

УДК 620.143

ВОЗМОЖНОСТИ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В РАСПЛАВАХ СОЛЕЙ

© 2023 г. С. С. Хвостов^{а, *}, О. А. Голосов^а, Е. В. Никитина^б,
Э. А. Карфидов^б, Н. В. Глушкова^а, Ю. П. Зайков^б

^аАО “Институт реакторных материалов”, Заречный, Россия

^бИнститут высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: khvostov_ss@irmatom.ru

Поступила в редакцию 25.07.2023 г.

После доработки 06.08.2023 г.

Принята к публикации 12.08.2023 г.

Для реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 [1, 2] разрабатывается технология регенерации смешанного нитридного уран-плутониевого отработавшего ядерного топлива (СНУП ОЯТ) [3–9]. Для отделения СНУП ОЯТ от оболочек ТВЭЛов, изготовленных из материала с высокой радиационной стойкостью – ферритно-мартенситной стали ЭП-823 [10–16], предлагается использование пирометаллургических способов “мягкого хлорирования” [17]. При растворении легирующих и примесных элементов стали ЭП-823 в расплавленных солях эвтектического состава на основе хлоридов лития и калия будет происходить загрязнение расплава. По этой же причине будет происходить образование летучих соединений с их дальнейшим массопереносом из горячих в холодные участки технологического оборудования. При исследовании коррозионного поведения металлов и сплавов в жидких средах часто возникает задача определения в растворе малых количеств продуктов растворения. Данная задача возникает, например, при исследовании скорости растворения микропримесей. Чувствительность обычных, традиционных методов, используемых при таких коррозионных испытаниях, как определение потерь массы или колориметрическое определение продуктов коррозии в растворе, часто недостаточна для проведения соответствующих измерений. В данных случаях наиболее эффективным оказывается применение радиохимического метода нейтронно-активационного анализа, основанного на качественном и количественном определении химических элементов. Данный метод основан на измерении характеристик излучения радионуклидов, образующихся при облучении материалов нейтронами. В настоящей работе представлены результаты исследования коррозионного поведения и массопереноса продуктов коррозии, предварительно облученной стали ЭП-823 в расплавах солей $2\text{KCl}-3\text{LiCl}$ и $2\text{KCl}-3\text{LiCl}-\text{PbCl}_2$ при температурах 500 и 650°C в течение 24 ч. Показано, что метод нейтронно-активационного анализа может быть применен для исследования коррозионного поведения стали в расплавах солей различного состава.

Ключевые слова: коррозия, сталь ЭП-823, расплав галогенидов щелочных металлов

DOI: 10.31857/S0235010623060038, **EDN:** DLIUGV

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования являлась сталь ферритно-мартенситного класса ЭП-823. Химический состав образцов стали в соответствии с ТУ 14-131-1126-2013 приведен в табл. 1. Исследовались образцы в форме цилиндра высотой 15 мм, вырезанные алмаз-

Таблица 1. Химический состав стали ЭП-823 (ТУ 14-131-1126-2013), мас. %

C	S	P	Mn	Cr	Si	Ni	Fe
0.14–0.18	≤0.01	≤0.015	0.5–0.8	10–12	1.0–1.3	0.5–0.8	Остаток
V	B	Mo	Nb	Ti	W	Ce	Al
0.2–0.4	≤0.006	0.6–0.9	0.2–0.4	0.01	0.5–0.8	≤0.10	≤0.02

ным диском из тонкостенных трубок ТВЭЛов диаметром 9.4 мм с толщиной стенки 0.5 мм реактора БРЕСТ-ОД-300. Масса образцов составляла ~1.54–1.57 г.

Образцы исследовались в первоначальном состоянии сразу после поставки и в оксидированном состоянии. Толщина оксидной пленки составляла ~12.5 мкм. Исследования образцов в оксидированном состоянии были обусловлены тем, что в активной зоне РУ БРЕСТ-ОД-300 при номинальных параметрах содержания кислорода 6–10 мас. %, на поверхности ТВЭЛов будет формироваться оксидная пленка переменной толщины от ~15 до ~110 мкм [18].

Формирование оксидной пленки на поверхности образцов в лабораторных условиях осуществляли путем окисления на воздухе при температуре 800°C в течение 16 ч. Толщина ее оценивалась расчетным способом из данных геометрических измерений и гравиметрических измерений массы образцов до и после оксидирования.

Для исследования влияния на коррозионное поведение стали ЭП-823 температуры и состава расплавов солей в образцах стали вводили радиоактивные метки в виде радионуклидов ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe и ^{60}Co путем нейтронной активации [19, 20] в активной зоне ядерного реактора ИВВ-2М основных (Fe), легирующих (Cr, Mn) и примесных элементов (Co) стали ЭП-823 по следующим реакциям [19]:

$$^{50}\text{Cr}(n, \gamma)^{51}\text{Cr}, T_{1/2}(^{51}\text{Cr}) = 27.703 \text{ сут}, \quad (1)$$

$$^{56}\text{Fe}(n, t)^{54}\text{Mn}, T_{1/2}(^{54}\text{Mn}) = 312 \text{ сут}, \quad (2)$$

$$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}, T_{1/2}(^{59}\text{Fe}) = 44.6 \text{ сут}, \quad (3)$$

$$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}, T_{1/2}(^{60}\text{Co}) = 5.272 \text{ г}. \quad (4)$$

Облучение образцов стали ЭП-823 проводили в “сухом” канале реактора в потоке нейтронов до набора флюенса нейтронов по всему спектру $\sim 2.9 \cdot 10^{17} \text{ н/см}^2$.

Активность образовавшегося радиоактивного изотопа пропорциональна числу атомов определяемого элемента, интенсивности потока ядерных частиц и сечению ядерной реакции этих частиц с определяемым элементом. В соответствии с законом накопления радиоактивного изотопа при облучении какого-либо вещества активность (распад/с) к концу облучения может быть вычислена по формуле:

$$A_0 = 6.02 \cdot 10^{23} \frac{mk\sigma F_0}{A_B} \left[1 - \exp\left(-\frac{0.693t_1}{T_{1/2}}\right) \right], \quad (5)$$

где m — количество определяемого элемента, г; k — относительное содержание активируемого изотопа в элементе; σ — эффективное сечение ядерной реакции, F_0 — интенсивность потока бомбардирующих частиц, $\text{см}^2 \cdot \text{с}$; t_1 — время облучения, с; A_B — атомный вес элемента, из которого образуется радиоактивный изотоп; $T_{1/2}$ — период полураспада образующегося изотопа, с.

Массу радионуклидов в образцах стали после коррозионных испытаний, в пробах плава солей и их возгонов определяли по выражению, в котором в качестве эталонных

Таблица 2. Средняя скорость коррозии стали ЭП-823 и ее компонентов в расплавах солей 2KCl–3LiCl и 2KCl–3LiCl–*n*PbCl₂

Элемент	Температура, °C	Средняя скорость коррозии, г/(м ² · ч)		
		без оксида, KCl–LiCl	без оксида, KCl–LiCl– <i>n</i> PbCl ₂	с оксидом, KCl–LiCl– <i>n</i> PbCl ₂
Mn	500	$4.42 \cdot 10^{-5}$	$3.72 \cdot 10^{-4}$	$8.36 \cdot 10^{-3}$
	650	$1.41 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-2}$	$2.41 \cdot 10^{-2}$
Cr	500	$1.56 \cdot 10^{-4}$	$1.56 \cdot 10^{-2}$	$1.07 \cdot 10^{-1}$
	650	$4.73 \cdot 10^{-2}$	$1.20 \cdot 10^0$	$1.41 \cdot 10^0$
Fe	500	$8.73 \cdot 10^{-4}$	$1.16 \cdot 10^{-1}$	$3.42 \cdot 10^{-1}$
	650	$1.20 \cdot 10^{-2}$	$5.91 \cdot 10^0$	$8.04 \cdot 10^0$
ЭП-823	500	$1.07 \cdot 10^{-3}$	$1.32 \cdot 10^{-1}$	$4.51 \cdot 10^{-1}$
	650	$6.07 \cdot 10^{-2}$	$7.13 \cdot 10^0$	$9.48 \cdot 10^0$

значений активности радионуклидов использовали их значения в образцах до испытаний

$$m_{i, \text{пр}} = A_{i, \text{пр}} \cdot m_{\text{обр}} \cdot C_{i, \text{обр}} / (A_{i, \text{обр}} \cdot 100), \quad (6)$$

где $m_{i, \text{пр}}$ – масса i -го радионуклида в пробе, г; $A_{i, \text{пр}}$ – активность i -го радионуклида в пробе, Бк; $m_{\text{обр}}$ – масса образца, г; $C_{i, \text{обр}}$ – содержание i -го материнского для радионуклида элемента в стали, мас. %; $A_{i, \text{обр}}$ – активность i -го радионуклида в образце, Бк; 100 – переводной коэффициент от % к отн. ед.

Расчет значений средних скоростей коррозии i -го элемента стали ЭП-823 в расплавах солей проводили по выражению (7)

$$K_i = \frac{m_{i, \text{пр}}}{S \cdot t}, \quad (7)$$

где K_i – средняя скорость коррозии i -го элемента стали, г/(м² · ч); S – площадь поверхности образца, м²; t – длительность коррозионных испытаний, ч.

Среднюю скорость коррозии стали ЭП-823 в расплавах солей определяли по выражению (8)

$$K_{\text{ЭП-823}} = \frac{m_{\text{Cr, пр}} + m_{\text{Mn, пр}} + m_{\text{Fe, пр}}}{S \cdot t}, \quad (8)$$

где $K_{\text{ЭП-823}}$ – средняя скорость коррозии стали ЭП-823, г/(м² · ч); $m_{\text{Cr, пр}}$ – масса хрома в пробе плава, г; $m_{\text{Mn, пр}}$ – масса марганца в пробе плава, г; $m_{\text{Fe, пр}}$ – масса железа в пробе плава, г.

Определены средние скорости коррозии стали ЭП-823 и ее основных компонентов (Fe, Cr, Mn) в состоянии поставки, а также в окисленном состоянии в расплаве солей 2KCl–3LiCl и 2KCl–3LiCl–*n*PbCl₂ (табл. 2).

Гамма-спектрометрические исследования позволяют провести исследования возможного массопереноса радионуклидов с выносом их из расплава и осаждения в холодных участках оборудования вследствие образования летучих соединений или выноса с парами солей KCl и LiCl.

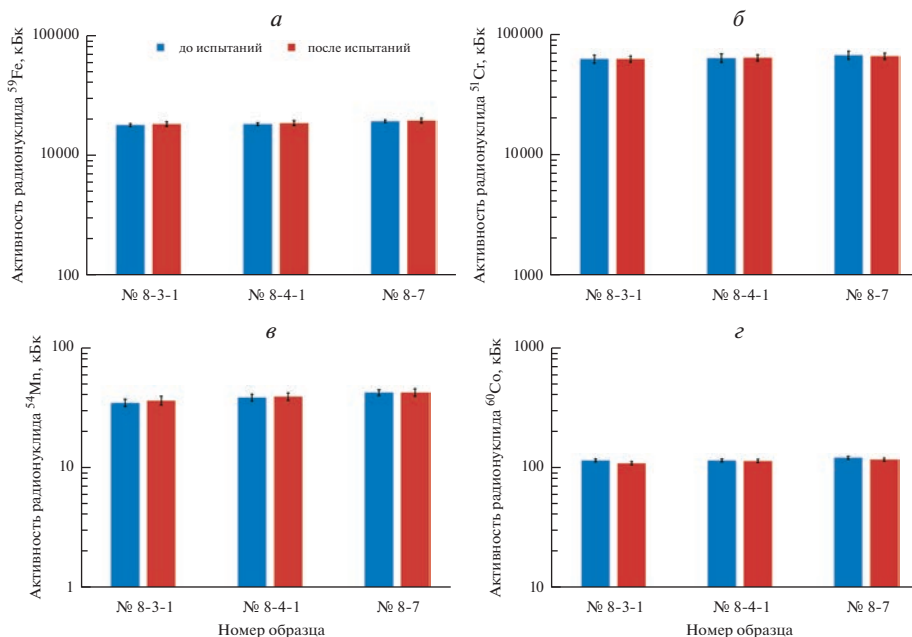
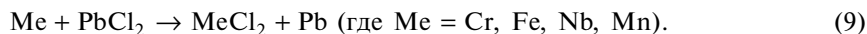


Рис. 1. Влияние коррозионных испытаний в расплавах солей при 500°C в течение 24 ч на изменение активности радионуклидов в образцах стали ЭП-823. Радионуклид: а – ^{59}Fe ; б – ^{51}Cr ; в – ^{54}Mn ; г – ^{60}Co .

По результатам гамма-спектрометрии образцов стали ЭП-823 до и после коррозионных испытаний можно сделать вывод о том, что сталь достаточно устойчива в расплавах солей 2KCl–3LiCl при температурах 500 и 650°C (рис. 1, 2).

Присутствие 1 мол. % PbCl_2 в расплаве соли 2KCl–3LiCl, при обеих температурах приводит к резкому ускорению протекания коррозии стали ЭП-823, как в состоянии поставки, так и в окисленном состоянии.

Растворение стали при добавлении в расплав соли PbCl_2 прежде всего связано с протеканием реакции типа:



При помощи метода нейтронно-активационного анализа был установлен селективный характер коррозии стали ЭП-823 в расплавах солей 2KCl–3LiCl и 2KCl–3LiCl– PbCl_2 . Добавка PbCl_2 оказывает селективное влияние на переход в расплав солей компонентов стали с образованием летучих соединений, содержащих хром и железо. Наибольший вынос ^{51}Cr и ^{59}Fe в газовую среду был выявлен после испытаний стали в неокисленном состоянии.

С помощью метода нейтронно-активационного анализа показано, что наличие оксидной пленки на поверхности образцов практически не препятствует переходу ^{51}Cr в расплав солей, на ~25% замедляет выход ^{59}Fe и снижает вынос ^{54}Mn и ^{60}Co соответственно в ~3 и ~10 раз.

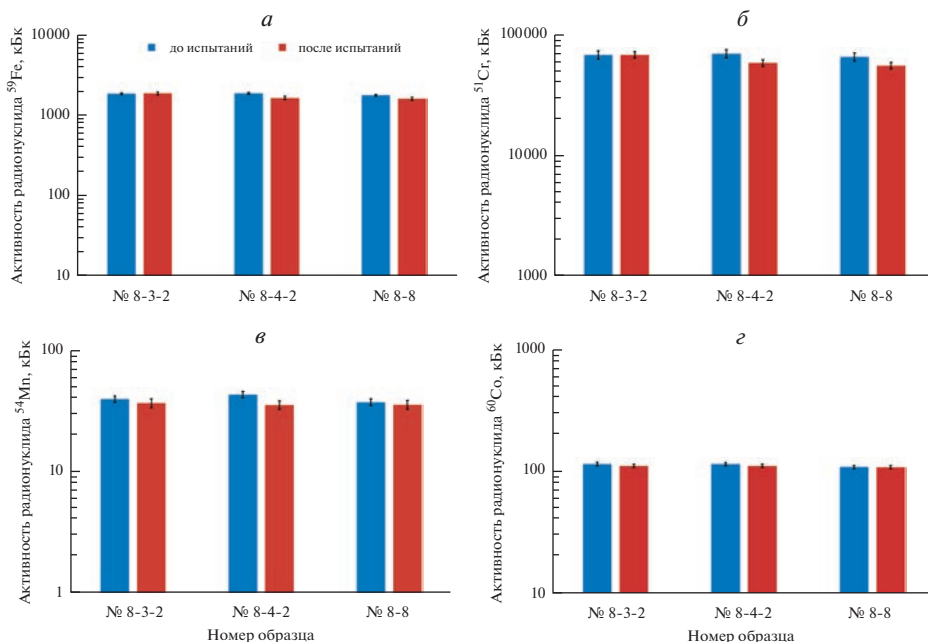


Рис. 2. Влияние коррозионных испытаний в расплавах солей при 650°C в течение 24 ч на изменение активности радионуклидов в образцах стали ЭП-823. Радионуклид: а – ^{59}Fe ; б – ^{51}Cr ; в – ^{54}Mn ; г – ^{60}Co .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была продемонстрирована возможность применения метода нейтронно-активационного анализа для определения коррозионного поведения стали ЭП-823 в расплавах солей $2\text{KCl}-3\text{LiCl}$ и $2\text{KCl}-3\text{LiCl}-\text{PbCl}_2$.

Было установлено, что характер коррозии стали ЭП-823 в расплаве солей $2\text{KCl}-3\text{LiCl}$ и $2\text{KCl}-3\text{LiCl}-\text{PbCl}_2$ имеет избирательный характер.

Сталь ЭП-823 в расплаве соли $2\text{KCl}-3\text{LiCl}$ эвтектического состава обладает высокой коррозионной стойкостью, как при 500°C, так и при 650°C.

Присутствие на поверхности стали ЭП-823 оксидного слоя не оказывает защитного эффекта на протекание коррозии в расплавах солей.

Получены выражения для расчета значений средних скоростей коррозии стали ЭП-823 и компонентов, входящих в ее состав, в расплавах солей $2\text{KCl}-3\text{LiCl}$ и $2\text{KCl}-3\text{LiCl}-n\text{PbCl}_2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orlov V.V., Filin A.I., Lopatkin A.V. The closed on-site fuel cycle of the BREST reactors // Progress in Nuclear Energy. 2001. **47**. № 1–4. P. 171–175.
2. Dragunov Y.G., Lemekhov V.V., Smirnov V.S. // Atomic Energy. 2012. **113**. № 1. P. 70–77. <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9597-3>
3. Salyulev A., Potapov A., Khokhlov V., Shishkin V. The electrical conductivity of model melts based on $\text{LiCl}-\text{KCl}$, used for the processing of spent nuclear fuel // Electrochim. Acta. 2017. **257**. P. 510–515.

4. Zhitkov A., Potapov A., Karimov K., Shishkin V., Dedyukhin A., Zaykov Y. // Nuclear Engineering and Technology. 2022. **52**. P. 123–134.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2019.07.006>
5. Salyulev A., Potapov A. // J. Chem. Eng. Data. 2021. **66**. № 12. P. 4563–4571.
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.1c00591>
6. Salyulev A.B., Shishkin A.V., Shishkin V.Yu., Zaikov Yu.P. // Atomic Energy. 2019. **126**. P. 226–229.
<https://doi.org/10.1007/s10512-019-00541-1>
7. Zaikov Yu.P., Shishkin V.Yu., Potapov A.M., Dedyukhin A.E., Kovrov V.A., Kholkina A.S., Volkovich V.A., Polovov I.B. // J. Phys.: Conf. Series. 2020. **1475**. P. 012027.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1475/1/012027>
8. Adamov E.O., Mochalov Yu.S., Rachkov V.I., Khomyakov Yu.S., Shadrin A.Yu., Kascheev V.A., Khaperskaya A.V. // Atomic Energy. 2021. **130**. № 1. P. 29–35.
<https://doi.org/10.1007/s10512-021-00769-w>
10. Zherebtsov A.A., Mochalov Yu.S., Shadrin A.Yu., Zaikov Yu.P., Gorbachev M.K., Sokolov K.A., Kisly V.A., Goncharov D.A. // J. Phys.: Conf. Series. 2020. **1475**. P. 012007.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1475/1/012007>
11. Klueh R.L., Kai J.J., Alexander D.J. Microstructure-mechanical properties correlation of irradiated conventional and reduced-activation martensitic steels // J. Nucl. Mater. 1995. **225**. P. 175–186.
12. Kai J.J., Klueh R.L. Microstructural analysis of neutron-irradiated martensitic steels // J. Nucl. Mater. 1996. **230**. P. 116–123.
13. Schaeublin R., Gelles D., Victoria M. Microstructure of irradiated ferritic/martensitic steels in relation to mechanical properties // J. Nucl. Mater. 2002. **307–311**. P. 197–202.
14. Mathon M.H., Carlan Y., Geoffroy G., Averty X., Alamo A., Novion C.H. A SANS investigation of the irradiation-enhanced α - α' phases separation in 7–12 Cr martensitic steels // J. of Nucl. Mater. 2003. **312**. P. 236–248.
15. Porollo S.I., Dvoriashin A.M., Konobeev Yu.V., Garner F.A. Microstructure and mechanical properties of ferritic/martensitic steel EP-823 after neutron irradiation to high doses in BOR-60 // J. of Nucl. Mater. 2004. **329–333**. P. 314–318.
16. Dvoriashin A.M. Porollo S.I., Konobeev Yu.V., Garner F.A. Influence of high dose neutron irradiation on microstructure of EP-450 ferritic–martensitic steel irradiated in three Russian fast reactors // J. Nucl. Mater. 2004. **329–333**. P. 319–323.
17. Gorynin I.V., Karzov G.P., Markov V.G. Structural materials for nuclear reactors with lead-based liquid metal coolants. Radiation materials science and structural strength of reactor materials. St. Petersburg: Publishing House of TsNIIKM “Prometheus”, 2002.
18. Шадрин А.Ю., Волк В.И., Полуэктов П.П., Кормилицын М.В. Обращение с ОЯТ быстрых реакторов, использующих плотное топливо // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2012. № 1. С. 78–81.
19. Голосов О.А., Николкин В.Н., Бахтина Е.А. Модель коррозии сталей в свинце // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: сб. докладов IV международной научно-технической конференции. 2016. 1. С. 350–362.
20. Гума В.И., Демидов А.М., Иванов В.А., Миллер В.В. Нейтронно-активационный анализ. М.: Энергоатомиздат, 1984.
21. Бланков Е.Б., Бланкова Т.Н., Русяев В.Г., Якубсон К.И. Нейтронно-активационный анализ в геологии и геофизике. М.: Наука, 1972.

POSSIBILITIES OF NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS FOR STUDYING THE CORROSION BEHAVIOR OF METALLIC MATERIALS IN MOLTEN SALTS

S. S. Khvostov¹, O. A. Golosov¹, E. V. Nikitina², E. A. Karfidov²,
N. V. Glushkova¹, Yu. P. Zaikov²

¹Research Institute of Nuclear Materials, Zarechnyy, Russia

²High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia

For the BREST-OD-300 reactor facility [1, 2], the technology for evaluating mixed nitride uranium-plutonium spent economical fuel is being determined [3–9]. To separate MNUP SNF from fuel claddings made of materials with high radiation resistance – ferritic-martensitic steel EP-823 [10–16], it is planned to use pyrometallurgical grades of “soft chlorina-

tion" [17]. When alloying and impurity elements of steel EP-823 are dissolved in molten salts of eutectic composition based on lithium and potassium chlorides, the melt will be contaminated. For the same reason, the formation of volatile compounds will occur, with their further mass transfer from hot to cold sections of process equipment. When studying the corrosion behavior of metals and alloys in liquid media, the problem often arises of determining small amounts of dissolution products in solution. This problem arises, for example, the rate of dissolution of microimpurities. The sensitivity of the usual, traditional methods used in corrosion testing such as mass loss or colorimetric determination of corrosion products in solution is often insufficient to make appropriate measurements. In these cases, the most effective is the use of the radiochemical method of neutron activation analysis based on qualitative and quantitative determination of chemical elements, based on the measurement of the radiation characteristics of radionuclides formed during the irradiation of materials with neutrons. This paper presents the results of a study of the corrosion behavior and mass transfer of corrosion products of EP-823 steel pre-irradiated in the IVV-2M research nuclear reactor in molten salts $2\text{KCl}-3\text{LiCl}$ and $2\text{KCl}-3\text{LiCl}-\text{PbCl}_2$ at temperatures of 500 and 650°C for 24 h. It is shown that the method of neutron activation analysis can be used to study the corrosion behavior of EP-823 steel in molten salts of various compositions.

Keywords: corrosion, EP-823 steel, alkali metal halide melt

REFERENCES

1. Orlov V.V., Filin A.I., Lopatkin A.V. The closed on-site fuel cycle of the BREST reactors // *Progress in Nuclear Energy*. 2001. **47**. № 1–4. P. 171–175.
2. Dragunov Y.G., Lemekhov V.V., Smirnov V.S. // *Atomic Energy*. 2012. **113**. № 1. P. 70–77. <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9597-3>
3. Salyulev A., Potapov A., Khokhlov V., Shishkin V. The electrical conductivity of model melts based on $\text{LiCl}-\text{KCl}$, used for the processing of spent nuclear fuel // *Electrochim. Acta*. 2017. **257**. P. 510–515.
4. Zhitkov A., Potapov A., Karimov K., Shishkin V., Dedyukhin A., Zaykov Y. // *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. **52**. P. 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.07.006>
5. Salyulev A., Potapov A. // *J. Chem. Eng. Data*. 2021. **66**. № 12. P. 4563–4571. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.1c00591>
6. Salyulev A.B., Shishkin A.V., Shishkin V.Yu., Zaikov Yu.P. // *Atomic Energy*. 2019. **126**. P. 226–229. <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00541-1>
7. Zaikov Yu.P., Shishkin V.Yu., Potapov A.M., Dedyukhin A.E., Kovrov V.A., Kholkina A.S., Volkovich V.A., Polovov I.B. // *J. Phys.: Conf. Series*. 2020. **1475**. P. 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1475/1/012027>
8. Adamov E.O., Mochalov Yu.S., Rachkov V.I., Khomyakov Yu.S., Shadrin A.Yu., Kascheev V.A., Khaperskaya A.V. // *Atomic Energy*. 2021. **130**. № 1. P. 29–35. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00769-w>
9. Zharebtsov A.A., Mochalov Yu.S., Shadrin A.Yu., Zaikov Yu.P., Gorbachev M.K., Sokolov K.A., Kisly V.A., Goncharov D.A. // *J. Phys.: Conf. Series*. 2020. **1475**. P. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1475/1/012007>
10. Klueh R.L., Kai J.J., Alexander D.J. Microstructure-mechanical properties correlation of irradiated conventional and reduced-activation martensitic steels // *J. Nucl. Mater.* 1995. **225**. P. 175–186.
11. Kai J.J., Klueh R.L. Microstructural analysis of neutron-irradiated martensitic steels // *J. Nucl. Mater.* 1996. **230**. P. 116–123.
12. Schaeublin R., Gelles D., Victoria M. Microstructure of irradiated ferritic/martensitic steels in relation to mechanical properties // *J. Nucl. Mater.* 2002. **307–311**. P. 197–202.
13. Mathon M.H., Carlan Y., Geoffroy G., Averty X., Alamo A., Novion C.H. A SANS investigation of the irradiation-enhanced $\alpha-\alpha'$ phases separation in 7–12 Cr martensitic steels // *J. of Nucl. Mater.* 2003. **312**. P. 236–248.
14. Porollo S.I., Dvoriashin A.M., Konobeev Yu.V., Garner F.A. Microstructure and mechanical properties of ferritic/martensitic steel EP-823 after neutron irradiation to high doses in BOR-60 // *J. of Nucl. Mater.* 2004. **329–333**. P. 314–318.

16. Dvoriashin A.M., Porollo S.I., Konobeev Yu.V., Garner F.A. Influence of high dose neutron irradiation on microstructure of EP-450 ferritic–martensitic steel irradiated in three Russian fast reactors // *J. Nucl. Mater.* 2004. **329–333**. P. 319–323.
17. Gorynin I.V., Karzov G.P., Markov V.G. Structural materials for nuclear reactors with lead-based liquid metal coolants. Radiation materials science and structural strength of reactor materials. St. Petersburg: Publishing House of TsNIIKM “Prometheus”, 2002.
18. Shadrin A.Yu., Volk V.I., Poluektov P.P., Kormilitsyn M.V. Obrashcheniye s OYAT bystrykh reaktorov, ispol'zuyushchikh plotnoye toplivo [Handling SNF from fast reactors using dense fuel] // *Bezopasnost' yadernykh tekhnologiy i okruzhayushchey sredy*. 2012. № 1. P. 78–81. [In Russian].
19. Golosov O.A., Nikolkin V.N., Bakhtina Ye.A. Model' korrozii staley v svintse [Model of corrosion of steels in lead] // *Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii yadernoy energetiki: sb. dokladov IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. 2016. **1**. P. 350–362. [In Russian].
20. Guma V.I., Demidov A.M., Ivanov V.A., Miller V.V. Neytronno-aktivatsionnyy analiz [Neutron activation analysis]. M.: Energoatomizdat, 1984. [In Russian].
21. Blankov Ye.B., Blankova T.N., Rusyayev V.G., Yakubson K.I. Neytronno-aktivatsionnyy analiz v geologii i geofizike [Neutron activation analysis in geology and geophysics]. M.: Nauka, 1972. [In Russian].