>O melts]: abstract. dis. ...cand. chem. Yekaterinburg, 2022. [In Russian].
5. Yerzhenkov M.V., Borisov G.V., Zaykov Yu.P., Nikitina Ye.V., Dedyukhin A.Ye., Karfidov E.A. Ustanovka dlya opredeleniya skorosti korrozii materialov v rasplavlennykh solyakh [Installation for determining the corrosion rate of materials in molten salts]. Patent RF № 2758772. Appl. 03/29/2021; publ. 01.11.2021. [In Russian].
6. Pfann V. Zonnaya plavka [Zone melting]. M.: Mir, 1970. [In Russian].
7. Shishkin V.Yu., Mityayev V.S. Ochistka galogenidov shchelochnykh metallov metodom zonnoy plavki [Purification of alkali metal halides by zone melting method] // Izv. AN SSSR. Neorgan. materialy. 1982. **18**. № 11. P. 1917–1918. [In Russian].
8. Raiman S.S., Lee S. Aggregation and data analysis of corrosion studies in molten chloride and fluoride salts // Journal of Nuclear Materials. 2018. **511**. P. 523–535.
9. Sridharan K., Allen T.R. Corrosion in molten salts // Molten Salts Chemistry. 2013. P. 241–267.
10. Indacochea J.E., Smith J.L., Litko K.R., Karell E.J., Raraz A.G. High-temperature oxidation and corrosion of structural materials in molten chlorides // Oxid. Met. 2001. **55**. P. 1–16.
11. Shankar A.R., Thyagarajan K., Mudali U.K. Ravi corrosion behavior of candidate materials in molten LiCl-KCl salt under argon atmosphere // Corrosion. 2013. **69**. № 7. P. 655–665.
12. Karfidov E.A., Zaikov Y.P., Nikitina E.V., Seliverstov K.E., Dub A.V. High-temperature passivation of the surface of candidate materials for MSR by adding oxygen ions to FLiNaK salt // Materials. 2022. **15**. P. 5174.
13. Nikitina Ye.V., Karfidov E.A., Seliverstov K.Ye. Issledovaniye korroziionnogo povedeniya nikelya i yego splavov NiTi, NiCr v rasplave LiCl-KCl s dobavleniyem 1 i 5% CeCl<sub>3</sub> i Li<sub>2</sub>O [Study of the corrosion behavior of nickel and its alloys NiTi, NiCr in the LiCl-KCl melt with the addition of 1 and 5% CeCl<sub>3</sub> and Li<sub>2</sub>O] // Innovatsionnyye materialy i tekhnologii: materials of the International scientific and technical Conf. young scientists. Minsk. 2022. P. 558. [In Russian].
14. Feng X.K., Melendres C.A. Anodic corrosion and passivation behavior of some metals in molten LiCl-KCl containing oxide ions // J. Electrochem. Soc. 1982. **129**. P. 1245–1249.
15. Ambrosek J. Molten chloride salts for heat transfer in nuclear systems // University of Wisconsin. 2011. P. 238.
16. Du X., Guo Sh., Wang Sh. Mechanism of tellurium induced nickel alloy corrosion in molten LiCl-KCl salt // Corrosion Science. 2022. P. 209.
17. Young D.J. High temperature oxidation and corrosion of metal // Elsevier Science. 2016. P. 758.
18. Ozeryanaya I.N. Korroziya metallov v rasplavlennykh solyakh pri termicheskoy obrabotke [Corrosion of metals in molten salts during heat treatment] // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 1985. **3**. P. 14–17. [In Russian].
19. Guo Sh., Zhang J., Wu W., Zhou W. Corrosion in the molten fluoride and chloride salts and materials development for nuclear applications // Progress in Materials Science. 2018. **97**. P. 448–487.