

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-47-54>

УДК 669.018.258.3:539.26:536.42

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ И СКОРОСТИ НАГРЕВА НА ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО БЕРИЛЛИЯ В ПАРО-АРГОННОЙ СРЕДЕ МЕТОДОМ ТГА

С. К. Әскербеков¹, Ж. Т. Бугыбай^{1*}, Т. В. Кульсартов^{2,3}, Ж. А. Заурбекова^{2,3},
А. М. Аханов¹, М. Т. Айткулов¹, А. Б. Елишенков², А. А. Шаймерденов¹

¹ РГП «Институт ядерной физики» Агентства РК по атомной энергии, Алматы, Казахстан

² Институт экспериментальной и теоретической физики, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

³ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: zh.bugybay@inp.kz

В настоящей работе исследовано поведение металлического бериллия при высокотемпературной коррозии в условиях термоциклирования в водяной паро-аргонной атмосфере методом термогравиметрического и дифференциального сканирующего калориметрического анализа (TGA/DSC). Эксперименты проводились при трёх скоростях нагрева (10, 20 и 30 К/мин), включающих по два термоцикла (C1 и C2). Окисление оценивалось по приросту массы и тепловым эффектам, а кинетические параметры (E_a , K_0) определялись из логарифмических зависимостей Аррениуса с нормировкой на поверхность и парциальное давление водяного пара. Установлены две характерные температурные области – начальной термоактивации (775–1050 К) и высокотемпературная (975–1170 К), а также переходная зона между ними. Для высокотемпературной области получены значения энергии активации $E_a = 146$ кДж/моль и предэкспоненциального множителя $K_0 = 2,41 \cdot 10^{-1}$ мг/(с·см²·Па). Полученные результаты углубляют понимание механизмов окисления бериллия при термоциклировании и могут быть использованы для оценки безопасности в термоядерных установках.

Ключевые слова: металлический бериллий, термоциклирование, термогравиметрический анализ (TGA), дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC), паро-аргонная среда.

ВВЕДЕНИЕ

Бериллий (Be) обладает рядом уникальных физико-механических свойств: высоким модулем упругости, высокой прочностью, относительно низкой плотностью, большой удельной теплоемкостью, высокой теплопроводностью, низким сечением захвата тепловых нейтронов ($9 \cdot 10^{-27}$ см²), высоким коэффициентом рассеяния нейтронов и умеренной радиационной стойкостью. Благодаря этим характеристикам бериллий находит широкое применения в атомной, аэрокосмической и автомобильной промышленности. В ядерных реакторах бериллий может использоваться в качестве замедлителя и отражателя нейтронов [1, 2]. Кроме того, бериллий рассматривается в качестве одного из перспективных материалов для первой стенки термоядерных реакторов, таких как ITER [3–6]. Однако ряд недостатков бериллия и его соединений ограничивает возможность его применения. К основным недостаткам можно отнести высокую химическую активность, что приводит к коррозии материалов при контакте с различными газами, жидкостями и твердыми средами, особенно при высоких температурах, а также радиационное набухание при высоких дозах нейтронного облучения. Если радиационная стойкость бериллия востребована и характерна для не такого широкого его применения, то коррозионная стойкость охватывает более широкое применение бериллия. Исходя из этого, исследования, направленные на объяснение процессов и механизмов коррозии бериллия при взаимодействии с различными составами газов, являются востребован-

ными и позволяют внести вклад в повышении его ресурса и конструкционной надежности.

С 1960-х годов ученые по всему миру начали проводить обширные исследования в этой области. На ранних этапах некоторые исследователи в основном изучали окислительное поведение Be с помощью оптической микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, термогравиметрического анализа и других средств и методик. Они считали, что при более низких температурах на поверхности Be образуется защитный оксидный слой, а его пассивирующая способность уступает только таковой у металлов Al, Ti и Cr, но при более высоких температурах Be подвергается сильному окислению [7, 8]. Например, в работе [9] представлены результаты о начальном механизме взаимодействия Be с O₂ и водяным паром в условиях повышения температуры. Предположено, что в диапазоне температур ~310–790 К первоначальный механизм окисления Be, вызванный взаимодействием с O₂ и парами воды, представляет собой зарождение и рост оксидных островков на поверхности материала. При этом в литературе также отмечаются процессы рекристаллизации бериллия при высокотемпературных воздействиях [10], а также особенности формирования и деградации оксидных плёнок [11].

Большинство исследований сосредоточено на термическом окислительном поведении Be и его начальном окислительном поведении в определенных условиях, в то время как исследований его окислительных характеристик относительно мало. В нашей

предыдущей работе была проведена оценка коррозионной стойкости Be при термоциклировании в паро-аргонной среде при различных температурах, с определением кинетических параметров окисления и выявлением влияния температуры на развитие оксидного слоя [12]. Однако для более детального изучения начальных стадий окисления и уточнения кинетики формирования реакционного слоя при различных режимах термоциклирования в настоящем исследовании дополнительно применены методы термогравиметрического (TGA) и дифференциального сканирующего калориметрического (DSC) анализа. Использование этих методов позволяет получить более полную информацию о массообменных и тепловых эффектах, происходящих в процессе окисления, а также оценить влияние скорости нагрева на кинетические параметры коррозии бериллия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В качестве исследуемых образцов использовались пэбблы металлического бериллия сферической формы с номинальным диаметром $(1,0 \pm 0,2)$ мм и массовой долей бериллия не менее 99%. Всего для исследования было отобрано три партии пэбблов, основные характеристики которых приведены в таблице 1.

Фиксация внешнего вида образцов до и после термообработки осуществлялась с использованием цифровой камеры Canon EOS с объективом Canon EF 100 mm f/2,8L Macro IS USM, обеспечивающим высокую детализацию макросъёмки. Масса образцов измерялась с применением лабораторных электронных весов VIBRA HT-224RCE, обладающих разрешающей способностью 0,0001 г. Данные веса относятся к классу точности «Особый (I)» согласно межгосударственному стандарту OIML R 76-1-2011, что обеспечивает высокую надёжность и повторяемость результатов масс-измерений.

Для точного определения удельной площади поверхности пэбблов была использована программа ImageJ [13], с помощью которой по микрофотографиям определялись реальные геометрические размеры частиц и их разброс. Расчётная площадь согласуется с данными по массе, числу частиц и плотности материала ($\rho = 1,85 \text{ г/см}^3$), а также позволила количественно оценить погрешности, обусловленные вариацией размеров.

Такой подход оказался более надёжным по сравнению с использованием паспортного диаметра, поскольку разброс до $\pm 20\%$ по диаметру мог бы привести к ошибке порядка $\pm 40\%$ в расчётах площади. Корректная оценка площади поверхности критичес-

ки важна для точной нормировки кинетических данных по коррозии.

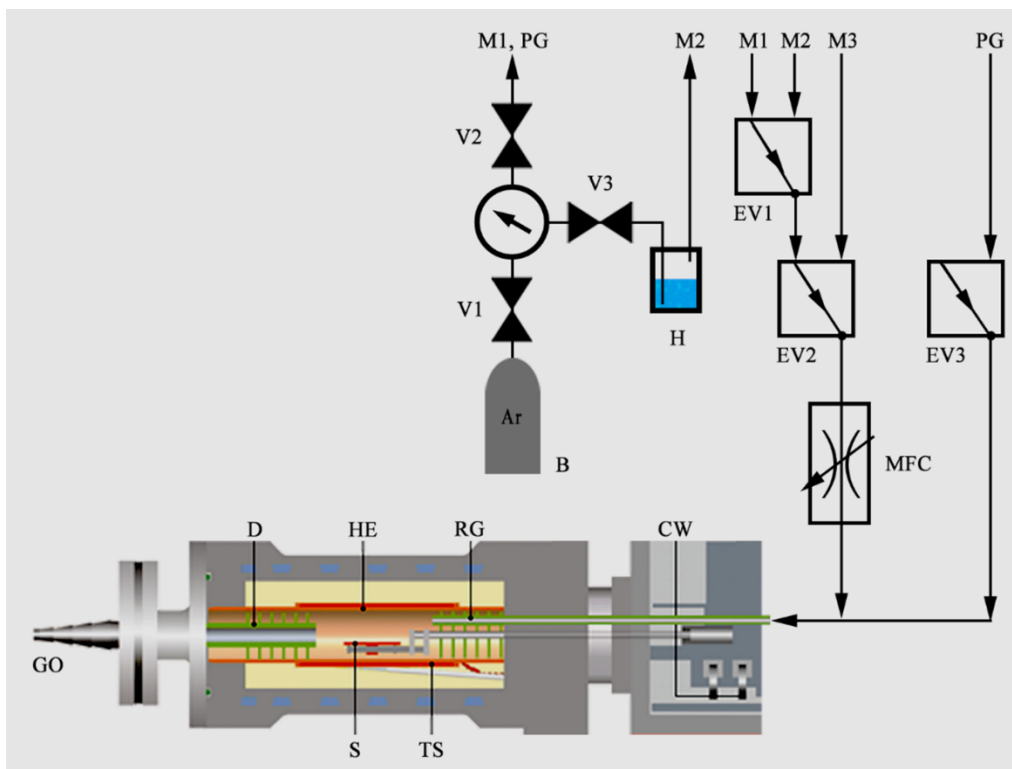
Таблица 1. Основные характеристики исследуемых образцов

Партия	Кол-во, шт.	Масса, мг	Общая площадь поверхности, см ²
1	89	$88,1 \pm 0,1$	$2,82 \pm 0,025$
2	84	$92,3 \pm 0,2$	$2,90 \pm 0,032$
3	84	$87,1 \pm 0,1$	$2,77 \pm 0,013$

Описание метода и экспериментальной установки

Коррозионные эксперименты проводились с использованием синхронного термоаналитического комплекса TGA/DSC 3+ (Mettler Toledo), обладающего высокой чувствительностью по массе ($\pm 0,1 \text{ мкг}$) и тепловому потоку. Перед проведением экспериментов проводилась калибровка весов с использованием эталонных калибровочных гирь, а также калибровка DSC по температуре и тепловому отклику с применением стандартных материалов (индий, цинк, алюминий, золото, палладий).

Сущность метода заключалась в регистрации изменения массы образца при линейном нагреве в контролируемой газовой атмосфере. Эксперимент проводился в условиях программируемого термоциклирования с различными скоростями нагрева ($\beta = 10, 20$ и 30 К/мин). Выбранные скорости нагрева соответствуют стандартному диапазону кинетических TGA-исследований и позволяют проследить различие между поверхностно-ограниченными и диффузионно-контролируемыми режимами. Кроме того, такие значения могут рассматриваться как модельные для быстрых термопереходов, характерных для эксплуатационных и аварийных сценариев, сохраняя при этом корректность температурной однородности образца. На рисунке 1 представлена принципиальная схема установки на базе TGA-DSC 3+. Исходный инертный газ – аргон высокой чистоты (99,9999%, баллон В) – увлажнялся до относительной влажности 95% (парциальное давление $\sim 2100 \text{ Па}$) в увлажнителе (Н), эффективность которого и воспроизводимость режима ранее были подтверждены экспериментально [14]. Применяемая газовая схема позволяла гибко управлять составом реакционной среды, расходом газа и температурным режимом, обеспечивая воспроизводимость условий проведения коррозионных испытаний. Установка обеспечивала стабильную подачу влажного аргона в зону реакции и одновременно регистрировала изменение массы образца с высокой чувствительностью.



В – баллон с аргоном; Н – увлажнитель; V1–V3, EV1–EV3 – запорные и управляющие клапаны; M1–M3 – подключение газовых линий (направления потоков); PG – линия подачи газа продувки; RG – ввод реакционного газа, D – дефлектор, MFC – регулятор массового расхода газа; HE – нагревательный элемент; TS – датчик температуры печи (термопара); S – держатель образца; GO – вывод газа; CW – калибровочные гири

Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Образцы загружались в тигель объемом 900 мкл одним равномерным слоем, обеспечивающим максимальный контакт с реакционной атмосферой при минимальном перекрытии поверхности пэбблов. Такой способ укладки позволял сохранить однородность условий коррозии и обеспечить корректную термогравиметрическую регистрацию массы.

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 паро-аргона на уровне 50 мл/мин.
- 5) Линейный нагрев образцов со скоростью 10 К/мин до температуры стабилизации 373 К далее изотермическая выдержка в течении 60 мин.
- 6) Линейный нагрев со скоростью 10/20/30 К/мин до целевой температуры 1173 К, далее изотермическая выдержка в течение 5 мин.
- 7) Охлаждение образцов со скоростью 40 К/мин при постоянной продувке паро-аргоном с расходом 50 мл/мин.

8) Инспекция внешнего вида образцов и взвешивание.

9) Фиксация внешнего вида образцов (фотографирование).

Всего было проведено девять экспериментов, включая контрольный (бланковый), с выполнением двух термоциклов (C1 и C2) для каждой из трёх партий пэбблов (таблица 2).

Таблица 2. Порядок и объем работ

Партия	Тип экспериментов	Бланк	C1	C2
1	10 К/мин	1	2	3
2	20 К/мин	4	5	6
3	30 К/мин	7	8	9

Все представленные экспериментальные результаты получены с учётом бланкового сигнала, что позволяет исключить вклад посторонних факторов и сконцентрироваться на чистом эффекте взаимодействия водяного пара с образцами металлического бериллия. Полученные бланковые кривые продемонстрировали хорошую воспроизводимость, что подтверждает надёжность применённой методики. Разработанный подход может быть эффективно использован для последующего анализа новых материалов, включая бериллиды, в рамках текущих и планируемых проектов исследовательской группы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ И СКОРОСТИ НАГРЕВА НА ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО БЕРИЛЛИЯ В ПАРО-АРГОННОЙ СРЕДЕ МЕТОДОМ ТГА

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Макроскопические изменения внешнего вида пэбблов после термообработки при различных скоростях нагрева представлены в таблице 3. В данной серии экспериментов толщина оксидного слоя в пэбблах специально не оценивалась. Основным параметром взаимодействия служил прирост массы, так как методологически работа была ориентирована на неразрушающий анализ и последовательные циклы на одних и тех же образцах. Расчётные или прямые измерения толщины оксида будут предметом отдельных исследований с использованием микроскопии поперечных сечений.

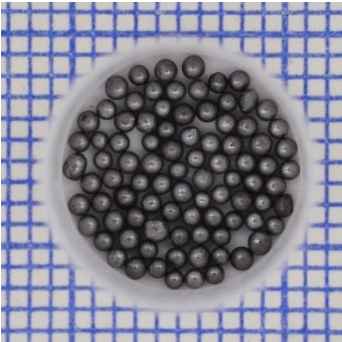
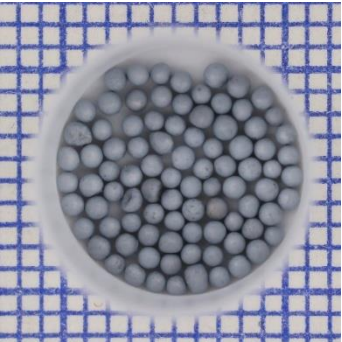
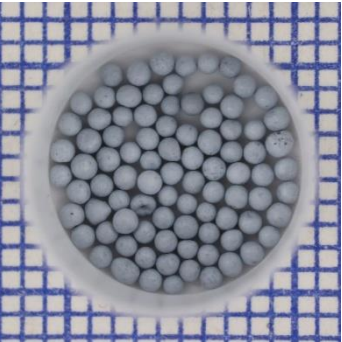




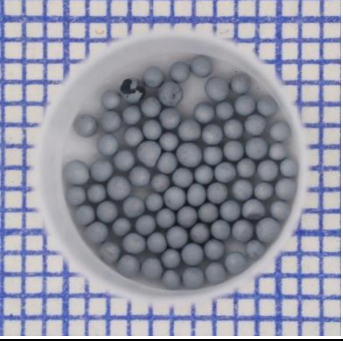
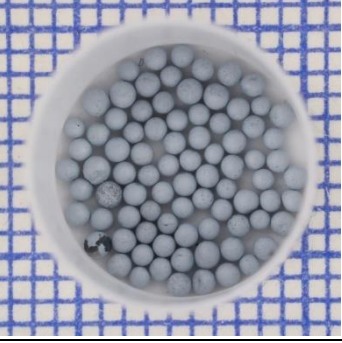
В исходном состоянии пэбблы металлического бериллия имеют равномерную тёмно-серую металлическую поверхность с характерным блеском, типичным для чистого металла. Отдельные образцы демонстрируют матовые участки, предположительно связанные с локальным отшелушиванием поверхностного слоя или начальной стадией окисления при хранении.

После термообработки до стадии С1 во всех сериях наблюдается изменение цвета поверхности на светло-серый. Это свидетельствует о формировании оксидной плёнки. Данный эффект прослеживается при всех исследованных скоростях нагрева.

После прохождения стадии С2, поверхность становится ещё более светлой и равномерно матовой. Это указывает на утолщение оксидного слоя. При более высоких скоростях нагрева визуальные отличия между стадиями С1 и С2 становятся более выраженными, вероятно из-за интенсивности прогрева и быстрого изменения реакционных условий.

Следует отметить, что в некоторых партиях образцов наблюдались различия в окраске между отдельными зонами одного тигля, что может быть обусловлено их случайным переворачиванием при переносе между этапами характеристики. Это может косвенно указывать на влияние ориентации пэбблов в тигле на характер оксидирования, особенно при наличии градиентов температуры или паровой концентрации в реакционной зоне.

Таблица 3. Макроскопические изменения образцов при термообработке с разной скоростью нагрева

β	Исходный вид	После С1	После С2
10 К/мин			
20 К/мин			
30 К/мин			

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ И СКОРОСТИ НАГРЕВА НА ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО БЕРИЛЛИЯ В ПАРО-АРГОННОЙ СРЕДЕ МЕТОДОМ ТГА

Данные, представленные в таблице 4, показывают, что с увеличением скорости нагрева суммарный прирост массы образцов последовательно снижается. Это связано с тем, что при более высоких скоростях времени на протекание реакции между бериллием и паром недостаточно.

Таблица 4. Дефект массы образцов после каждого цикла

β , К/мин	После C1		После C2	
	$\Delta m_{\max C1}$, мг	$\Delta m_{\max C1}/m_0$, %	$\Delta m_{\max C2}$, мг	$\Delta m_{\max C2} /$ $(m_0 + \Delta m_{\max C1})$, %
10	$0,183 \pm 0,010$	$0,21 \pm 0,01$	$0,211 \pm 0,012$	$0,24 \pm 0,01$
20	$0,098 \pm 0,006$	$0,11 \pm 0,01$	$0,111 \pm 0,007$	$0,12 \pm 0,01$
30	$0,070 \pm 0,005$	$0,08 \pm 0,01$	$0,084 \pm 0,006$	$0,10 \pm 0,01$

Несмотря на то, что после C1 поверхность образцов уже существенно изменяется – наблюдается развитие оксидного слоя, – C2 демонстрирует сходную динамику массонарастания, что позволяет заключить: изменение морфологии поверхности после C1

не оказывает существенного влияния на механизмы дальнейшего окисления.

Таким образом, оба термоцикла вносят сопоставимый вклад в коррозионный процесс, а влияние скорости нагрева проявляется преимущественно через кинетические ограничения реакции.

На рисунке 2 представлены результаты TGA и DSC анализа, выполненного согласно процедуре эксперимента, отдельно по стадиям C1 и C2, а также в виде сводных зависимостей изменения скорости коррозии (da/dt) от температуры. Кривые DSC в настоящей работе использовались в качестве качественного индикатора термоактивации и общих тенденций, без количественного расчёта энтальпий. Такой выбор объясняется наложением нескольких параллельных процессов и нестабильностью базовой линии в увлажнённой атмосфере, в то время как основной акцент был сделан на TGA-данных, обладающих большей воспроизводимостью.

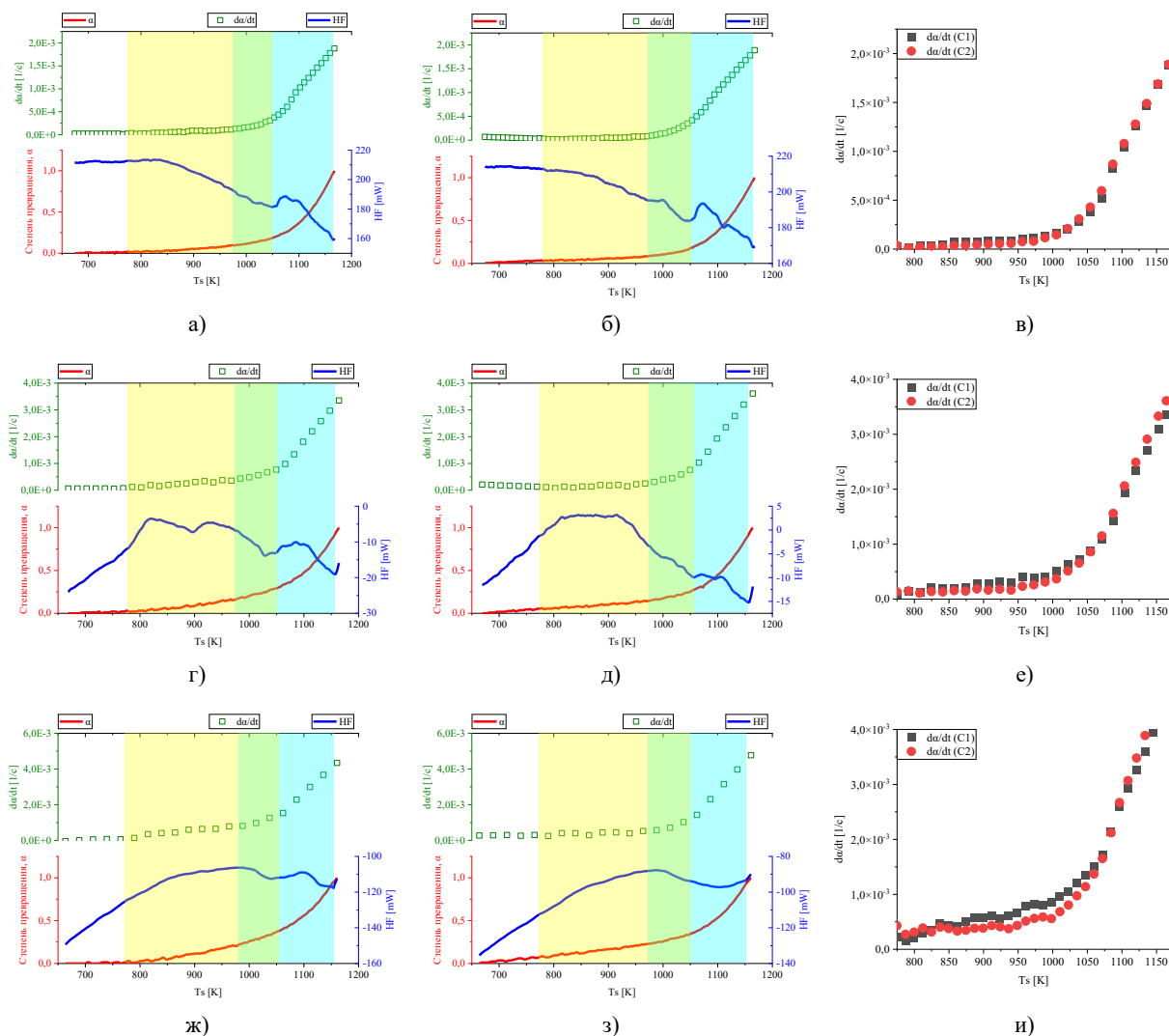


Рисунок 2. Результаты TGA/DSC-анализа на стадиях (10, 20, 30 К/мин) и суммарно при разных β : (а, г, ж) – C1, (б, д, з) – C2, (в, е, и) – сводные данные по da/dt

Кроме того, корректная квантификация DSC-пигов обычно требует экспериментов с одним пэбблом, тогда как для повышения качества TGA-кривых в данной серии использовался набор пэбблов.

С увеличением скорости нагрева тепловые эффекты, зарегистрированные по данным DSC, становятся всё более отрицательными, что свидетельствует о выраженной экзотермической природе реакции уже на ранних стадиях. Это может указывать на смещение основного теплового пика к более низким температурам и ускорение окислительных процессов при более интенсивном нагреве.

Одновременно прирост массы становится заметным уже в низкотемпературной области, особенно при $\beta = 30$ К/мин, что также подтверждает более ранний запуск реакции и уменьшение температурного запаздывания. В отличие от этого, при $\beta = 10$ К/мин массонакопление начинается позже, что связано с более плавным прогревом и постепенным развитием оксидного слоя.

Сводные данные на рисунке 2 (в, е, и) демонстрируют, что, несмотря на различия в деталях термограмм и интенсивности протекающих процессов, основные механизмы взаимодействия металлического бериллия с водяным паром сохраняются на обеих термоциклических стадиях (C1 и C2). Это обоснованно позволяет рассматривать их в рамках объединённого кинетического анализа, что, в свою очередь, способствует снижению методических погрешностей и повышению надёжности полученных параметров. Данный вывод также подтверждается согласованностью с данными по массовому приросту, представленными в таблице 4.

Таким образом, температурный диапазон реакции условно можно разделить на три характерные зоны:

1) Область начальной термоактивации (НТ) (от 775 до 1050 К, выделена жёлтым) – характеризуется медленной скоростью окисления и формированием первичного оксидного слоя.

2) Переходная область (от ~950 до 1070 К, зелёная) – представляет собой интервал, в котором происходит наложение двух режимов окисления. Здесь наблюдаются резкие изменения как в тепловых эффектах, так и в темпах прироста массы.

3) Высокотемпературная область (ВТ) (от 975 до 1170 К, выделена синим) – в этом диапазоне реакции становятся интенсивными и хорошо воспроизводимыми.

Подтверждение характера этих изменений требует дополнительных структурных и фазовых исследований; в дальнейших планах предусмотрено проведение отдельных серий экспериментов для НТ- и ВТ-зон с применением микроструктурного анализа.

Кинетический анализ

Для описания скорости высокотемпературной коррозии металлического бериллия в атмосфере водяного пара применён подход, основанный на уравнении Аррениуса в логарифмической форме:

$$\log K = \log \left(\frac{m_{\max} - m_0}{S \cdot P} \cdot \frac{da}{dt} \right) = \log K_0 - \frac{Ea}{2,303 \cdot R \cdot T}$$

где: da/dt – скорость превращения (1/с); a – степень превращения: $a = (m(t) - m_0)/(m_{\max} - m_0)$; S – площадь поверхности образцов (см²); P – давление водяного пара (Па); K_0 – предэкспоненциальный множитель (мг/(с·см²·Па)); Ea – энергия активации (кДж/моль); R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/моль·К); T – температура (К).

Для расчёта кинетических параметров использованы значения $\log K$ и $1000/T$, полученные из TGA-данных при трёх различных скоростях нагрева. Расчёты проводились по объединённым и усреднённым значениям для двух термоциклов (C1 и C2).

Аппроксимация линейных участков графиков $\log K$ и $1000/T$ позволила определить значения Ea и K_0 по угловому коэффициенту и пересечению прямой с осью ординат соответственно. Расчёты нормированы на поверхность и давление, что обеспечивает корректное сравнение между экспериментами.

Полученные значения кинетических параметров представлены в таблицах выше и использовались для сравнительного анализа влияния температурных режимов (скоростей нагрева) на реакционную способность металлического бериллия в паро-аргонной атмосфере.

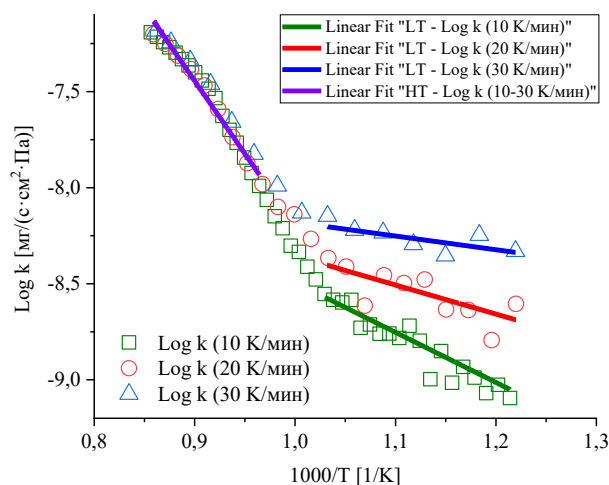


Рисунок 3. Зависимость $\log K$ от $1/T$ для расчёта Ea и K_0

Полученные кинетические параметры показывают качественное разделение двух температурных режимов процесса коррозии:

1) В ВТ области значения энергии активации ($Ea = 146$ кДж/моль) и предэкспоненциального множителя ($K_0 = 0,241$ мг/(с·см²·Па)) находятся в хорошем согласии с предыдущими экспериментами, выполненными в схожей температурной области. Расхождения находятся в пределах ожидаемой экспериментальной ошибки, что подтверждает воспроизводимость данных и достоверность модели.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ И СКОРОСТИ НАГРЕВА НА ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО БЕРИЛЛИЯ В ПАРО-АРГОННОЙ СРЕДЕ МЕТОДОМ ТГА

Таблица 5. Сравнение кинетических параметров в НТ и ВТ областях

Этапы	ВТ (объединённые)		НТ (по скоростям)		
	10–30 К/мин	Литература [12]	10 К/мин	20 К/мин	30 К/мин
K_0 , мг/(с · см ² · Па)	$(2,41 \pm 0,48) \cdot 10^{-1}$	$2,30 \cdot 10^{-1}$	$(1,30 \pm 0,26) \cdot 10^{-6}$	$(1,44 \pm 0,29) \cdot 10^{-7}$	$(3,42 \pm 0,68) \cdot 10^{-8}$
E_a , кДж/моль	146 ± 15	130	50 ± 5	29 ± 3	14 ± 1

2) В НТ области наблюдается значительное снижение как E_a , так и K_0 , причём с заметной зависимостью от скорости нагрева. Это отражает более сложные механизмы и возможное влияние диффузионных ограничений или образования защитной оксидной плёнки на ранних стадиях.

Таким образом, можно утверждать, что высокотемпературный режим стабилен и хорошо воспроизводим, тогда как низкотемпературный процесс требует более детального анализа с учётом начальных стадий формирования оксидной фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе настоящего исследования была проведена оценка коррозионной стойкости металлического бериллия при термоциклическом воздействии в водяной паро-аргонной среде с использованием термogravиметрического и калориметрического анализа. Методически были реализованы два последовательно повторяемых термоцикла (C1 и C2) при различных скоростях нагрева (10, 20 и 30 К/мин), что позволило изучить как начальные стадии окисления, так и развитие реакционного слоя. На основании аппроксимации логарифмических зависимостей константы скорости от температуры в координатах Аррениуса были определены кинетические параметры двух характерных температурных диапазонов: НТ и ВТ областей. Установлено, что в области ВТ параметры хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований, а различия в НТ зоне обусловлены повышенной чувствительностью ранних стадий окисления к экспериментальным условиям. Разделение температурного интервала на характерные зоны (НТ, ВТ, переходная) позволяет более точно описывать процессы окисления бериллия и формировать базу для верификации моделей коррозии в условиях аварийной эксплуатации.

Финансирование

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. BR24993119 «Характеризация перспективных материалов бланкета термоядерного реактора»).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Nakamichi M. [et. al.]. Beryllium and its Alloys as Neutron Multiplying Materials // Elsevier, 2020. – P. 203–250.
2. Chandler D. [et. al.]. Nuclear Transmutations in HFIR's Beryllium Reflector and Their Impact on Reactor Operation and Reflector Disposal // Nuclear Technology, 2012. – Vol. 177, No. 3. – P. 395–412.
3. Federici G. [et. al.]. Beryllium as a Plasma-Facing Material for Near-Term Fusion Devices // Elsevier, 2012. – P. 621–666.
4. Longhurst G. R. [et. al.]. Managing Beryllium in Nuclear Facility Applications // Nuclear Technology, 2011. – Vol. 176, No. 3. – P. 430–441.
5. Kurosaki K. [et. al.]. Neutron Reflector Materials (Be, Hydrides) // Elsevier, 2020. – P. 382–399.
6. Smolik G. [et. al.]. Implications of Beryllium: Steam Interactions in Fusion Reactors // Journal of Nuclear Materials, 1992. – P. 153–157.
7. Gulbransen E. A. [et. al.]. The kinetics of the reactions of beryllium with oxygen and nitrogen and the effect of oxide and nitride films on its vapor pressure // Journal of the Electrochemical Society, 1950. – Vol. 11, No. 97. – P. 383–395.
8. Jepson W B. [et. al.]. The high temperature oxidation of beryllium and the fate of beryllium carbide inclusions // Journal of Nuclear Materials, 1963. – Vol. 2, No. 10. – P. 127–133.
9. Zalkind S. [et. al.]. The initial interactions of beryllium with Oz and H2O vapor at elevated temperatures // Surface Science, 2007. – Vol. 5, No. 601. – P. 1326–1332.
10. Papirov I.I. [et. al.] Recrystallization of beryllium // Bulletin of Kharkiv National University. Ser. Physics, 2010. – Vol. 808, Issue 2. –P. 11–24.
11. Davydov D.A. [et. al.] Formation and degradation of oxide films on beryllium // Problems of Atomic Science and Technology. Series Thermonuclear Fusion, 2010. – Vol. 33, Issue 2. – P. 39–49.
12. Akhanov A. [et. al.] Study of corrosion resistance of metal beryllium during thermocycling in vapour-argon conditions // Recent Contributions to Physics, 2024. – Vol. 90(3). – P. 57–63.
13. Schneider C. A. [et. al.]. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis // Nature Methods, 2012. – Vol. 9, No. 7. – P. 671–675.
14. Kulsartov T. [et al.]. Comparative analysis of high-temperature corrosion processes of beryllides of different compositions // Fusion Engineering and Design, 2025. – Vol. 219. – P. 115283.

ТГА ӘДІСІМЕН БУ-АРГОН ОРТАСЫНДАҒЫ МЕТАЛЛ БЕРИЛЛИЙДІҢ ӘРЕКЕТІНЕ
ТЕРМОЦИКЛДЕУ МЕН ҚЫЗДЫРУ ЖЫЛДАМДЫҒЫНЫҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

С. Қ. Әскербеков¹, Ж. Т. Бұғыбай^{1*}, Т. В. Кульсартов^{2,3}, Ж. А. Заурбекова^{2,3},
А. М. Аханов¹, М. Т. Айтқұлов¹, А. Б. Елишенков², А. А. Шаймерденов¹

¹ ҚР Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

² Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Эксперименттік және теориялық физика институты, Алматы, Қазақстан

³ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: zh.bugybay@inp.kz

Бұл жұмыста термогравиметриялық және дифференциалды сканерлеу калориметриялық талдау (TGA/DSC) әдісімен су бу-аргон атмосферасында термоциклдеу жағдайында жоғары температуралы коррозиядағы металл бериллийдің әрекеті зерттелді. Тәжірибелер екі жылу циклін (C1 және C2) қамтитын үш қыздыру жылдамдығында (10, 20 және 30 К/мин) жүргізілді. Тотығу массаның өсуі мен жылу әсерімен бағаланды, ал кинетикалық параметрлер (E_a , K_0) аррениустың логарифмдік тәуелділіктерінен су буының беткі қабаты мен парциалды қысымымен анықталды. Температураның екі мәніне тән аймағы белгіленді: бастапқы термоактивация (775–1050 К) және жоғары температура (975–1170 К), сондай-ақ олардың арасындағы өтпелі аймақ. Жоғары температура аймағы үшін активтену энергиясының мәндері $E_a = 146$ кДж/моль және экспоненциалды фактор $K_0 = 2,41 \cdot 10^{-1}$ мг/(с·см²·Па) алынды.

Түйін сөздер: металл бериллий, термиялық цикл, термогравиметриялық талдау (TGA), дифференциалды сканерлеу калориметриясы (DSC), бу-аргон ортасы.

STUDY OF THE EFFECT OF THERMAL CYCLING AND HEATING RATE ON THE BEHAVIOR
OF METALLIC BERYLLIUM IN A VAPOR-ARGON ENVIRONMENT BY THE TGA METHOD

S. K. Askerbekov¹, Zh. T. Bugybay^{1*}, T. V. Kulsartov^{2,3}, Zh. A. Zaurbekova^{2,3},
A. M. Akhanov¹, M. T. Aitkulov¹, A. B. Yelishenkov², A. A. Shaimerdenov¹

¹ RSE “Institute of Nuclear Physics” of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan

² Institute of Experimental and Theoretical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

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

* E-mail for contacts: zh.bugybay@inp.kz

This study investigates the behaviour of metallic beryllium under high-temperature corrosion in a water-steam-argon atmosphere under thermal cycling conditions using thermogravimetric and differential scanning calorimetric analysis (TGA/DSC). The experiments were conducted at three heating rates (10, 20, and 30 K/min), each including two thermal cycles (C1 and C2). Oxidation was evaluated by mass gain and thermal effects, and kinetic parameters (E_a , K_0) were determined from logarithmic Arrhenius dependencies with normalisation to surface area and partial water vapour pressure. Two characteristic temperature ranges were established: initial thermal activation (775–1050 K) and high temperature (975–1170 K), as well as a transition zone between them. For the high-temperature region, the activation energy $E_a = 146$ kJ/mol and the pre-exponential factor $K_0 = 2.41 \cdot 10^{-1}$ mg/(s·cm²·Pa) were obtained. The results obtained deepen the understanding of the mechanisms of beryllium oxidation during thermal cycling and can be used to assess safety in nuclear fusion installations.

Keywords: metallic beryllium, thermal cycling, thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), vapor-argon environment.