

А.М. Аханов¹ , Т.В. Кульсартов^{2,3} , Б.Б. Шакиров¹ , Ж.А. Заурбекова^{2,3*} 

¹Институт ядерной физики, г. Алматы, Казахстан

²НИИЭТФ Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

³Филиал «Институт атомной энергии» НЯЦ РК, г. Курчатова, Казахстан

*e-mail: zha@physics.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО БЕРИЛЛИЯ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ПАРО-АРГОННОЙ СРЕДЫ

Представлены экспериментальные результаты по изучению коррозионной стойкости металлического бериллия (МБ) при термоциклировании в условиях паро-аргонной среды при температурах от 600 до 900°C. Цель исследования состояла в определении кинетических параметров коррозионных процессов и скорости взаимодействия паров воды с поверхностью бериллия. Методология включала циклическое нагревание и охлаждение образцов МБ с последующим измерением потерь массы, визуальную инспекцию поверхности и оценку кинетических параметров. В результате экспериментов установлены энергия активации коррозии $Ea = (130 \pm 6) \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ и предэкспоненциальный множитель $k_0 = (0,23 \pm 0,02) \frac{\text{г}}{\text{с}\cdot\text{см}^2}$. Проявлено значительное увеличение скорости коррозии при повышении температуры, что связано с разрушением оксидной пленки и развитием поверхности образцов. Полученные результаты имеют практическую значимость для обеспечения надежности и безопасности использования бериллия в условиях высоких температур, особенно в ядерных и термоядерных реакторах. Исследование вносит значительный вклад в понимание коррозионного поведения МБ при термоциклировании, предоставляя ценные экспериментальные данные, необходимые для разработки и эксплуатации современных высокотемпературных бериллиевых композиций. Практическое значение работы заключается в повышении безопасности установок и долговечности материалов, применяемых в ядерной энергетике.

Ключевые слова: металлический бериллий, коррозия, термоциклирование, скорость коррозии, дефект массы, паро-аргонная смесь.

A.M. Akhanov¹, T.V. Kulsartov^{2,3}, B.B. Shakirov¹, Zh.A. Zaurbekova^{2,3}

¹The Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

²IETP al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

³“Institute of Atomic Energy”, Branch of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

*e-mail: zha@physics.kz

Study of corrosion resistance of metal beryllium during thermocycling in vapour-argon conditions

Experimental results are presented to study the corrosion resistance of metal beryllium (MB) during thermocycling in a steam-argon environment at temperatures from 600 to 900°C. The aim of the study was to determine the kinetic parameters of corrosion processes and the rate of interaction of water vapour with the beryllium surface. The methodology involved cyclic heating and cooling of MB samples followed by mass loss measurements, visual inspection of the surface and estimation of kinetic parameters. As a result of experiments, the corrosion activation energy $Ea = (130 \pm 6) \frac{\text{J}}{\text{mol}}$ and pre-exponential factor $k_0 = (0,23 \pm 0,02) \frac{\text{g}}{\text{s}\cdot\text{cm}^2}$ were established. A significant increase in the corrosion rate with increasing temperature was demonstrated, which was attributed to the destruction of the oxide film and surface development of the samples. The obtained results have practical significance for ensuring the reliability and safety of beryllium use at high temperatures, especially in fusion and fission reactors. The study makes a significant contribution to the understanding of the corrosion behavior of MB during thermal cycling, providing valuable experimental data required for the design and operation of advanced high-temperature beryllium composites. The practical

significance of the work is to increase the safety of installations and the durability of materials used in nuclear energy.

Key words: metal beryllium, corrosion, thermocycling, corrosion rate, mass defect, vapour-argon mixture.

А.М. Аханов¹, Т.В. Кульсартов^{2,3}, Б.Б. Шакиров¹, Ж.А. Заурбекова^{2,3*}

¹Ядролық физика институты, Алматы қ., Қазақстан

²ЭТФЭЗИ Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

³ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: zha@physics.kz

Бу-аргон ортасында металл бериллийдің коррозияға төзімділігін термоциклдеу кезінде зерттеу

600-ден 900С-қа дейінгі температурада бу-аргон ортасы жағдайында термоциклдеу кезінде металл бериллийдің (МБ) коррозияға төзімділігін зерттеу бойынша эксперименттік нәтижелер ұсынылған. Зерттеудің мақсаты коррозиялық процестердің кинетикалық параметрлерін және су буының бериллий бетімен әрекеттесу жылдамдығын анықтау болды. Әдістемеге МБ үлгілерін циклдік қыздыру және салқындату, содан кейін массаның жоғалуын өлшеу, бетті визуалды тексеру және кинетикалық параметрлерді бағалау кірді. Тәжірибе нәтижесінде коррозияның белсендіру энергиясы $Ea = (130 \pm 6) \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ және экспоненциал алды фактор $k_0 = (0,23 \pm 0,02) \frac{\text{г}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$ анықталды. Температураның жоғарылауымен коррозия жылдамдығының едәуір артуы көрсетілді, бұл оксидті пленканың бұзылуымен және үлгілердің беткі қабатының өсуімен байланысты. Алынған нәтижелердің бериллийді жоғары температурада, әсіресе ядролық және термоядролық реакторларда пайдаланудың сенімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін практикалық маңызы бар. Зерттеу заманауи жоғары температуралы бериллий композицияларын әзірлеу және пайдалану үшін қажетті құнды эксперименттік деректерді ұсына отырып, термоциклді МБ коррозиялық әрекетін түсінуге айтарлықтай үлес қосады. Жұмыстың практикалық маңыздылығы қондырғылардың қауіпсіздігін және атом энергетикасында қолданылатын материалдардың беріктігін арттыру болып табылады.

Түйін сөздер: металл бериллий, коррозия, термоциклдеу, коррозия жылдамдығы, масса ақауы, бу-аргон қоспасы.

Введение

Металлический бериллий (МБ) используется в широком спектре ядерных применений, таких как замедлитель, отражатель и оболочка топлива в ядерных реакторах, благодаря своему низкому сечению захвата нейтронов и высокому потенциалу упругого рассеяния нейтронов [1-3]. Кроме того, он также рассматривается в качестве перспективного материала для будущих термоядерных реакторов. Бериллий рассматривается в качестве компонента первой стенки, а также в качестве нейтронного размножителя тритиевого модуля в бланкете термоядерного реактора [4,5]. Например, в концепции засыпного, водоохлаждаемого тритиевого модуля (Water Cooled Pebbled Bed), пэбблы МБ смешиваются с пэбблами метатитаната лития (Li_2TiO_3), что обеспечивает коэффициент воспроизводства трития больше единицы [4,5]. Бериллий должен выдерживать жесткие условия эксплуатации в течение длительного времени без существенных

изменений теплофизических и механических свойств. Однако, несмотря на свои положительные стороны, бериллий подвержен коррозии при высоких температурах, что может ограничить его применение в таких экстремальных условиях [6-10].

Например, в работе [11] представлены результаты исследования влияния высокотемпературной коррозии (600-800°C) в жидком литии на механические свойства бериллия. Результаты исследований показали, что потеря веса бериллия возрастает с повышением температуры и длительности воздействия жидкого лития. Также было обнаружено, что современные марки бериллия обладают более высокой коррозионной стойкостью в жидком литии по сравнению с более старыми марками, что проявляется в минимальных коррозионных повреждениях и в меньшем ухудшении механических свойств.

Целью данного исследования является изучение коррозионной стойкости МБ при термоциклировании в присутствии паро-

аргонной смеси. Эксперименты проводились при различных температурах от 600°C до 900°C, что позволяет получить полное представление о поведении материала в широком диапазоне высоких температур. В процессе экспериментов образцы подвергались циклическому нагреву и охлаждению в паро-аргонной среде при постоянном потоке смеси. Полученные результаты включают измерения потерь массы образцов, визуальную инспекцию поверхности образцов и оценку кинетических параметров коррозионных процессов.

Новизна данного исследования заключается в комплексном подходе к изучению коррозионного поведения МБ при термоциклировании. Важно отметить, что большинство исследований были сосредоточены на статических условиях окисления, в то время как динамические условия термоциклирования остаются малоизученными. Актуальность работы обусловлена потребностью в экспериментальных данных характеризующих кандидатные материалы термоядерных реакторов, где коррозионная стойкость материалов играет критическую роль в обеспечении безопасности и долговечности установок.

Материалы и методы

Исследуемые образцы

В качестве исследуемых образцов были выбраны пэбблы МБ (см. рис. 1) диаметром $(1 \pm 0,2)$ мм. Содержание бериллия не менее 99% (масс.). Основные параметры образцов МБ приведены в таблице 1.

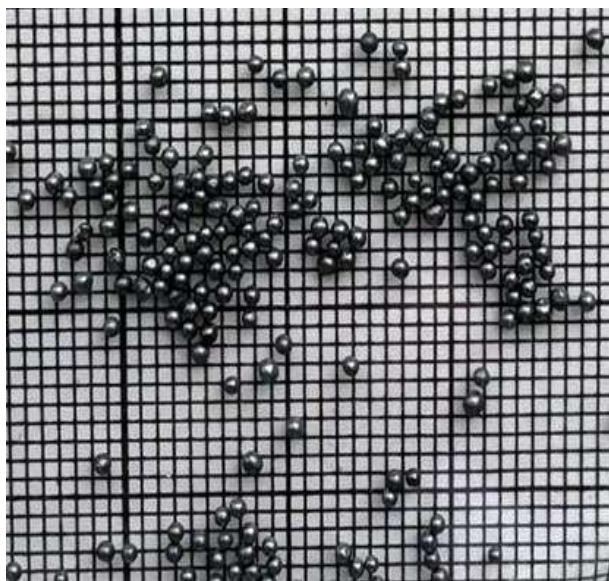


Рисунок 1 – Внешний вид образцов МБ

Таблица 1 – Основные параметры образцов

Параметр	Значение
Исходная масса, г	0,2503
Плотность, г/см ³	1,85
Количество, шт.	242
Общая площадь поверхности, см ²	7,6
Общий объем образцов, см ³	0,13

Описание установки

Разработана вне-реакторная установка для проведения экспериментов по высокотемпературной коррозии [12]. Установка состоит из высоковакуумной горизонтальной трубчатой печи (MTF-T1400-D60), обеспечивающей проведения коррозионных исследований на максимальных температурах до 1300°C при атмосферном давлении. Скорость нагрева варьируется от 1 до 30°C/мин. Система откачки газов установки состоит из откачного поста Agilent TPS-Flexu 304 FS, который в свою очередь состоит из сухого спирального насоса IDP-7 (производительностью 7 м³/ч) и турбомолекулярного насоса TwisTorr 304 (производительностью 250 л/с по азоту). Также, установка снабжена анализатором остаточных газов RGA-100 для контроля газовой компоненты в зоне нагрева образцов. На рисунке 2 приведена принципиальная схема созданной установки для проведения экспериментов по высокотемпературной коррозии.

Измерение массы образцов до и после нагрева осуществлялось с помощью аналитических весов ViBRA HT-224RCE. Диапазон измерения массы составляет от 0.01 г до 220 г. Точность измерения составляет 0.0001 г.

Процедура экспериментов

Процедура коррозионных экспериментов включала следующие этапы:

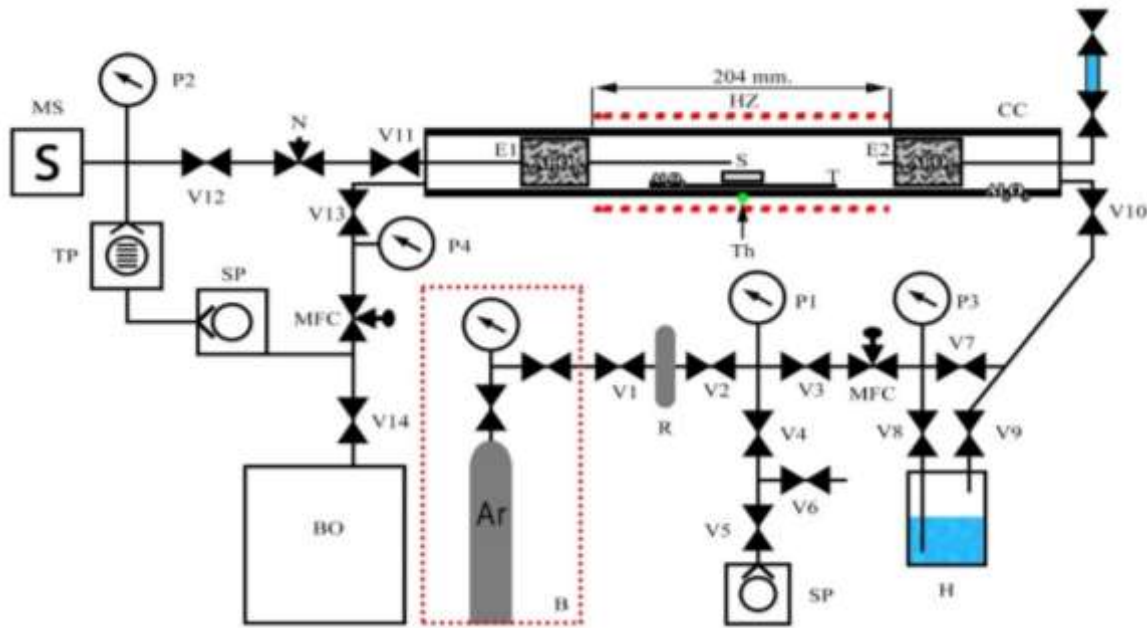
1. Фиксация исходного внешнего вида образцов (фотографирование).
2. Измерение начальной массы образцов.
3. Размещение образцов в тигле в зоне нагрева печи.
4. Организация постоянного потока аргона на уровне 0,1 л/мин с помощью регулятора расхода газа.
5. Линейный нагрев образцов со скоростью 10°C/мин до целевой температуры (600°C, 700°C, 750°C, 800°C, 850°C, 900°C).
6. Подача потока пара аргоновой газовой смеси с влажностью 90% на уровне 0,1 л/мин

(расчетное содержание водяного пара в аргоне при такой влажности составляет около 1725 ppm) по достижению очередной целевой температуры. Поддержание таких условий на протяжении 2-3 часов (эффективное время эксперимента).

7. Охлаждение образцов при естественных условиях при постоянной продувке чистым аргонem с расходом 0,1 л/мин.

8. Инспекция внешнего вида образцов и взвешивание.

Этап 5 подразумевает проведение термоциклов на каждой целевой температуре, с последующим взвешиванием и фотофиксацией образцов после каждого цикла. На рисунке 3 представлена типичная диаграмма одного цикла эксперимента, иллюстрирующая временную зависимость изменения температуры образца при продувке рабочим газом для целевой температуры 600°C.



CC – коррозионная камера, Т – тигель, Е – экраны, Th – термопара, HZ – зона нагрева печи, В – баллон аргона с редуктором, R – ресивер, N – натекатель, MFC – регулятор расхода газа, H – увлажнитель, SP – спиральный насос, BO – бак отстойник, V – вакуумные вентили

Рисунок 2 – Схема установки по высокотемпературной коррозии [14]

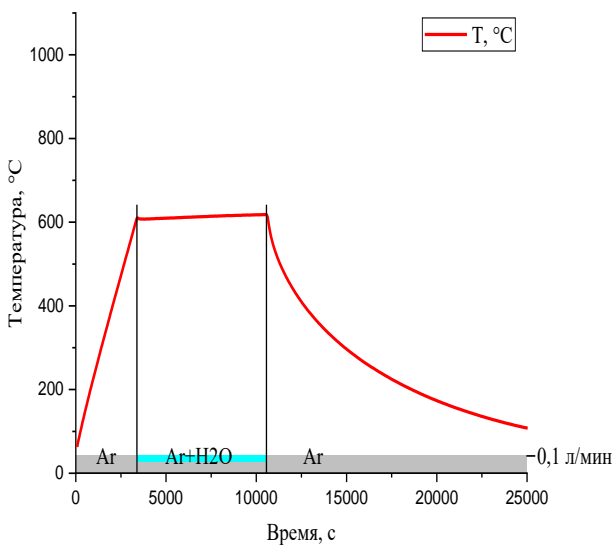


Рисунок 3 – Временная зависимость изменения температуры образца при продувке рабочим газом для целевой температуры 600°C

Результаты и обсуждение

По результатам проведенных коррозионных экспериментов с МБ при термоциклировании в паро-аргонной среде были зафиксированы изменения массы образцов после каждого термоцикла (см. таб. 2), а также визуальные изменения поверхности (см. рис. 4). Полученные данные позволяют оценить кинетические параметры коррозионных процессов и выявить зависимости скорости коррозии от температуры.

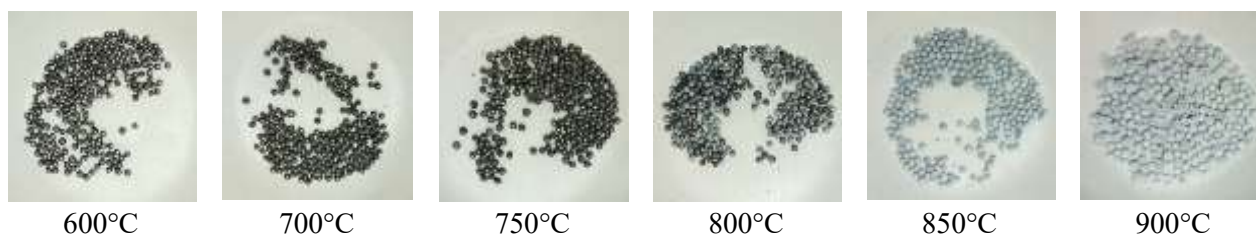
Дельта массы и дефект массы определялись следующим образом. Дельта массы (или изменение массы) образца — это разница между начальной массой образца и его массой после проведения эксперимента. Дельта массы вычислялась по формуле (1).

$$\Delta m = m_{\text{конечная}} - m_{\text{начальная}}, \quad (1)$$

где Δm – дельта массы, $m_{\text{конечная}}$ – масса образца после эксперимента, $m_{\text{начальная}}$ – масса образца перед экспериментом.

Таблица 2 – Сводная таблица результатов экспериментов для каждого цикла

Температура, °С	600	700	750	800	850	900
Эффективное время, ч	2:00	2:00	3:00	3:00	3:00	3:00
Масса МБ, г	0,2503	0,2505	0,2508	0,2518	0,2600	0,3499
Дельта массы МБ, г	0	0,0002	0,0003	0,001	0,082	0,899
Дефект массы МБ, %	0,00	0,08	0,12	0,40	3,28	35,91

**Рисунок 4** – Внешний вид образцов после каждого термоцикла

Дефект массы – это отношение дельты массы образца к исходной массе, которая была в самом начале. Дефект массы вычислялся по формуле (2).

$$Dm = \frac{\Delta m}{m_{\text{исходный}}}, \quad (2)$$

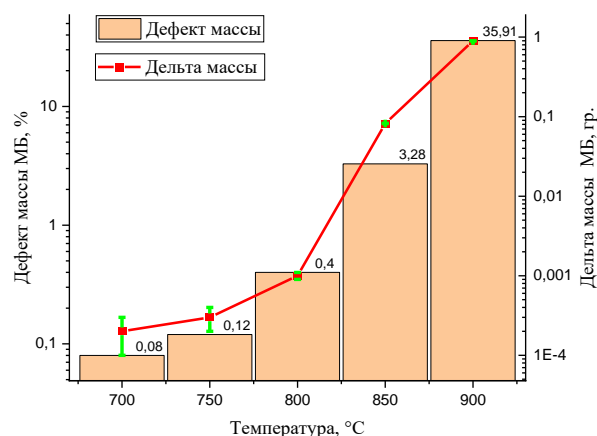
где D_m – дефект массы, Δm – измеренная дельта массы, $m_{\text{исходный}}$ – исходная масса образца.

Из проведенного эксперимента видно (см. рис. 5), что при температурах до 750°C не наблюдается активная химическая реакция воды с образцами. Это подтверждается малыми изменениями массы и видимых изменений внешнего вида образцов после нагревания и охлаждения. Однако при температурах 800°C и выше начинается активная химическая реакция, сопровождающаяся изменениями массы и видимыми изменениями поверхности образцов (см. рис. 4). Эти данные указывают на значительные вариации скорости реакции МБ с водяным паром в зависимости от температуры. Следует отметить, что оксидная пленка, образующаяся на поверхности образцов, выполняет роль диффузионного барьера подавляя химическую активность металла при более низких температурах.

Для оценки скорости взаимодействия паров воды с поверхностью образцов была применена Аррениусовская зависимость. Данное уравнение связывает температурную зависимость скорости реакции с энергией активации:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right), \quad (3)$$

где k – константа скорости реакции, k_0 – преэкспоненциальный множитель, Ea – энергия активации реакции, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

**Рисунок 5** – Сводная диаграмма изменения массы образца

Поскольку мы измеряем изменение массы образца от времени, мы можем использовать это для оценки константы скорости реакции k (см. таб. 3) используя следующее уравнение:

$$\frac{dm}{dt} = k \cdot A, \quad (4)$$

где dm/dt – скорость изменения массы, k – константа скорости коррозии, A – площадь поверхности образца. Затем, используя данные о

скорости коррозии при разных температурах, мы можем оценить энергию активации E_a и преэкспоненциальный множитель k_0 (см. рис. 6).

Таблица 3 – Результаты оценки константы скорости реакций МБ с парами воды

Температуры, °С	700	750	800	850	900
Константа скорости реакции, г/с·см ²	3,65E-09	3,65E-09	1,22E-08	9,99E-07	1,10E-05

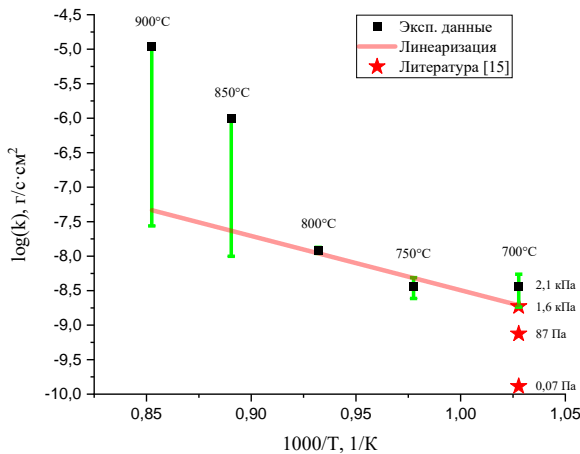


Рисунок 6 – Аррениусовская зависимость константы скорости взаимодействия паров воды с образцами

При оценке параметров Аррениусовской зависимости были учтены погрешности измерения массы (см. рис. 5) и изменения площади поверхности образца (см. рис. 4). Следовательно, полученные экспериментальные данные в диапазоне температур от 700 до 900 °С будут описываться следующим уравнением:

$$k \left[\frac{\text{г}}{\text{с} \cdot \text{см}^2} \right] = 0,23 \cdot \exp \left(- \frac{130 \text{ [Дж/моль]}}{RT} \right). \quad (5)$$

Мы сравнили константы скорости реакции (см. рис. 6), полученные в нашем исследовании, с результатами других авторов [13]. Скорость окисления бериллия в водяном паре и в смесях газов с водяным паром значительно зависит от давления, в отличие от реакций в сухих газах (таких как O₂, CO₂ и другие). Что подтверждают данные, приведенные в [13, стр. 43], демонстрируя хорошее согласование с нашими результатами для температуры 700°С.

Таким образом, скорость окисления бериллия определяется не только температурой и концентрацией окислителя, но и рядом других факторов. На неё влияют свойства оксидной пленки, которая формируется на поверхности бериллия и действует как диффузионный барьер,

подавляющий его химическую активность. Кроме того, важную роль играют условия окружающей среды, включая влажность, давление, скорость потока газа. Эти параметры необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных данных и сравнении их с результатами других исследований.

Заключение

По результатам коррозионных экспериментов с МБ при термоциклировании в паро-аргонной среде при температурах 600°С, 700°С, 750°С, 800°С, 850°С и 900°С были установлены скорости взаимодействия воды с поверхностью бериллия. Сравнение наших данных с результатами других авторов подтвердило, что различия в методиках проведения экспериментов и условиях окружающей среды, в частности давление паров воды, могут существенно влиять на скорость окисления.

Оценены кинетические параметры коррозионных процессов, такие как энергия активации $E_a = (130 \pm 6) \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ и преэкспоненциальный множитель $k_0 = (0,23 \pm 0,02) \frac{\text{г}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$. Полученные результаты демонстрируют существенное увеличение скорости коррозии при повышении температуры, что связано с развитием поверхности образцов и разрушением оксидной пленки. Полученные экспериментальные данные важны для обеспечения надежности и безопасности использования бериллия в условиях высоких температур, особенно в контексте применения в термоядерных реакторах. Исследование вносит значительный вклад в понимание коррозионного поведения бериллия при термоциклировании, предоставляя ценные данные для разработки и эксплуатации современных высокотемпературных бериллиевых композиций.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (программа №BR21881930).

Литература

- 1 Naik B.G., and Sivasubramanian N. Mineral Processing and Extractive // Metallurgy Review. – 1994. – Vol.13. – P.243–251.
- 2 Longhurst G.R., Tsuchiya K., Dorn C.H., Folkman S.L., Fronk T.H., Ishihara M., Kawamura H., Tranter T.N., Rohe R., Uchida M., and Vidal E. Managing Beryllium in Nuclear Facility Applications // Nuclear Technology. – 2011. – Vol.176. – P.430–441.
- 3 Kurosaki K., and Yamanaka S. Neutron Reflector Materials (Be, Hydrides)// Comprehensive Nuclear Materials (2nd ed.). – 2020. – Vol.7. – P.382–399.
- 4 Sakamoto Y., Tobita K., Utoh H., Asakura N., Someya Y., Hoshino K., Nakamura M., and Tokunaga S. DEMO Concept Development and Assessment of Relevant Technologies //Proceedings of 25th IAEA Fusion Energy Conference, St. Petersburg. – 2014. – P.FIP/3–4Rb.
- 5 Someya Y., Takase H., Utoh H., Tobita K., Liu C., and Asakura N. Simplification of Blanket System for SlimCS Fusion DEMO Reactor //Fusion Engineering and Design. – 2011. – Vol.86, no.9–11. – P.2269–2272.
- 6 Smolik G., Merrill B., and Wallace R. Implications of Beryllium: Steam Interactions in Fusion Reactors // Journal of Nuclear Materials. – 1992. – Vol.191-194, part A. – P.153–157.
- 7 Anderl R., Scaffidi-Argentina F., Davydov D., Pawelko R., and Smolik G. Steam Chemical Reactivity of Be Pebbles and Be Powder //Journal of Nuclear Materials. – 2000. – Vol.283-287, part 2. – P.1463–1467.
- 8 Nakamura M., Tobita K., Someya Y., Tanigawa H., Gulden W., Sakamoto Y., Araki T., Watanabe K., Matsumiya H., Ishii K., Utoh H., Takase H., Hayashi T., Satou A., Yonomoto T., Federici G., and Okano K. Study of Safety Features and Accident Scenarios in a Fusion DEMO Reactor // Fusion Engineering and Design. – 2014. – Vol.89, no. 9–10. – P.2028–2032.
- 9 Aylmore W., Gregg S.J., and Jepson W.B. The High Temperature Oxidation of Beryllium. Part IV - In Water Vapour and in Moist Oxygen //Journal of Nuclear Materials. – 1961. – Vol.3, no. 2. – P.190–200.
- 10 Federici G., Doerner R.P., Lorenzetto P., and Barabash V. Beryllium as a Plasma-Facing Material for Near-Term Fusion Devices //Comprehensive Nuclear Materials. – 2012. – Vol.4. – P.621-666.
- 11 Kupriyanov I.B., Kudryavtsev V.N., Kurbatova L.A., and Lyublinski I.E. Effect of High Temperature Corrosion in Liquid Lithium on Mechanical Properties of Beryllium //Fusion Engineering and Design. – 2010. – Vol.85, no. 7–9. –P.1702–1706.
- 12 Shaimerdenov A., Askerbekov S., Akhanov A., Kulsartov T., Sairanbayev D., and Udartsev S. Corrosion Studies of Irradiated Titanium Beryllide: Preliminary Results. //Proceedings of RRFM 2024 Conference, Warsaw, Poland. – 2024. – P.426–434.
- 13 Давыдов, Д.А., Холопова О.В., Колбасов Б.Н. Образование и деградация оксидных пленок на бериллии // ВАНТ. – 2010. – Вып. 2. – С.39-49.

References

- 1 B.G. Naik and N. Sivasubramanian, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review 13, 243–251 (1994).
- 2 G.R. Longhurst, K. Tsuchiya, C.H. Dorn, S.L. Folkman, T.H. Fronk, M. Ishihara, H. Kawamura, T.N. Tranter, R. Rohe, M. Uchida, and E. Vidal, Nuclear Technology 176, 430–441 (2011).
- 3 K. Kurosaki and S. Yamanaka, Comprehensive Nuclear Materials (2nd ed.) 7, 382–399 (2020).
- 4 Y. Sakamoto, K. Tobita, H. Utoh, N. Asakura, Y. Someya, K. Hoshino, M. Nakamura, and S. Tokunaga, Proceedings of 25th IAEA Fusion Energy Conference, St. Petersburg, P. FIP/3–4Rb (2014).
- 5 Y. Someya, H. Takase, H. Utoh, K. Tobita, C. Liu, and N. Asakura, Fusion Engineering and Design 86, 2269–2272 (2011).
- 6 G. Smolik, B. Merrill, and R. Wallace, Journal of Nuclear Materials 191-194, part A, 153–157 (1992).
- 7 R. Anderl, F. Scaffidi-Argentina, D. Davydov, R. Pawelko, and G. Smolik, Journal of Nuclear Materials 283-287, part 2, 1463–1467 (2000).
- 8 M. Nakamura, K. Tobita, Y. Someya, H. Tanigawa, W. Gulden, Y. Sakamoto, T. Araki, K. Watanabe, H. Matsumiya, K. Ishii, H. Utoh, H. Takase, T. Hayashi, A. Satou, T. Yonomoto, G. Federici, and K. Okano, Fusion Engineering and Design 89, no. 9–10, 2028–2032 (2014).
- 9 W. Aylmore, S. J. Gregg, and W. B. Jepson, Journal of Nuclear Materials 3, no. 2, 190–200 (1961).
- 10 G. Federici, R. P. Doerner, P. Lorenzetto, and V. Barabash, Comprehensive Nuclear Materials 4, 621–666 (2012).
- 11 I.B. Kupriyanov, V.N. Kudryavtsev, L.A. Kurbatova, and I.E. Lyublinski, Fusion Engineering and Design 85, no. 7–9, 1702–1706 (2010).
- 12 A. Shaimerdenov, S. Askerbekov, A. Akhanov, T. Kulsartov, D. Sairanbayev, and S. Udartsev, Proceedings of RRFM 2024 Conference, Warsaw, Poland, 426–434 (2024).
- 13 D.A. Davydov, O.V. Kholopova, and B.N. Kolbasov, VANT 2, 39–49 (2010). (In Russ.)

История статьи:

Поступила – 27.05.2024

Принята – 17.08.2024

Article history:

Received 27 May 2024

Accepted 17 August 2024

Сведения об авторах:

1. **А.М. Аханов** – Институт ядерной физики, г. Алматы, Казахстан, email: askerbekov@inp.kz

2. **Т.В. Кульсартов** – канд. физ.-мат. наук, ВНС Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан, email: tima@physics.kz

3. **Б.Б. Шакиров** – Институт ядерной физики, г. Алматы, Казахстан, email: b.shakirov@inp.kz

4. **Ж.А. Заурбекова** (автор-корреспондент) – PhD, Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан, email: zzha@physics.kz

Information about authors:

1. **A.M. Akhanov** – The Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan, email: askerbekov@inp.kz

2. **T.V. Kulsartov** – Cand. Phys. Math. Sci, Leading Researcher, Institute of Experimental and Theoretical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, email: tima@physics.kz

3. **B.B. Shakirov** – The Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan, email: b.shakirov@inp.kz

4. **Zh.A. Zaurbekova** (corresponding author) – PhD Institute of Experimental and Theoretical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. email: zzha@physics.kz