

УДК 630.143

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СПЛАВА ХАСТЕЛЛОЙ С-4 С ЭКВИМОЛЬНЫМ РАСПЛАВОМ ХЛОРИДОВ ЛИТИЯ И КАЛИЯ

© 2021 г. Э. А. Карфидов^{a, b}, Е. В. Никитина^{a, b, *}, Н. А. Казаковцева^a,
Н. Г. Молчанова^a, Л. М. Бабушкина^b, Е. А. Никоненко^b

^aИнститут высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^bУральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

*e-mail: neekeetina@mail.ru

Поступила в редакцию 12.01.2020 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 30.01.2021 г.

Для конструкционного оформления высокотемпературных устройств для разрабатываемой технологии высокотемпературной переработки и последующей регенерации отработавшего ядерного топлива необходимы подбор коррозионностойких материалов и комплекс мер по снижению скорости коррозии в расплавленных солях. Никель-хромовые сплавы, легированные тугоплавкими металлами, обладают большой устойчивостью как к коррозии в низкотемпературных электролитах, так и к газовой коррозии при высоких температурах [1–7]. Именно поэтому сплавы типа хастеллой традиционно рассматриваются как перспективные для создания деталей атомных, химических реакторов, контейнеров с токсическими отходами, а также клапанов, труб для химического производства. Целью работы является изучение процесса коррозии металлических материалов, характеристик процесса коррозионного электрохимического взаимодействия в системе сплав–расплав солей щелочных металлов, содержащий добавки трихлоридов *f*-элементов. Объект исследования – система, образованная расплавом эвтектической смеси хлоридов лития, калия с добавлением 0.5–2 мас. % LaCl_3 , CeCl_3 , NdCl_3 , имитирующих соединения урана и плутония, в температурном интервале 500–650°C. В качестве исследуемого материала использовали сплав хастеллой С-4. Атмосфера над расплавом: $\text{Ar} + 10\% \text{O}_2$. Методы исследования: гравиметрический, химико-аналитический (атомно-абсорбционный). Для анализа продуктов использовался микрорентгеноспектральный метод исследования. Показано, что на поверхности исследуемого сплава образуются кислородсодержащие соединения сложного состава на основе оксида никеля(II) и оксихлоридов лантаноидов, замедляющие коррозию материала как ингибиторы экранирующего типа.

Ключевые слова: коррозия, хастеллой, никелевый сплав, хлориды лития и калия

DOI: 10.31857/S0235010621030099

ВВЕДЕНИЕ

Конструкционное оформление многих высокотемпературных технологических процессов с использованием расплавленных солей, в том числе вновь разрабатываемых, сопряжено со значительными материаловедческими трудностями.

Существует два перспективных направления для использования расплавленных смесей хлоридов щелочных металлов: переработка отработавшего ядерного топлива и в качестве среды-теплоносителя внешнего контура жидкосолевого реактора (ЖСР). Значительная агрессивность расплавов хлоридов щелочных металлов требует подбора

устойчивых материалов, разработки способов защиты от коррозии в расплавленных солях, детального изучения механизма разрушения материалов и их коррозионно-электрохимического поведения.

Чрезвычайно важное направление развития современной атомной энергетики — создание замкнутого ядерного топливного цикла с использованием реакторов на быстрых нейтронах [1]. В настоящее время отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) перерабатывают с использованием водных технологий, предполагающих длительную выдержку ОЯТ до начала переработки, существенное количество жидких отходов и др. Разрабатываемая технология высокотемпературной переработки и последующей регенерации ОЯТ включает несколько основных операций, физико-химические основы которых и механизмы протекания химических реакций до сих пор полностью не изучены. Для реализации технологии необходимы материалы, устойчивые в этих условиях как с химической точки зрения, так и по механическим характеристикам.

Солевые расплавы как среды для пирохимических и пирометаллургических методов переработки ОЯТ обладают рядом достоинств. Это радиационная стойкость, позволяющая перерабатывать топливо с выгоранием $100 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кг}$ и более; высокая термическая устойчивость, делающая возможным переработку топлива с удельным тепловыделением более 1 МВт/кг и временем выдержки менее года; возможные высокие концентрации делящихся материалов, так как соли, применяемые для переработки топлива, не являются замедлителями нейтронов; отсутствие кинетических затруднений химических процессов, лежащих в основе технологических операций, за счет высоких скоростей. Благодаря перечисленным свойствам солевых расплавов пирометаллургические и пироэлектрохимические технологии обладают преимуществами: простота технологических схем, компактность установок, минимизация и компактность радиоактивных отходов, пожаро- и взрывобезопасность [2].

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

Ядерные реакторы работают на принципе деления тяжелых ядер: в них используется топливо из радиоактивных элементов, таких как уран и плутоний, ядра которых делятся с выделением энергии, а получающиеся в результате нейтроны вызывают дальнейшие распады. Функция реактора заключается в поддержании такой цепной реакции в контролируемом режиме, отводе тепловой энергии и ее превращение в другие виды, например, в электричество. Высокотехнологичный вариант — реактор на расплавленных солях (ЖСР). Теплоноситель (как и топливо) — смесь расплавленных солей при высокой температуре. Конструкция такого реактора обладает рядом преимуществ по сравнению с наиболее распространенным вариантом водяного охлаждения. В частности, в таком случае удается работать при намного меньшем давлении в активной зоне и более высокой температуре, что позволяет увеличить надежность работы.

Расплавленные хлориды и фториды щелочных металлов являются перспективными теплоносителями, позволяющими на сотни градусов расширить рабочий температурный интервал энергетических установок, включая ядерные реакторы, обеспечивать эффективный теплоперенос из горячих зон высокотемпературных устройств. Благодаря термической и радиационной стойкости в диапазоне температур от точки плавления до точки кипения они выгодно отличаются от водно-солевых и органических теплоносителей. В аварийных ситуациях, например, при повреждении или разрушении трубопровода или корпуса теплопередающего устройства, они не образуют взрывоопасных газовых смесей при взаимодействии с водой или влажной атмосферой. Эти свойства, а также базовые теплофизические характеристики делают расплавленные фториды и хлориды щелочных металлов, весьма привлекательными и конкурентоспо-

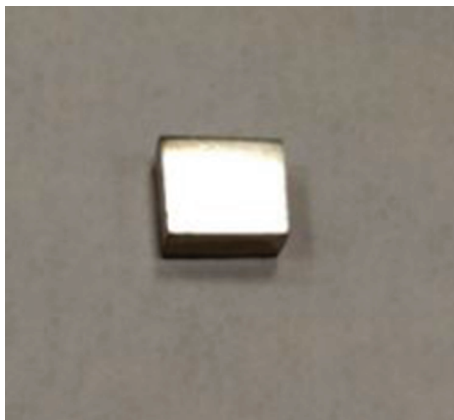


Рис. 1. Образец сплава хастеллой марки С-4.

собными теплоносителями, компонентами топливных смесей и регенеративными средами ядерных реакторов нового поколения.

Целью настоящей исследовательской работы является изучение коррозионных процессов в расплавленных хлоридах щелочных металлов с участием промышленно производимых металлических материалов. Никель-хромовые сплавы, легированные тугоплавкими металлами, обладают большой устойчивостью как к коррозии в низкотемпературных электролитах, так и к газовой коррозии при высоких температурах [3–9]. Именно поэтому сплавы типа хастеллой традиционно рассматриваются как перспективные для создания деталей атомных, химических реакторов, контейнеров с токсическими отходами, а также клапанов, труб для химического производства.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Коррозионные испытания образцов сплава хастеллой С-4 выполняли в герметичной высокотемпературной кварцевой ячейке при температуре 500°C в эвтектическом солевом расплаве 60LiCl–40KCl, мол. %, а также с добавлением в расплав от 0.5 до 2 мол. % LaCl₃, CeCl₃ и NdCl₃.

Исследуемые образцы представляли собой пластины 0.3 × 0.5 × 0.6 мм (рис. 1). Образцы предварительно обрабатывали мелкодисперсной шлифовальной бумагой, обезжировали и сушили спиртово-ацетоновой смесью. Массу исследуемых образцов измеряли на аналитических весах до и после эксперимента. Состав исследуемого сплава приведен в табл. 1.

Поверхность образцов до эксперимента была аттестована при помощи МРСА сканирующего электронного микроскопа “JSM-5900 LV” (Jeol, Япония) (рис. 2). Элементарный состав на поверхности сплава (табл. 2) соответствует заявленному.

Смеси солей готовили сплавлением расчетных количеств солей марки х. ч, предварительно переплавленных на воздухе, а затем подвергнутых трехкратной зонной плавке в токе сухого очищенного аргона. Затем проводили сушку солей при температуре

Таблица 1. Состав сплава хастеллой С-4

Сплав	Co	Cr	Mo	W	Fe	Si	Mn	C	Ni	Другое
С-4	<2	16	16	—	<3	<0.08	<1	<0.01	Основа	Ti < 0.7

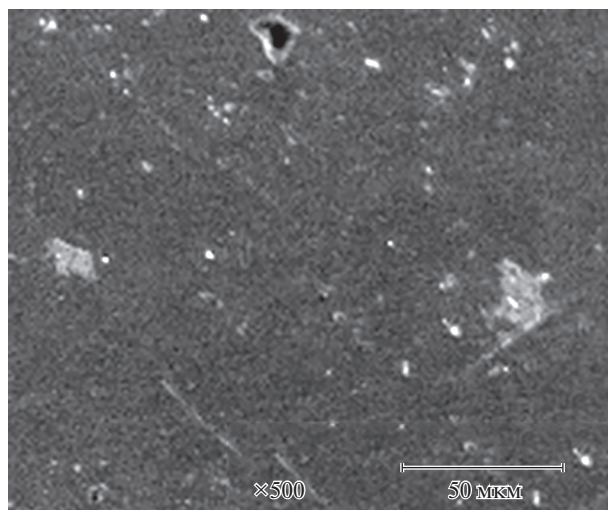


Рис. 2. Морфология поверхности исходного образца сплава хастеллой С-4.

200°С в атмосфере аргона (чистотой 99.9%), на протяжении 4-х часов, для удаления возможной адсорбированной влаги. Просушенные смеси солей хранили в герметичном эксикаторе.

В алундовый тигель загружали хлоридную эвтектику, рассчитанное количество трихлоридов редкоземельных металлов (РЗМ) и исследуемый образец сплава. Ячейку с погруженным тиглем нагревали до заданной температуры в течение 1 ч, непрерывно продувая аргоном (скорость 100 мл/мин). Затем коррозионное испытание проводили на протяжении 24 ч в атмосфере $\text{Ag} + 10\% \text{O}_2$. Рассчитывали весовой и глубинный показатели коррозии, основываясь на результатах гравиметрических измерений.

После эксперимента образцы отмывали от остатка хлоридных солей раствором 0.05 М соляной кислоты. Поверхность образцов после эксперимента также исследовали при помощи сканирующего электронного микроскопа “JSM-5900 LV” (Jeol, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 3 представлены значения скорости коррозии для образцов сплава хастеллой С-4, рассчитанные по данным гравиметрического анализа.

В высокотемпературных хлоридных расплавах реализуется механизм коррозии, принципиально отличный от общепринятого низкотемпературного за счет высокой агрессивности среды и высокой температуры [10–13].

Наличие в расплаве ионов редкоземельных металлов привело к снижению массовых потерь сплава и, как следствие, к снижению скоростей коррозии. Это связано с протеканием второстепенных процессов на поверхности сплавов [14–22] или в объеме электролитов, таких как образование новых фаз (оксихлоридов РЗМ, двойных оксидов компонентов сплава и редкоземельных металлов), которые в свою очередь могут

Таблица 2. Состав (МРСА) сплава хастеллой С-4

Элемент	O	Cr	Fe	Ni	Mo	Mn
Мас. %	0.96	16.39	0.73	65.30	16.11	0.51

Таблица 3. Скорость коррозии сплава хастеллой С-4, $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч}) \cdot 10^5$

T, °C	(LiCl–KCl) _{эвт}	С добавлением LaCl ₃		С добавлением CeCl ₃		С добавлением NdCl ₃	
		0.5 мол. %	2 мол. %	0.5 мол. %	2 мол. %	0.5 мол. %	2 мол. %
500	18.4 ± 0.5	6.6 ± 0.4	4.4 ± 0.4	3.9 ± 0.4	2.7 ± 0.3	3.6 ± 0.3	0.9 ± 0.3
600	27.6 ± 0.5	14.3 ± 0.6	12.5 ± 0.6	7.8 ± 0.5	8.2 ± 0.5	7.4 ± 0.4	2.3 ± 0.5
650	33.1 ± 0.4	22.1 ± 0.5	24.7 ± 0.4	18.3 ± 0.7	20.3 ± 0.4	25.1 ± 0.4	29.7 ± 0.5

Таблица 4. Химический состав (МРСА) поверхности сплава хастеллой С-4, выдержанного в эвтектике KCl–LiCl

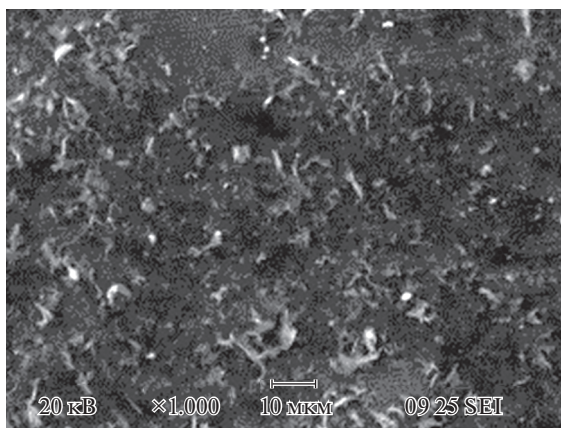
Элемент	O	Al	Cl	Cr	Fe	Ni	Mo
Мас. %	3.01	0.34	0.27	16.9	0.63	64.69	14.16

препятствовать протеканию дальнейшей коррозии за счет ограничения доступа электролита к исходной поверхности образца. Подобное явление так же можно обозначить как ингибирование экранирующего типа.

На рис. 3–6 представлена морфология поверхности исследуемых образцов сплава хастеллой С-4, проанализированная с помощью микрорентгеноспектрального метода. Элементный состав на поверхности образцов представлен в табл. 4–7.

Из результатов анализа, представленных на рис. 3, следует, что поверхность сплава значительно обедняется по молибдену в хлоридном расплаве без добавок (рис. 2).

Из данных микрорентгеноспектрального анализа поверхности прокорродировавших образцов (рис. 3–6) следует, что введение в расплав трихлоридов РЗМ приводит к формированию/осаждению на поверхности образцов фаз оксихлоридов РЗМ. Это ведет к торможению реакции окисления молибдена и хрома, из-за ограничения (экранирования) доступа электролита к исходной поверхности сплава. Особенно четко это наблюдается при добавлении трихлорида неодима, когда на образцах образуются равномерно распределенные по поверхности достаточно крупные структуры ксеноморфной формы. Подобные закономерности также согласуются с результатами гравиметрического анализа.

**Рис. 3.** Морфология поверхности сплава хастеллой С-4, выдержанного в эвтектике KCl–LiCl.

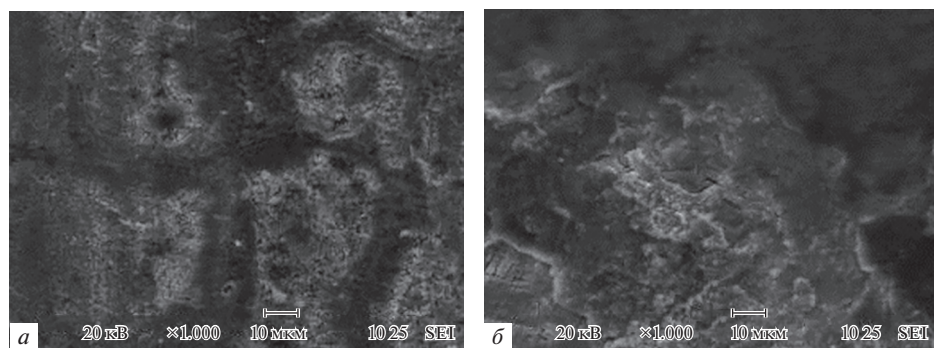


Рис. 4. Морфология поверхности сплава хастеллой С-4, выдержанного в хлоридном расплаве с добавлением а) 0.5; б) 2 мол. % LaCl₃.

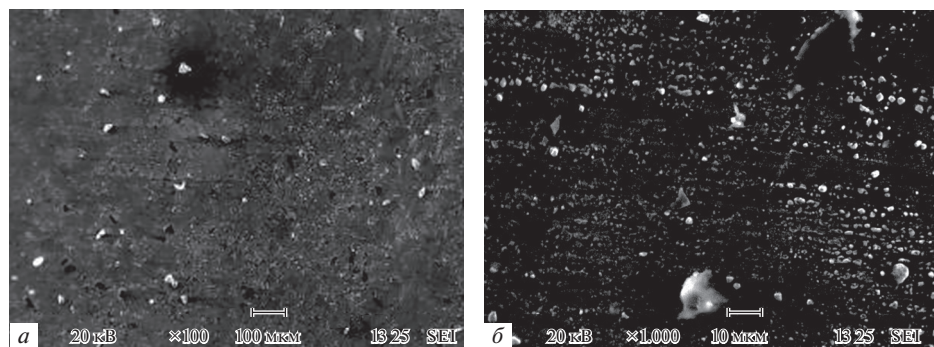


Рис. 5. Морфология поверхности сплава хастеллой С-4, выдержанного в хлоридном расплаве с добавлением а) 0.5; б) 2 мол. % CeCl₃.

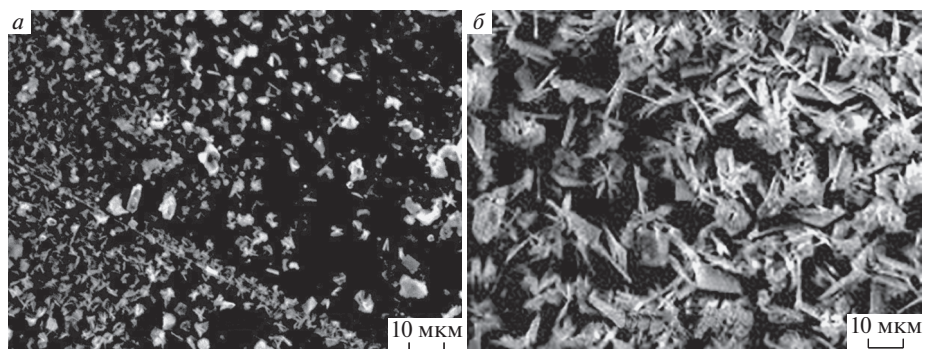


Рис. 6. Морфология поверхности сплава хастеллой С-4, выдержанного в хлоридном расплаве с добавлением а) 0.5; б) 2 мол. % NdCl₃.

Таблица 5. Химический состав (МРСА) сплава хастеллой С-4, выдержанного в эвтектике KCl–LiCl с добавлением LaCl₃

0.5 мол. % LaCl ₃		2 мол. % LaCl ₃	
элемент	мас. %	элемент	мас. %
O	4.10	O	18.57
Cr	14.11	Mg	0.55
Fe	0.61	Al	0.66
Ni	65.56	Si	0.56
Mo	11.42	Cl	0.69
La	4.20	Cr	30.73
		Fe	0.31
		Ni	30.34
		Mo	12.56
		La	5.03

Таблица 6. Состав сплава хастеллой С-4, выдержанного в эвтектике KCl–LiCl с добавлением CeCl₃

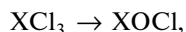
0.5 мол. % CeCl ₃		2 мол. % CeCl ₃	
элемент	мас. %	элемент	мас. %
O	5.32	O	6.48
Cl	0.47	Cl	0.52
Cr	11.64	Cr	13.50
Ce	2.49	Ce	5.43
Ni	73.53	Ni	68.17
Mo	6.56	Mo	5.90

Селективность по никелю крайне низка при всех изучаемых условиях, судя по результатам МРСА и данным химического анализа расплава (<5%). Избирательность деградации сплава по хрому значительно выше, чем по никелю. По совокупным результатам анализов можно сделать вывод, что основной вклад в коррозионные потери сплава вносит молибден.

Таблица 7. Химический состав (МРСА) поверхности образца сплава хастеллой С-4, выдержанного в эвтектике KCl–LiCl с добавлением NdCl₃

0.5 мол. % NdCl ₃		2 мол. % NdCl ₃	
элемент	мас. %	элемент	мас. %
O K	7.17	O K	6.97
Al K	0.33	Cl K	12.45
Si K	0.91	Cr K	8.47
Cl K	1.55	Ni K	7.14
Cr K	19.44	Nd L	64.98
Fe K	0.43		
Ni K	47.75		
Nd L	15.10		

Добавление хлоридов редкоземельных металлов приводит к образованию на поверхности сплава оксихлоридной фазы [23–26], оказывающей ингибирующее действие на коррозию сплава хастеллой С-4:



где X – La^{3+} , Ce^{3+} и Nd^{3+} .

Следует отметить, что подобное поведение сплава обусловлено содержанием кислорода в системе.

Установлено, что характер разрушения поверхности аустенитного материала хастеллой С-4 в ходе выдержки в смеси LiCl-KCl , содержащей добавки трихлоридов лантана, церия, неодима, при 500–650°C межкристаллитный. Движущей силой коррозии в данных условиях являются процессы растворения анодных зон и взаимодействия компонентов сплава с катионами редкоземельных металлов с образованием малорастворимых продуктов.

ВЫВОДЫ

1. Исследовано коррозионное поведение сплава хастеллой С-4 в расплаве LiCl-KCl с добавлением 0.5–2 мас. % LaCl_3 , CeCl_3 , NdCl_3 в температурном интервале 500–650°C.

2. Показано, что на поверхности исследуемого сплава образуются кислородсодержащие соединения сложного состава на основе оксида никеля(II) и оксихлоридов лантаноидов, замедляющие коррозию материала как ингибиторы экранирующего типа.

3. Увеличение концентрации трихлоридов в расплаве не влияет на механизм процесса, т.к. лимитирующими стадиями протекающих процессов является диффузия компонентов сплава из объема зерен к их границе и отвод продуктов в объем расплава.

4. Коррозия материала в лантаноидсодержащих расплавах закономерно возрастает с ростом температуры. С увеличением концентрации соли лантаноида в расплаве защитное действие ингибитора наблюдается только при 500°C.

5. Определены скорости коррозионного разрушения исследуемого конструкционного материала в расплавленной смеси хлоридов лития и калия. Скорость коррозии, определенная химико-аналитическим и гравиметрическим методом, удовлетворительно совпадает.

6. Основными корродирующими компонентами материала независимо от состава расплава являются преимущественно молибден, а также в меньшей степени хром, что свидетельствует об электрохимической природе процесса коррозии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90082.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hore Lacy I. Nuclear Energy in the 21st Century: theWorld Nuclear University Primer. London: World Nuclear University Press, 2006.
2. Наумов В.С. Концептуальные возможности пироэлектрохимической технологии вовлечения тория в топливный цикл реакторов на быстрых нейтронах // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2018. № 4. С. 43–51.
3. Edeleanu C., Gibson J.G., Meredith J.E. Effects of diffusion on corrosion of metals by fused salts // J. iron- and steel institute. 1960. **196**. № 1. P. 59–61.
4. Кочергин В.П. Защита металлов от коррозии в ионных расплавах и растворах электролитов: монография. Екатеринбург: УрГУ, 1991.
5. Смирнов М.В., Озерная И.Н. Коррозия металлов в расплавленных солевых средах и защита от коррозии // Итоги науки и техники. Коррозия и защита от коррозии. М.: ВИНТИ. 1987. **1**. С. 142–143.
6. Улиг Г.Г., Ревы Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. Л.: Химия, 1989.

7. Озерная И.Н. Коррозия металлов в расплавленных солях при термической обработке // Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. № 3. С. 14–17.
8. Yamamura T., Mehmood M., Maekawa H., Sato Y. Electrochemical processing of rare-earth and rare metals by using molten salts // Chemistry for Sustainable Development. 2004. № 12. P. 105–111.
9. Пенягина О.П. Коррозионное поведение стали 12X18H10T в хлоридных и карбонатных расплавах в условиях термоциклирования // Расплавы. 1994. № 3. С. 71–76.
10. Смирнов М.В., Володин В.П., Озерная И.Н. Стационарный потенциал и коррозия металлов в расплавленных солях // Докл. АН СССР. Сер. 155. 1964. № 2. С. 418–421.
11. Смирнов М.В. Электродные потенциалы в расплавленных хлоридах: монография. М.: Наука, 1973.
12. Абрамов А.В., Половов И.Б., Ребрин О.И., Лисиенко Д.Г. Коррозия аустенитных сталей и их компонентов в ванадийсодержащих хлоридных расплавах // Расплавы. 2014. № 2. С. 44–55.
13. Озерная И.Н. Поведение хромникелевых сплавов в карбонатных расплавах // Защита металлов. 1966. № 6. С. 700–704.
14. Лебедев В.А. Стандартные и условные стандартные потенциалы лантаноидов и их сплавов в расплавленных хлоридах // Электрохимия. 1995. № 1. С. 41–50.
15. Васин Б.Д., Иванов В.А., Распопин С.П., Савченко С.В. Условные стандартные потенциалы церия в эвтектической смеси хлоридов натрия и цезия // Расплавы. 1989. № 3. С. 100–101.
16. Марочник сталей и сплавов: справочник. 3-е изд., доп. Донецк: Юго-восток, 2002.
17. Марочник стали и сплавов: Электронный ресурс. 2003. URL: <http://www.splav.kharkov.com> (дата обращения 5.11.2020).
18. Кочергин В.П. Растворение железа в расплавленных хлоридах щелочных и щелочноземельных металлов // Журн. прикладной химии. 1956. № 4. С. 566–569.
19. Génération IV nuclear energy systems: Road tap and concepts // Transactions of the American Nuclear Society. 2001. **84**. P. 115–118.
20. Mohanty B.P. Role of chlorides in hot corrosion of a cast Fe–Cr–Ni alloy. Part II: Thermochemical model studies // Corrosion Science. 2004. **46**. № 12. P. 2909–2924.
21. Devine T.M. Mechanism of Intergranular Corrosion and Pitting Corrosion of Austenitic and Duplex 308 Stainless Steel // J. Electrochem. Soc. 1979. **126**. № 3. P. 374–385.
22. Илющенко Н.Г., Анфиногенов А.И., Шуров Н.И. Взаимодействие металлов в ионных расплавах. М.: Наука, 1991.
23. Новоселова А.В., Смоленский В.В. Электрохимические и термодинамические свойства лантанидов (Nd, Sm, Eu, Tm, Yb) в расплавленных хлоридах щелочных металлов // Радиохимия. 2013. № 3. С. 193–204.
24. Новоселова А.В., Смоленский В.В. Электрохимическое исследование свойств ионов Nd(III) и Nd(II) в расплавленных эвтектике LiCl–KCl–CsCl и индивидуальном CsCl // Электрохимия. 2013. № 10. С. 1041–1047.
25. Kuznetsov S.A., Gaune-Escard M. Electrochemistry and Electrefining of Rare Earth Metals in Chloride Melts // Proc. of VII Int. Symp. on Molten Salts and Technology. 2005. **2**. P. 855–859.
26. Абрамов А.В., Половов И.Б., Ребрин О.И., Волкович В.А., Лисиенко Д.Г. Коррозионное поведение аустенитных сталей и их компонентов в ниобийсодержащих хлоридных расплавах // Расплавы. 2014. № 1. С. 44–53.

INTERACTION OF THE HASTELLOY C-4 ALLOY WITH THE EQUIMOLE MELT OF LITHIUM AND POTASSIUM CHLORIDE

E. A. Karfidov^{1,2}, E. V. Nikitina^{1,2}, N. A. Kazakovtseva¹, N. G. Molchanova¹,
L. M. Babushkina², E. A. Nikonenko²

¹*Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia*

²*Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*

For the design of high-temperature devices for the developed technology for high-temperature reprocessing and subsequent regeneration of spent nuclear fuel, it is necessary to select corrosion-resistant materials and a set of measures to reduce the corrosion rate in molten salts. Nickel-chromium alloys alloyed with refractory metals are highly resistant to both corrosion in low-temperature electrolytes and gas corrosion at high temperatures [1–7]. That is why Hastelloy-type alloys are traditionally considered promising for the creation of parts for nuclear and chemical reactors, containers with toxic waste, as well as valves and pipes for

chemical production. The aim of this work is to study the process of corrosion of metallic materials, the characteristics of the process of corrosive electrochemical interaction in the system alloy – melt of alkali metal salts, containing additives of trichlorides of *f*-elements. The object of investigation is a system formed by a melt of a eutectic mixture of lithium and potassium chlorides with the addition of 0.5–2 wt % LaCl_3 , CeCl_3 , NdCl_3 , imitating uranium and plutonium compounds, in the temperature range of 500–650°C. Hastelloy C-4 alloy was used as the test material. Atmosphere above the melt: $\text{Ar} + 10\% \text{O}_2$. Research methods: gravimetric, chemical-analytical (atomic absorption). To analyze the products, an X-ray microspectral research method was used. It is shown that oxygen-containing compounds of complex composition based on nickel(II) oxide and lanthanide oxychlorides are formed on the surface of the alloy under study, which retard the corrosion of the material as shielding inhibitors.

Keywords: corrosion, hastelloy, nickel alloy, lithium and potassium chlorides

REFERENCES

1. Hore Lacy I. Nuclear Energy in the 21st Century: theWorld Nuclear University Primer. London: World Nuclear University Press, 2006.
2. Naumov V.S. Kontseptual'nyye vozmozhnosti piroelektrokhimicheskoy tekhnologii vovlecheniya toriya v toplivnyy tsikl reaktorov na bystrykh neytronakh [Conceptual possibilities of pyroelectrochemical technology for involving thorium in the fuel cycle of fast reactors] // *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2018. № 4. P. 43–51. [In Russian].
3. Edeleanu C., Gibson J.G., Meredith J.E. Effects of diffusion on corrosion of metals by fused salts // *J. iron- and steel institute*. 1960. **196**. № 1. P. 59–61.
4. Kochergin V.P. Zashchita metallov ot korrozii v ionnykh rasplavakh i rastvorakh elektrolitov: monografiya [Protection of metals from corrosion in ionic melts and electrolyte solutions: monograph]. Yekaterinburg: UrGU, 1991. [In Russian].
5. Smirnov M.V., Ozeryanaya I.N. Korroziya metallov v rasplavlennykh solevykh sredakh i zashchita ot korrozii [Corrosion of metals in molten salt environments and protection against corrosion] // *Itogi nauki i tekhniki. Korroziya i zashchita ot korrozii*. M.: VINITI. 1987. **1**. P. 142–143. [In Russian].
6. Ulig G.G., Revi R.U. Korroziya i bor'ba s ney. Vvedeniye v korroziionnyuyu nauku i tekhniku [Corrosion and fight against it. Introduction to Corrosion Science and Engineering]. L.: Khimiya, 1989. [In Russian].
7. Ozeryanaya I.H. 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].
8. Yamamura T., Mehmood M., Maekawa H., Sato Y. Electrochemical processing of rare-earth and rare metals by using molten salts // *Chemistry for Sustainable Development*. 2004. № 12. P. 105–111.
9. Penyagina O.P. Korroziionnoye povedeniye stali 12Kh18N10T v khloridnykh i karbonatnykh rasplavakh v usloviyakh termotsiklirovaniya [Corrosion behavior of 12Kh18N10T steel in chloride and carbonate melts under thermal cycling conditions] // *Rasplavy*. 1994. № 3. P. 71–76. [In Russian].
10. Smirnov M.V., Volodin V.P., Ozeryanaya I.N. Statsionarnyy potentsial i korroziya metallov v rasplavlennykh solyakh [Stationary potential and corrosion of metals in molten salts] // *Dokl. AN SSSR*. Ser. 155. 1964. № 2. P. 418–421. [In Russian].
11. Smirnov M.V. Elektroodnyye potentsialy v rasplavlennykh khloridakh: monografiya [Electrode potentials in molten chlorides: monograph]. M.: Nauka, 1973. [In Russian].
12. Abramov A.V., Polovov I.B., Rebrin O.I., Lisiyenko D.G. Korroziya austenitnykh staley i ikh komponentov v vanadiysoderzhashchikh khloridnykh rasplavakh [Corrosion of austenitic steels and their components in vanadium-containing chloride melts] // *Rasplavy*. 2014. № 2. P. 44–55. [In Russian].
13. Ozeryanaya I.N. Povedeniye khromnikelevykh splavov v karbonatnykh rasplavakh [Behavior of chromium–nickel alloys in carbonate melts] // *Zashchita metallov*. 1966. № 6. P. 700–704. [In Russian].
14. Lebedev V.A. Standartnyye i uslovnyye standartnyye potentsialy lantanoidov i ikh splavov v rasplavlennykh khloridakh [Standard and conditional standard potentials of lanthanides and their alloys in molten chlorides] // *Elektrokhiimiya*. 1995. № 1. P. 41–50. [In Russian].
15. Vasin B.D., Ivanov V.A., Raspopin S.P., Savchenko S.V. Uslovnyye standartnyye potentsialy tseriya v evtekticheskoy smesi khloridov natriya i tseziya [Conditional standard potentials of cerium in a eutectic mixture of sodium and cesium chlorides] // *Rasplavy*. 1989. № 3. P. 100–101. [In Russian].

16. Marochnik staley i splavov: spravochnik [Grade of steels and alloys: a reference book. 3rd ed.]. Donetsk: Yugo-vostok, 2002. [In Russian].
17. Marochnik stali i splavov [The brand of steel and alloys]: Electronic resource. 2003. <http://www.splav.kharkov.com> (date of access 5.11.2020). [In Russian].
18. Kochergin V.P. Rastvoreniye zheleza v rasplavlennykh khloridakh shchelochnykh i shchelochnozemel'nykh metallov [Dissolution of iron in molten chlorides of alkali and alkaline earth metals] // Zhurnal prikladnoy khimii. 1956. № 4. P. 566–569. [In Russian].
19. Génération IV nuclear energy systems: Road rap and concepts // Transactions of the American Nuclear Society. 2001. **84**. P. 115–118.
20. Mohanty B.P. Role of chlorides in hot corrosion of a cast Fe–Cr–Ni alloy. Part II: Thermochemical model studies // Corrosion Science. 2004. **46**. № 12. P. 2909–2924.
21. Devine T.M. Mechanism of Intergranular Corrosion and Pitting Corrosion of Austenitic and Duplex 308 Stainless Steel // J. Electrochem. Soc. 1979. **126**. № 3. P. 374–385.
22. Ilyushchenko N.G., Anfinogenov A.I., Shurov N.I. Vzaimodeystviye metallov v ionnykh rasplavakh [Interaction of metals in ionic melts]. M.: Nauka, 1991. [In Russian].
23. Novoselova A.V., Smolenskiy V.V. Elektrokhimicheskiye i termodinamicheskiye svoystva lantanidov (Nd, Sm, Eu, Tm, Yb) v rasplavlennykh khloridakh shchelochnykh metallov [Electrochemical and thermodynamic properties of lanthanides (Nd, Sm, Eu, Tm, Yb) in molten alkali metal chlorides] // Radiokhimiya. 2013. № 3. P. 193–204. [In Russian].
24. Novoselova A.V., Smolenskiy V.V. Elektrokhimicheskoye issledovaniye svoystv ionov Nd(III) i Nd(II) v rasplavlennykh evtektike LiCl–KCl–CsCl i individual'nom CsCl [Electrochemical study of the properties of Nd(III) and Nd(II) ions in molten LiCl–KCl–CsCl eutectic and individual CsCl] // Elektrokhimiya. 2013. № 10. P. 1041–1047. [In Russian].
25. Kuznetsov S.A., Gaune-Escard M. Electrochemistry and Electrorefining of Rare Earth Metals in Chloride Melts // Proc. of VII Int. Symp. on Molten Salts and Technology. 2005. **2**. P. 855–859.
26. Abramov A.V., Polovov I.B., Rebrin O.I., Volkovich V.A., Lisiyenko D.G. Korrozionnoye povedeniye austenitnykh staley i ikh komponentov v niobiysoderzhashchikh khloridnykh rasplavakh [Corrosion behavior of austenitic steels and their components in niobium-containing chloride melts] // Rasplavy. 2014. № 1. C. 44–53. [In Russian].