

## ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ПРОЦЕССЫ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

А. С. Лебедев, В. Е. Еремышев, М. А. Рассомахин, Г. Г. Кориневская

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО Российской академии наук,  
Миасс, Челябинская область

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2023 г.

*В работе представлены результаты исследования влияния защитного покрытия из никеля на высокотемпературное изменение внутренней поверхности контейнера из стали для иммобилизации ВАО при контакте с расплавом модельного матричного материала. Выполнено сравнение процессов коррозии поверхности контейнера с защитной пленкой из никеля, осажденной гальваническим и химическим способами. Сформулированы факторы, определяющие глубину коррозионных изменений стальной поверхности контейнера под действием четырех вариантов состава матричного материала. Показаны большая эффективность защитного действия никеля, нанесенного гальваническим способом, и значительное влияние избыточно высокого содержания натрия и кальция на глубину коррозионных изменений поверхности контейнера.*

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы, иммобилизация, боросиликатные матричные материалы, стальной контейнер, коррозия.

### Введение

В соответствии с основной схемой иммобилизации высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) методом остекловывания завершающей стадией этого процесса является получение расплава матричного материала (стекломассы) и его разлив в стальные контейнеры [1]–[3]. Происходящее в этом процессе высокотемпературное взаимодействие поверхностей сопровождается их коррозией и взаимной диффузией компонентов в зоне контакта [4], [9], [10]. Данное интенсивное и длительное соприкосновение стали и расплава матричного материала с ВАО возникает внутри электропечи в зоне размещения электродов и оказывает значительное влияние на их состояние и срок службы. Кроме этого, подобный

контакт является причиной изменения внутренней поверхности контейнеров при разливе расплава матричного материала с ВАО, что может повлиять на их целостность при хранении.

Необходимость максимального замедления процесса разрушения электродов и поверхности контейнеров с целью продления срока их службы определяет актуальность мероприятий по противодействию наблюдаемой высокотемпературной коррозии и вызывает большой интерес к экспериментальному изучению взаимодействия материалов.

В рамках ранее выполненных экспериментальных исследований высокотемпературного контакта никельхромсодержащих марок стали

с боросиликатными расплавами, имитирующими матричные материалы для иммобилизации ВАО, в зоне расплав/металл установлен значительный элементный обмен [5], [6]. В результате протекания процессов многокомпонентной диффузии наблюдается неравномерное растворение составляющих стали в матричном боросиликатном расплаве [7]–[10].

В зависимости от его химического состава наблюдаются два варианта строения контактного слоя, образующегося на поверхности и замедляющего скорость растворения компонентов стали [9], [10]. В первом варианте весь никель сосредоточен в виде тонкой защитной пленки металла, а железо, хром и марганец образуют отдельное пористое покрытие из кристаллов шпинелида, заполненное боросиликатным материалом. Во втором — наблюдается образование общего широкого пористого слоя из зерен металлического никеля и железохромистого шпинелида, также заполненного боросиликатным материалом.

Выявленный в результате исследования защитный характер образующегося слоя металлического никеля указывает на эффективность использования марок стали и сплавов с его высоким содержанием для изготовления контейнеров для иммобилизации ВАО. Менее затратным мероприятием по замедлению их высокотемпературной коррозии является нанесение на внутреннюю поверхность дополнительных защитных покрытий. В зависимости от их состава, способа и толщины покрытия можно значительно уменьшить воздействие расплава, замедлить процессы коррозии поверхности контейнеров, заполненных матричными материалами с ВАО, и продлить срок их безопасного хранения.

В этих целях для изучения способов эффективного использования защитных покрытий из никеля при их взаимодействии с расплавом матричного материала в процессе остекловывания ВАО нами было проведено исследование и сравнение процессов высокотемпературной коррозии стальной поверхности с такой пленкой, осажденной гальваническим и химическим способом, в зоне контакта с четырьмя модельными алюборосиликатными расплавами разного состава.

### Экспериментальная часть

Синтез выбранных для данного исследования составов образцов модельных матричных материалов боросиликатной системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  был выполнен из реактивов  $\text{SiO}_2$  квалификации «ч.д.а.» «ос.ч.»

$\text{B}_2\text{O}_3$  и «х.ч.»  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{TiO}_2$ . Содержание компонентов в исходных смесях (табл. 1) было выбрано с учетом данных о среднем химическом составе матричных материалов, применяемых для иммобилизации ВАО [11]–[13], и отражает разные варианты соотношения содержания бора и щелочно/щелочноземельных катионов ( $\text{Na}/\text{Ca}$ ).

Таблица 1. Исходные составы матричных стекол по синтезу

Образец	Состав, мол. %					
	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{B}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$
1-NCBS	20	10	2	16	5	47
3-NCBS	30	-	2	16	5	47
4-NCBS	28	10	2	8	5	47
6-NCBS	38	-	2	8	5	47

Плавление подготовленных смесей компонентов в платиновых тиглях при 1200–1250 °С и быстрое охлаждение (закалка) полученных расплавов были выполнены по методике, описанной в работах [14]–[17]. Полученные образцы матричных материалов были представлены прозрачными и макроскопически однородными слитками неправильной формы массой 5–10 г.

Из выбранной для исследования легированной коррозионно-стойкой, жаростойкой и жаропрочной хромоникелевой стали марки 08X18H10 (AISI 304H) были изготовлены мини-контейнеры. Для этого из стального стержня диаметром 14 мм вырезались цилиндры высотой 12 мм, в центре которых высверливались глухие отверстия диаметром 6 мм и глубиной 6 мм. Их внутренние стенки шлифовались и полировались с целью получения максимально гладкой поверхности для нанесения защитных покрытий из никеля на стальную поверхность изготовленных миниконтейнеров. Покрытие было выполнено гальваническим и химическим способами. Первый метод заключался в осаждении слоя никеля на внутренней стенке контейнеров под воздействием электрического тока ( $U=4\text{ В}$ ) в течение 30 мин с использованием сульфатного электролита Уоттса. Поверхность стали с нанесенным защитным слоем приобрела характерный матовый серый цвет (рис. 1).

Химическое никелирование было выполнено при температуре 97 °С в течение одного часа с использованием раствора  $\text{NiCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$   $\text{CH}_3\text{COONa} \times 3\text{H}_2\text{O}$   $\text{NaPH}_2\text{O}_2 \times \text{H}_2\text{O}$  ( $21 \times 10 \times 24$  г/л, рН 5,2). Использование гипофосфита натрия при данной методике определяет наличие фосфора в защитном слое, что, с одной стороны,

повышает механическую прочность и износостойкость нанесенного слоя, а с другой стороны, делает его менее устойчивым при химическом и температурном воздействии. Полученное покрытие имело желтовато-белый цвет с легким блеском (рис. 1) и следующий химический состав: 95 % мас. Ni и 5 % мас. P.

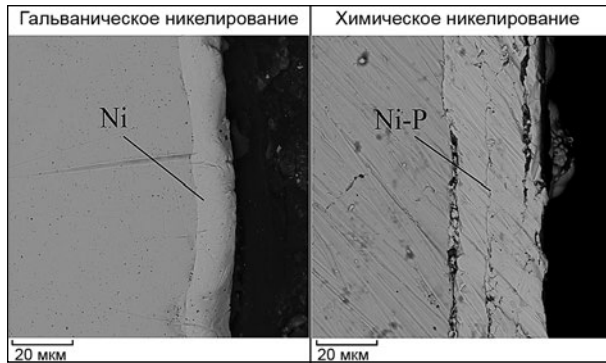


Рис. 1. Внешний вид стенки контейнера с защитным покрытием после гальванического и химического никелирования

Для высокотемпературных исследований внутрь миниконтейнеров с нанесенным покрытием засыпался измельченный матричный материал равной массы,  $(0,45 \pm 0,01)$  г. Загруженные контейнеры помещались в предварительно разогретую электрическую печь при температуре  $800^\circ\text{C}$ , затем температура увеличивалась до  $1300^\circ\text{C}$  со скоростью  $5^\circ/\text{мин}$ . При максимальной температуре они выдерживались 60 минут, по прошествии этого времени извлекались и

помещались во вторую печь, предварительно нагретую до  $400^\circ\text{C}$ . После перегрузки вторая печь выключалась и медленно остывала с контейнерами до комнатной температуры. Далее контейнеры извлекались из электропечи и разрезались вместе с содержащим матричным материалом вдоль вертикальной плоскости, проходящей через середину углубления. Поверхность полученного среза шлифовали, полировали и подготавливали для микроскопического исследования (рис. 2).

Исследование полученных полированных срезов (шлифов) проводилось на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3 Sbu с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-act (Oxford Instruments, Великобритания). Выполненное исследование позволило получить данные о химическом составе поверхностного слоя материала контейнеров и алюмоборосиликатных матричных материалов в зоне их контактного высокотемпературного взаимодействия. Все результаты представлены на рис. 3–8 и в табл. 2–4.

## Результаты исследования

### Гальваническое никелирование

На рис. 1, слева, в отраженных электронах (BSE) на поверхности миниконтейнеров после гальванического никелирования вдоль всех их стенок наблюдается ярко выраженный слой никеля толщиной 6–8 мкм. Из анализа изменения стальной поверхности контейнеров после

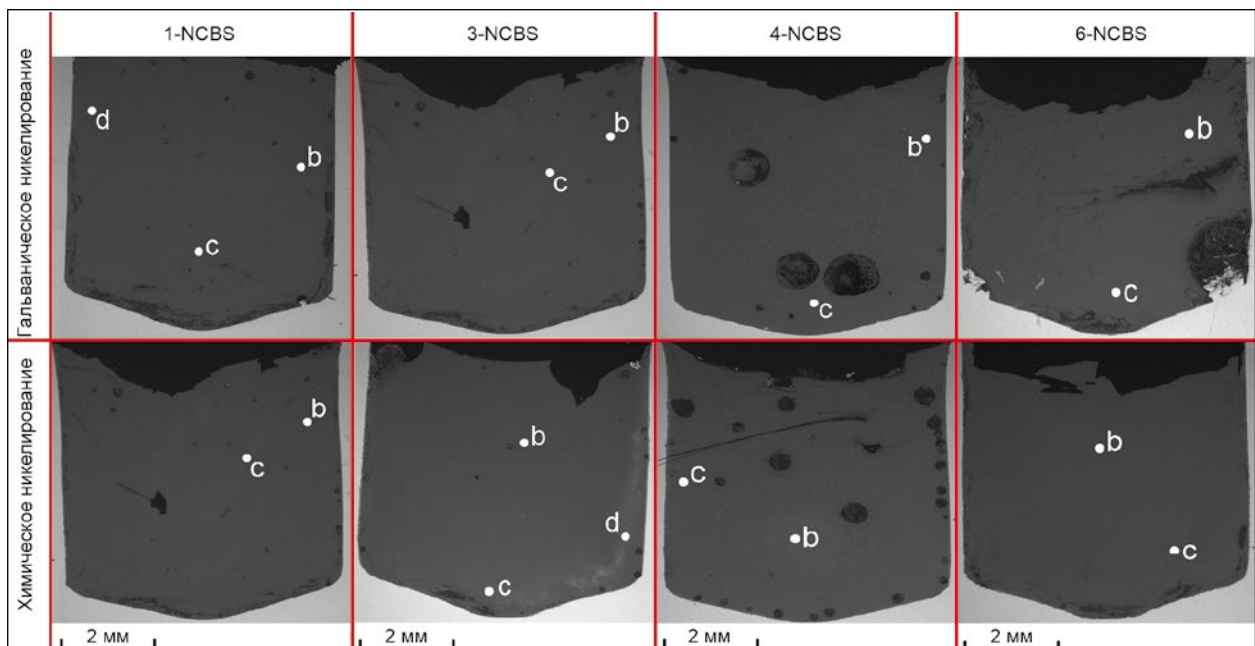


Рис. 2. Внешний вид контейнеров с никелированием гальваническим и химическим способами после высокотемпературного эксперимента. Светлые области соответствуют металлу, темные – боросиликатному стеклу

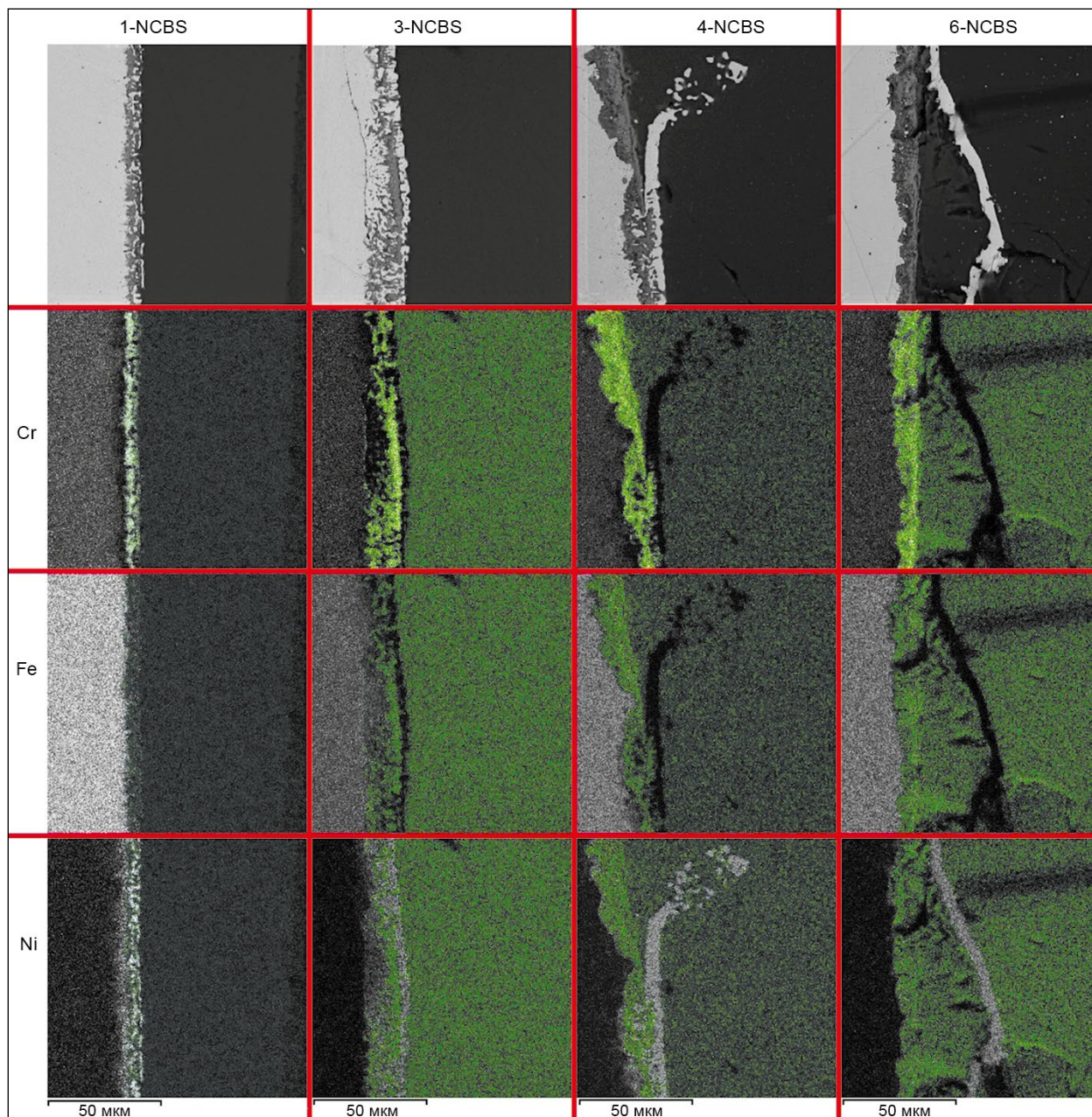


Рис. 3. Зона контакта матричного стекла с поверхностью контейнеров с защитной пленкой после гальванического никелирования (зеленым цветом обозначен кислород)

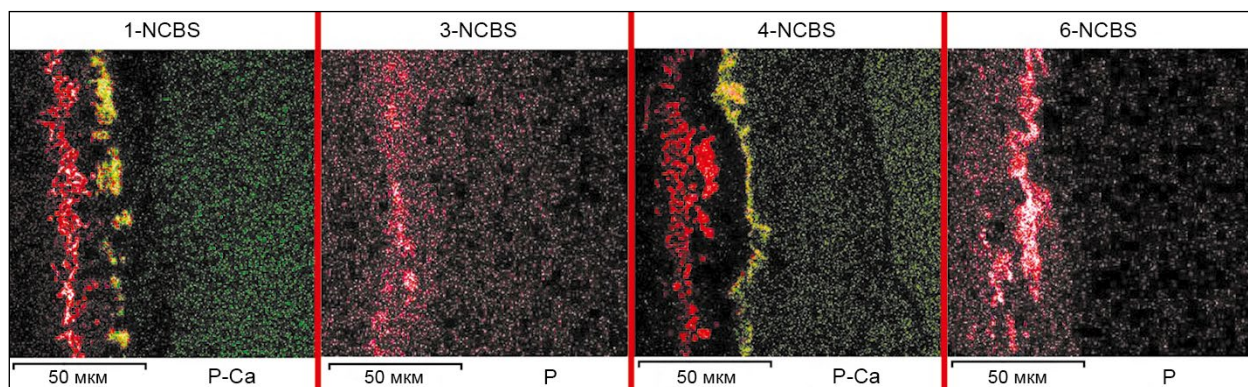


Рис. 4. Распределение кальция и фосфора в контактном слое застывшего кальцийсодержащего матричного материала в миконтейнерах после химического никелирования, красный цвет – P, зеленый цвет – Ca

высокотемпературного взаимодействия с расплавом матричного материала следует, что в зоне контакта параллельно такому слою образуется пленка смешанного состава  $(Ni, Fe)(Fe, Cr)_2O_4$ , которая частично заполнена матричным материалом за счет взаимной диффузии компонентов стали и его расплава (рис. 3).

В образце состава 1-NCBS эти контактные слои имеют минимальную толщину. В 3-NCBS, 4-NCBS и 6-NCBS наблюдается частичный отрыв от стальной поверхности контейнера слоя, обогащенного никелем, и утолщение пленки из оксидов хрома и железа. Наблюдаемые в застывшем матричном материале (стекле) газовые пузырьки могут быть связаны с образованием CO в результате происходящей реакции окисления выделяющегося из стали углерода. Внутри этих пузырьков газа наблюдается никель, который был захвачен из защитного слоя без его окисления. Также в образцах 3-NCBS, 4-NCBS и 6-NCBS в матричном материале установлено наличие небольшого количества растворенного железа, неравномерно распределенного по объему стекла (табл. 2).

**Таблица 2. Средний состав матричного стекла после гальванического никелирования в исследуемых точках (рис. 2)**

Образец	Состав								
	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	NiO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1-NCBS	13,5	6,1	46,9	11,5	2,2	-	0,2	-	19,3
3-NCBS	16,3	5,6	44,3	-	2,1	0,1	1,9	-	29,4
4-NCBS	16,1	5,5	42,6	8,1	2,4	-	4,6	0,2	20,2
6-NCBS	16,1	3,6	28,0	-	2,3	-	1,6	0,3	47,8

### Химическое никелирование

После химического нанесения защиты на внутренней поверхности контейнеров образовалась равномерная пленка толщиной до 18 мкм, содержащая никель и фосфор (рис. 1, справа). В результате высокотемпературного взаимодействия с матричным расплавом на стенках данных миниконтейнеров происходит ее отрыв и образование в объеме стекла широкой пористой прослойки из смешанных оксидов хрома и железа. Наблюдаются два участка концентрирования фосфора: в отдельных узких областях непосредственно в пористой прослойке во всех образцах и в объеме матричного материала в местах с высоким содержанием кальция только для составов с кальцийсодержащим матричным материалом (1-NCBS и 4-NCBS) (рис. 4).

Контейнер с материалом состава 1-NCBS, как и при гальваническом никелировании,

характеризуется минимальной толщиной данной прослойки и наименьшим выносом железа и хрома в объем матричного стекла (рис. 4, табл. 3). Для образцов с матричным материалом 3-NCBS и 6-NCBS наблюдается сильно измененная и переработанная зона их контакта со сталью. Самая широкая область взаимодействия со значительным выносом материала наблюдается у образца 4-NCBS. Весь никель, поступивший в объем матричного материала, остается неокисленным.

**Таблица 3. Средний состав матричного стекла после химического никелирования в исследуемых точках (рис. 2)**

Образец	Состав								
	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	NiO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1-NCBS	16,5	6	45,9	11,7	2,1	0,1	1,4	-	16,1
3-NCBS	14,8	5,3	41	-	2	-	7,8	0,1	28,7
4-NCBS	18,4	5,2	40	9,4	2,4	0,1	4,5	0,3	19,4
6-NCBS	26,8	5,5	43,1	-	2,5	0,2	2,6	-	19,1

### Обсуждение результатов

Образец с 1-NCBS имеет минимальную зону взаимодействия между контейнером и матричным стеклом при обоих способах нанесения защитной пленки из никеля: в среднем 9 мкм при гальваническом нанесении и 19 мкм — при химическом способе (рис. 3 и 5). Зона выноса продуктов коррозии поверхности контейнера в объем матричного материала в среднем составила 20 и 40 мкм соответственно. Особенностью образца состава 1-NCBS в данном исследовании является наименьшее содержание щелочных элементов (натрия) и, как следствие, большая вязкость расплава [10], [18].

Образец с материалом состава 3-NCBS при любом способе нанесения защитной пленки имеет более широкую границу контакта между контейнером и матричным стеклом. При гальваническом нанесении зона коррозии составляет в среднем 18 мкм и местами наблюдается отрыв слоя никеля от поверхности контейнера. При химическом никелировании она составляет в среднем 38 мкм с выносом оксида хрома от поверхности контейнера вглубь стекла до 75 мкм. Значительное увеличение зоны коррозии происходит за счет большего содержания щелочных элементов и, соответственно, меньшей вязкости расплава [10], [18]. По этой же причине наблюдается большее содержание оксидов железа в объеме стекла.

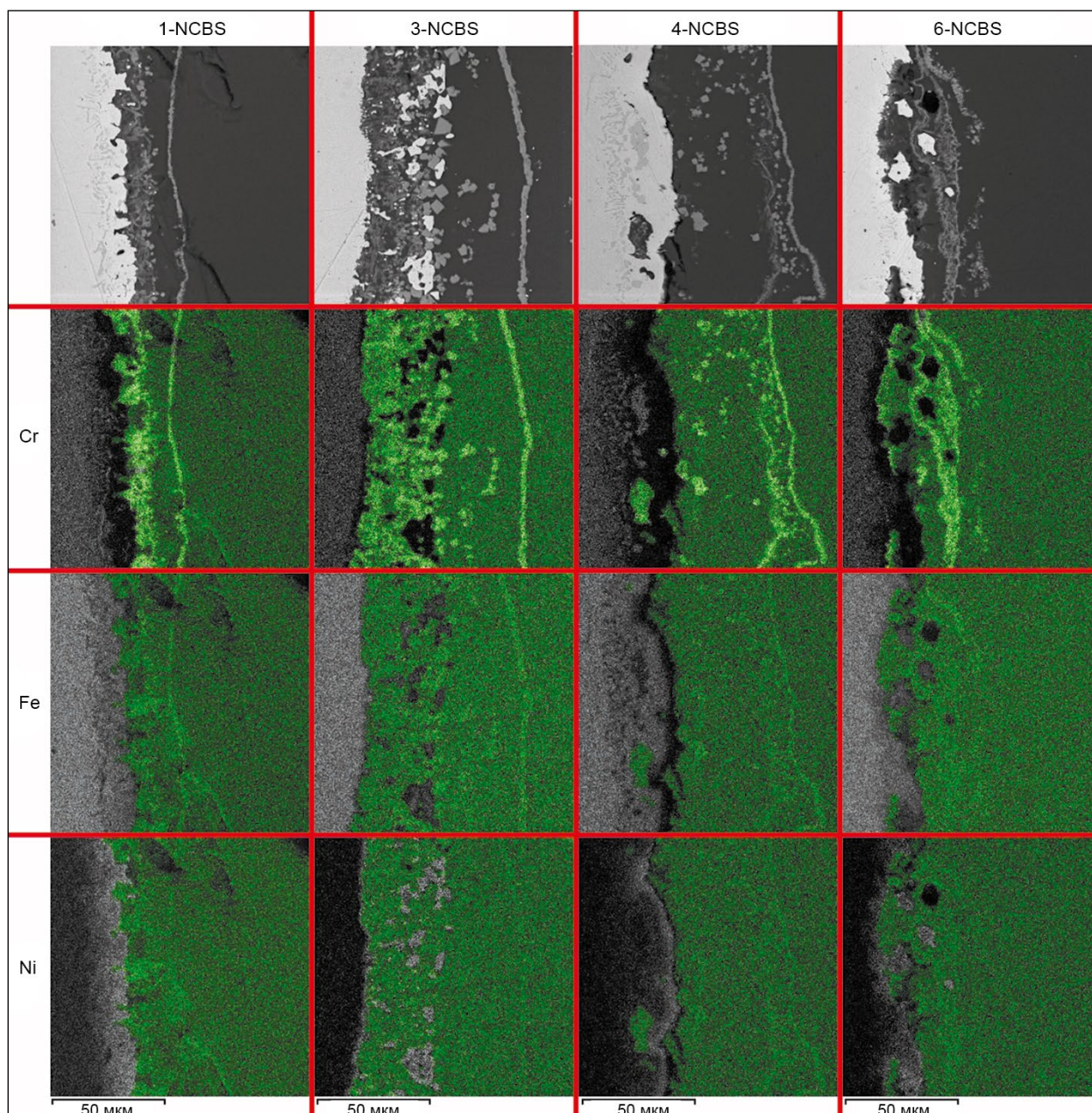


Рис. 5. Зона контакта матричного стекла с контейнером после химического никелирования (зеленым цветом обозначен кислород)

В контейнерах с матричным стеклом 4-NCBS при гальваническом никелировании зона коррозии составила в среднем 15 мкм, при химическом — после высокотемпературного эксперимента образовался участок измененного материала глубиной до 60 мкм и на стенке контейнера наблюдается остаточная область, обогащенная фосфором толщиной около 27 мкм. Значительное разрушение нанесенной защитной пленки и формирование широкой зоны из смеси оксидов всех компонентов стали, матричного материала и фосфора объясняется высоким содержанием щелочного металла и негативным влиянием присутствия кальция. Как после гальванического, так и химического никелирования

наблюдается отрыв защитного слоя никеля от поверхности и содержание окисленного железа в объеме стекла.

В контейнерах с защитной пленкой после гальванического никелирования с матричным материалом состава 6-NCBS зона коррозии составляет в среднем 11 мкм. Установлен значительный отрыв защитного слоя с выносом отдельных частиц никеля в объем стекла на глубину до 45 мкм. После химического нанесения в зоне контакта также произошло сильное перемешивание контактной зоны с матричным расплавом на глубину до 37 мкм с отрывом и выносом материала контейнера в объем стекла на глубину до 60 мкм. В соответствии с химическим составом расплав

матричного материала 6-NCBS обладает самой низкой вязкостью из всех образцов.

## Заключение

Гальваническое никелирование поверхности контейнеров для иммобилизации матричных материалов с ВАО является более эффективным из возможных вариантов улучшения их коррозионной устойчивости. При сопоставлении ширины зоны коррозии в ранее проведенном исследовании [10] взаимодействия стали марки 08X18H10 (AISI 304H) с аналогичными матричными расплавами можно констатировать ее уменьшение и снижение содержания оксидов железа и хрома в застывшем матричном материале.

Образующийся при химическом никелировании растянутый слой защитной пленки смешанного состава негативно сказывается на увеличении толщины зоны коррозии при взаимодействии контейнера с расплавом матричного материала. Это является следствием более рыхлой структуры защитного слоя и образования дополнительных растворимых соединений.

Различия в химическом составе матричных материалов, в первую очередь в содержании натрия и кальция, определяют разницу в вязкости расплавов, изменение глубины зоны коррозии и их насыщенность компонентами стали.

Подготовка образцов, исследование выбранными методами и обработка полученных результатов выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-23-20024, <https://rscf.ru/project/22-23-20024/>.

## Литература

1. *Stefanovsky S. V., Skvortsov M. V., Stefanovsky O. I., Nikonov B. S., Presniakov I. A., Glazkova I. S., Ptashkin A. G.* Preparation and Characterization of Borosilicate Glass Waste Form for Immobilization of HLW from WWER Spent Nuclear Fuel Reprocessing // *MRS Adv.* 2017. Vol. 2. No. 11. Pp. 583–589. DOI: 10.1557/adv.2016.62
2. *King F.* Container Materials for the Storage and Disposal of Nuclear Waste // *Corros.* 2013. Vol. 69. No. 10. Pp. 986–1011. DOI: 10.5006/0894
3. *McCright R. D.* Metal Container Materials for Nuclear Waste // *MRS Bull.* 1994. Vol. 19. Pp. 39–42. DOI: 10.1557/S0883769400048685
4. *Shoesmith D. W.* Assessing the Corrosion Performance of High-Level Nuclear Waste Containers // *Corros.* 2006. Vol. 62. No. 8. Pp. 703–722. DOI: 10.5006/1.327829

5. *Guo X., Gin S., Lei P. et al.* Self-Accelerated Corrosion of Nuclear Waste Forms at Material Interfaces // *Nat. Mater.* 2020. Vol. 19. No. 3. Pp. 310–316. DOI: 10.1038/s41563-019-0579-x.
6. *Guo X., Gin S., Liu H. et al.* Near-Field Corrosion Interactions between Glass and Corrosion Resistant Alloys // *npj Mater Degrad.* 2020. Vol. 4. Pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41529-020-0114-1
7. *Di Martino J., Rapin C., Berthod P., Podor R., Steinmetz P.* Corrosion of Metals and Alloys in Molten Glasses. Part 1: Glass Electrochemical Properties and Pure Metal (Fe, Co, Ni, Cr) Behaviours // *Corros. Sci.* 2004. Vol. 46. No. 8. Pp. 1849–1864. DOI: 10.1016/j.corsci.2003.10.0
8. *Di Martino J., Rapin C., Berthod P., Podor R., Steinmetz P.* Corrosion of metals and alloys in molten glasses. Part 2: Nickel and cobalt high chromium superalloys behaviour and protection // *Corros. Sci.* 2004. Vol. 46. No. 8. Pp. 1865–1881. DOI: 10.1016/j.corsci.2003.10.0
9. *Еремяшев В. Е., Жеребцов Д. А., Живулин В. Е., Кориневская Г. Г., Лебедев А. С.* Высокотемпературное взаимодействие хромоникелевой стали 08X18H10Т и модельных матричных боросиликатных материалов // *Неорганические материалы.* 2021. Т. 57. № 9. С. 1033–1040. DOI: 10.31857/S0002337X21090049.
10. *Еремяшев В. Е., Кориневская Г. Г., Лебедев А. С., Блинов И. А.* Высокотемпературное взаимодействие хромоникелевой стали с многокомпонентными матричными боросиликатными материалами // *Электromеталлургия.* 2023. № 3. С. 28–37. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-3-28-3.
11. *Donald I. W.* Waste Immobilization in Glass and Ceramic Based Hosts: Radioactive, Toxic and Hazardous Wastes. N. Y. : Wiley, 2010. 507 p.
12. *McCloy J. S., Goel A.* Glass-Ceramics for Nuclear Waste Immobilization // *MRS Bull.* 2017. Vol. 42. No. 3. Pp. 233–240. DOI: 10.1557/mrs.20.8
13. *Eremyashev V., Osipova L., Shenderovich I.* The effects of alkaline earth metals on the structure of sodium borosilicate glasses: 11B and 29Si NMR study // *Materials Science Forum.* 2020. Vol. 989. Pp. 192–198. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.192.
14. *Eremyashev V. E., Zherebtsov D. A., Osipova L. M., Danilina E. I.* Thermal Study of Melting, Transition and Crystallization of Rubidium and Caesium Borosilicate Glasses // *Ceram. Int.* 2016. Vol. 42. Pp. 18368–18372. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.08.169.
15. *Eremyashev V. E., Zherebtsov D. A., Brazhnikov M. P., Zainullina R. T., Danilina E. I.* Cerium Influence on the Thermal Properties and Structure of High-alkaline Borosilicate Glasses // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2020. Vol. 139. No. 2. Pp. 991–997. DOI: 10.1007/s10973-019-08472-6

16. Еремяшев В. Е., Миронов А. Б. Влияние железа на структуру калиевых боросиликатных стекол // Неорганические материалы. 2015. Т. 51. № 2. С. 218. DOI: 10.7868/S000233X15020062.
17. Еремяшев В. Е., Кориневская Г. Г., Букалов С. С. Титан в структуре щелочных боросиликатных стекол // Стекло и керамика. 2015. № 11. С. 13–16.
18. Fluegel A. Glass viscosity calculation based on a global statistical modelling approach // European Journal of Glass Science and Technology. Part A: Glass Technology. 2007. Vol. 48. No. 1. Pp. 13–30.

---

### Информация об авторах

Лебедев Алексей Сергеевич, кандидат химических наук, младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН (456317, Челябинская обл., Миасс, тер. Ильменский заповедник), e-mail: lebedev.a.s@bk.

Еремяшев Вячеслав Евгеньевич, доктор химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН (456317, Челябинская обл., Миасс, тер. Ильменский заповедник), e-mail: vee-zlat@mail.ru

Рассомахин Михаил Анатольевич, младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН (456317, Челябинская обл., Миасс, тер. Ильменский заповедник), e-mail: miha\_rassomahin@mail.ru

Кориневская Галина Геннадьевна, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН (456317, Челябинская обл., Миасс, тер. Ильменский заповедник), e-mail: galkor@yandex.ru

### Библиографическое описание статьи

Лебедев А. С., Еремяшев В. Е., Рассомахин М. А., Кориневская Г. Г. Влияние защитного покрытия на процессы коррозии металлических контейнеров для иммобилизации высокоактивных радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2024. № 1 (26). С. 47–56. DOI: 10.25283/258-9707-2024-1-47-56.

---

## PROTECTIVE COATING AND ITS INFLUENCE ON CORROSION BEHAVIOR OF METAL CONTAINERS FOR HIGH-LEVEL WASTE IMMOBILISATION

Lebedev A. S., Eremyashev V. E., Rassomahin M. A., Korinevskaya G. G.

South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass, Chelyabinsk region, Russia

Article received on November 15, 2023

The article explores nickel-based protective coatings and their influence on high-temperature changes occurring on the inner surface of steel containers designed for HLW immobilization provided their interaction with the melts of

model waste form materials. It evaluates the corrosion behavior of container surfaces with a nickel-based protective coating depending on its application method, i.e., galvanic and chemical. The study indicates the factors governing the corrosion depth, i.e., the depth to which the container steel surface may get altered depending on 4 different waste form material compositions. The study demonstrates high efficiency of the galvanic method in terms of nickel-based protective coating application and the major influence that high sodium and calcium content has on the depth of corrosion penetration into container surface.

**Keywords:** radioactive waste, immobilization, borosilicate waste form materials, steel container, corrosion.

## References

1. Stefanovsky S. V., Skvortsov M. V., Stefanovsky O. I., Nikonov B. S., Presniakov I. A., Glazkova I. S., Ptashkin A. G. Preparation and Characterization of Borosilicate Glass Waste Form for Immobilization of HLW from WWER Spent Nuclear Fuel Reprocessing. *MRS Adv.*, 2017, vol. 2, no. 11, pp. 583–589. DOI: 10.1557/ad.2016.62
2. King F. Container Materials for the Storage and Disposal of Nuclear Waste. *Corros.*, 2013, vol. 69, no. 10, pp. 986–1011. DOI: 10.5006/0894
3. McCright R. D. Metal Container Materials for Nuclear Waste. *MRS Bull.*, 1994, vol. 19, pp. 39–42. DOI: 10.1557/S0883769400048685
4. Shoesmith D. W. Assessing the Corrosion Performance of High-Level Nuclear Waste Containers. *Corros.*, 2006, vol. 62, no. 8, pp. 703–722. DOI: 10.5006/1.327829
5. Guo X., Gin S., Lei P. et al. Self-Accelerated Corrosion of Nuclear Waste Forms at Material Interfaces. *Nat. Mater.*, 2020, vol. 19, no. 3, pp. 310–316. DOI: 10.1038/s41563-019-0579-x
6. Guo X., Gin S., Liu H. et al. Near-Field Corrosion Interactions between Glass and Corrosion Resistant Alloys. *npj Mater Degrad.*, 2020, vol. 4, pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41529-020-0114-1
7. Di Martino J., Rapin C., Berthod P., Podor R., Steinmetz P. Corrosion of Metals and Alloys in Molten Glasses. Part 1: Glass Electrochemical Properties and Pure Metal (Fe, Co, Ni, Cr) Behaviours. *Corros. Sci.*, 2004, vol. 46, no. 8, pp. 1849–1864. DOI: 10.1016/j.corsci.2003.10.0
8. Di Martino J., Rapin C., Berthod P., Podor R., Steinmetz P. Corrosion of metals and alloys in molten glasses. Part 2: Nickel and cobalt high chromium superalloys behaviour and protection. *Corros. Sci.*, 2004, vol. 46, no. 8, pp. 1865–1881. DOI: 10.1016/j.corsci.2003.10.0
9. Eremyashev V. E., Zhrebtsov D. A., Zhivulin V. E., Korinevskaya G. G., Lebedev A. S. Vysokotemperaturnoye vzaimodeystviye khromonikelevoy stali 08KH18N10T i model'nykh matrichnykh borosilikatnykh materialov [High-Temperature Interaction of 08Cr18Ni10Ti Chromium–Nickel Steel with Model Borosilicate Waste Form Materials]. *Neorganicheskaya materialy — Inorganic materials*, 2021, vol. 57, no. 9, pp. 980–986. DOI: 10.1134/S0020168521090041
10. Eremyashev V. E., Korinevskaya G. G., Lebedev A. S., Blinov I. A. Vysokotemperaturnoye vzaimodeystviye khromonikelevoy stali s mnogokomponentnymi matrichnymi borosilikatnymi materialami [High-Temperature Interaction of Chromium–Nickel Steel with Multicomponent Matrix Borosilicate Materials]. *Elektrometallurgiya — Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, no. 3, pp. 28–37. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-3-28-3.
11. Donald I. W. *Waste Immobilization in Glass and Ceramic Based Hosts: Radioactive, Toxic and Hazardous Wastes*. N. Y.: Wiley, 2010. 507 p.
12. McCloy J. S., Goel A. Glass-Ceramics for Nuclear Waste Immobilization. *MRS Bull.*, 2017, vol. 42, no. 3, pp. 233–240. DOI: 10.1557/mrs.2018
13. Eremyashev V., Osipova L., Shenderovich I. The effects of alkaline earth metals on the structure of sodium borosilicate glasses: <sup>11</sup>B and <sup>29</sup>Si NMR study. *Materials Science Forum.*, 2020, vol. 989, pp. 192–198. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.192.
14. Eremyashev V. E., Zhrebtsov D. A., Osipova L. M., Danilina E. I. Thermal Study of Melting, Transition and Crystallization of Rubidium and Caesium Borosilicate Glasses. *Ceram. Int.*, 2016, vol. 42, pp. 18368–18372. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.08.169.
15. Eremyashev V. E., Zhrebtsov D. A., Brazhnikov M. P., Zainullina R. T., Danilina E. I. Cerium Influence on the Thermal Properties and Structure of High-alkaline Borosilicate Glasses. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2020, vol. 139, no. 2, pp. 991–997. DOI: 10.1007/s10973-019-08472-6
16. Eremyashev V. E., Mironov A. B. Vliyaniye zheleza na strukturu kaliyevykh borosilikatnykh stekol [Effect of Fe on the structure of potassium borosilicate glasses]. *Neorgan. Materialy — Inorganic materials*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 177–181. DOI: 10.1134/S0020168515020065.
17. Eremyashev V. E., Korinevskaya G. G., Bukalov S. S. Titan v strukture shchelochnykh borosilikatnykh stekol [Titanium in the Structure of Alkali Borosilicate Glasses]. *Steklo i keramika — Glass Ceram.*, 2016, vol. 72, pp. 405–408. DOI: 10.1007/s10717-016-9798-7.
18. Fluegel A. Glass viscosity calculation based on a global statistical modelling approach. *European Journal of Glass Science and Technology. Part A: Glass Technology*, 2007, vol. 48, no. 1, pp. 13–30.

### Information about the authors

*Lebedev Alexey Sergeevich*, PhD in Chemical Sciences, Junior Research Assistant, South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences (Miass, ter. of the Ilmensky reserve, Chelyabinsk region, 456317, Russia), e-mail: lebedev.a.s@bk.

*Eremyashev Vyacheslav Evgenievich*, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Leading Researcher, South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences (Miass, ter. of the Ilmensky reserve, Chelyabinsk region, 456317, Russia), e-mail: vee-zlat@mail.ru.

*Rassomahin Mikhail Anatolyevich*, Junior Research Assistant, South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences (Miass, ter. of the Ilmensky reserve, Chelyabinsk region, 456317, Russia), e-mail: miha\_rassomahin@mail.ru

*Korinevskaya Galina Gennadievna*, Research Associate, South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences (Miass, ter. of the Ilmensky reserve, Chelyabinsk region, 456317, Russia), e-mail: galkor@yandex.ru

### Bibliographic description

Lebedev A. S., Eremyashev V. E., Rassomahin M. A., Korinevskaya G. G. Protective Coating and Its Influence on Corrosion Behavior of Metal Containers for High-Level Waste Immobilisation. *Radioactive Waste*, 2024, no. 1 (26), pp. 47–56. DOI: 10.25283/258-9707-2024-1-47-56. (In Russian).