

Ж 53
А92

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР



Ежемесячный журнал
ГОД ИЗДАНИЯ ДВЕНАДЦАТЫЙ

АТОМИЗДАТ ■ МОСКВА ■ 1968

Том 24 ■ Май ■ Вып. 5

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН, Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора), А. К. КРАСИН, А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор), П. Н. ПАЛЕЙ, Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМЕРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО.

СОДЕРЖАНИЕ

СТАТЬИ

В. И. Баранов. Развитие радиогеологии в СССР . . .	419
Я. Богач, П. Квитнер, Э. Сабо. Определение некоторых примесей в кремнии высокой чистоты методом активационного анализа без разрушения образцов	421
Я. Божик, Е. Кубовский, С. Лятэк. Измерение материального параметра критической сборки «Анна»	425
Н. Г. Баданина, Ю. П. Сайков. Критерий сравнения состояния твэлов активной зоны реактора	429
Ю. В. Чухкин, Е. Ф. Давыдов, В. Н. Сюзёв, Т. М. Гусева, В. В. Колесов, М. Д. Дерибизов. Радиационная стойкость пластинчатых твэлов реактора СМ-2	432
Б. Г. Егнзаров, В. А. Зюбка, А. И. Новиков. Выбор оптимальной аналитической методики при инструментальном активационном анализе	435
В. И. Субботин, Д. М. Овечкин, Д. Н. Сорокин, А. П. Кудрявцев. Теплоотдача при кипении натрия в условиях свободной конвекции	437
В. П. Бобков, М. Х. Ибрагимов, В. И. Субботин. Расчет коэффициента турбулентного переноса тепла при течении жидкости в трубе	442
В. Я. Кудяков, М. В. Смирнов, Н. Я. Чукреев, Ю. В. Поеохин. Образование двухвалентного тория в среде расплавленного хлористого калия	448
Н. М. Зуева, Л. С. Соловьев. Равновесие и устойчивость плазмы в аксиально симметричных тороидальных системах	453

ПЕРСОНАЛИЯ

Исаак Константинович Кизкин (к 60-летию со дня рождения) 460

АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

Н. Е. Брежнева, Ю. И. Капшанинов, С. Н. Озипранер. Изучение кинетики электролитического выделения гидроокисных осадков редкоземельных элементов

А. С. Тшечкин. Вычислительное устройство для обработки γ -спектров	462
В. Е. Дроздов, Ю. С. Рябухин. К расчету мощностей поглощенных доз полоого цилиндрического облучателя с неравномерным распределением активности	463
М. Задубан, Л. Медвидь. Определение суммарной β -активности долгоживущих продуктов деления при помощи K^{40}	464
Г. П. Березина, Я. Б. Файнберг, А. К. Березин. Экспериментальное исследование потоков быстрых ионов, образующихся в системе пучок — плазма	465

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

М. А. Сарычев, Ю. Н. Алексенко, Н. В. Звонков, В. И. Буйницкая, И. В. Рогожкин, А. А. Баташов, Ю. В. Александров. Распределение потока тепловых нейтронов в различных отражателях с каналами	467
Т. М. Гусева, Е. Ф. Давыдов, В. Н. Сюзёв, Ю. В. Чухкин. О возможном характере изменения объема тепловыделяющих композиций при твердом распухании	469
Е. М. Лобанов, Н. В. Зиновьев. Определение необходимой статистики при бескорреляционной расшифровке данных активационного анализа	471
С. Н. Вотинин, Т. М. Гусева, В. И. Клименков. О радиационной стойкости сплава циркония с 1% ниобия в условиях работы реактора СМ-2	473
А. Э. Шеми-заде. О сухих выпадениях продуктов ядерных испытаний	474
К. П. Захарова, Г. М. Иванов, В. В. Куличенко, Н. В. Крылова, Ю. В. Сорокин, М. И. Федорова. Об использовании тепла химических реакций для термической переработки жидких радиоактивных отходов	475

225381/м



п

5. Ю. А. Немиллов и др. «Изв. АН СССР. Серия физ.», XXIII, 257 (1959).
6. J. S h a p e. IRE Trans. Nucl. Sci., 7, No. 2—3, 44 (1960).
7. В. В. Матвеев, А. Д. Соколов. В сб. «Аппаратура для ядерной спектрометрии». М., Атомиздат, 1960, стр. 19.
8. P. Thieberger et al. Nucl. Instrum and Methods, 14, 225 (1961).
9. R. Hill. Proc. Phys. Soc., 85, 1068 (1965).
10. G. Narayan, J. Prescott. IEEE Trans. Nucl. Sci., 13, No. 3, 132 (1966).

Изучение радиационной стойкости окиси бериллия при температуре до 100°С

А. В. ХУДЯКОВ, Н. А. МАРАКУЕВА, В. И. КЛИМЕНКОВ, Г. С. БАЛАНДИН

УДК 621.039.532.5:621.039.531

Окись бериллия является хорошим материалом для применения в реакторе в качестве замедлителя, отражателя или электроизолятора, однако ее использование ограничено из-за невысокой радиационной стойкости при низких температурах. Так, известно [1, 2], что при облучении интегральными потоками $(0,2 \div 1) \times 10^{21}$ нейтр/см² * (при температуре до 100°С) изделия из окиси бериллия разрушаются, превращаясь в порошок.

Исследование механизма разрушения показывает, что оно происходит в основном под действием внутренних напряжений, возникающих вследствие резко анизотропного роста кристаллов. Если линейное распухание поликристалла достигает 2—5%, то соотношение линейных расширений по двум главным кристаллографическим направлениям (*a* и *c*) равно 8—16. Несмотря на непереложную закономерность распухания, которое происходит в результате накопления радиационных дефектов, можно попытаться, опираясь на знание механизма разрушения, повысить стойкость окиси бериллия путем подбора ее свойств. Перспективным направлением в улучшении радиационной стойкости окиси бериллия считается уменьшение величины зерна и создание текстуры [1]. Однако и наиболее стойкие образцы [1, 2] выдерживают интегральные потоки не выше $(2 \div 3,5) \cdot 10^{21}$ нейтр/см².

В настоящей работе приводятся данные исследований микроструктуры различных образцов окиси бериллия, подвергшихся облучению потоком нейтронов до $4 \cdot 10^{21}$ нейтр/см². Многочисленные исследования (например, [1, 2]) показывают, что микрорастрескивание — самая характерная черта в поведении окиси бериллия при облучении, с которой связаны изменения почти всех физико-механических свойств. Так, с началом растрескивания резко увеличивается скорость распухания зерен и поликристалла в целом, снижаются теплопроводность, прочность и т. д. Поэтому наиболее наглядной и убедительной характеристикой послерадиационного состояния окиси бериллия является ее микроструктура.

Для радиационных испытаний были приготовлены различные образцы окиси бериллия (см. таблицу). Образцы имели весьма разнообразную форму и размеры: цилиндры с диаметром и длиной в пределах 15—60 мм и 20—250 мм соответственно, параллелепипеды $25 \times 60 \times 130$ мм, кубики с ребром 8—10 мм и малые гагаринские образцы.

Образцы окиси бериллия облучали в реакторе СМ-2 при температуре ~100°С. После облучения на образцах по обычной технологии изготавливали

* Здесь и далее интегральные потоки приводятся для нейтронов с энергией $E \geq 1$.

шлифы, которые просматривали при оптических увеличениях до 1000 раз.

Характеристики облучаемых образцов окиси бериллия

Номер партии	Материал	Способ формирования изделий	Относительная плотность, %	Размер зерна, мк
I	BeO	Горячее литье	97	30—40
II	BeO + 0,25 вес.% Al ₂ O ₃	Холодное прессование	93,5	35
III	BeO + 0,5 вес.% Al ₂ O ₃	Горячее литье	93,5	35
IV	BeO	Горячее прессование	95,5—98,5	3—5
V	BeO + 3 вес.% Al ₂ O ₃ ; SiO ₂ ; CaO	Горячее литье	96	80—100

Экспериментальные результаты

Начало микрорастрескивания в крупнозернистых высокоплотных образцах из чистой окиси бериллия, изготовленных горячим литьем из парафинсодержащих суспензий [3], наблюдалось при интегральном потоке 10^{20} нейтр/см². После облучения потоком 4×10^{20} нейтр/см² образцы рассыпаются в порошок при слабых сжимающих напряжениях. На шлифах таких образцов (рис. 1, б) видна сплошная сетка микротрещин. В крупнозернистых с пониженной плотностью образцах BeO + 0,25% Al₂O₃, изготовленных холодным прессованием с последующим спеканием [4], заметное растрескивание в основном по границам зерен обнаружено после облучения потоком выше $5 \cdot 10^{20}$ нейтр/см² (рис. 2, а). Поток $7 \cdot 10^{20}$ нейтр/см² сильно разрушает образцы (рис. 2, б), которые, однако, еще сохраняют свою форму. Полное разрушение происходит при потоке 10^{21} нейтр/см².

В образцах BeO + 0,5% Al₂O₃, исходные свойства которых аналогичны образцам BeO + 0,25% Al₂O₃,

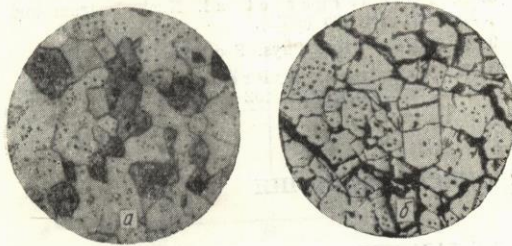


Рис. 1. Шлифы окиси бериллия из партии I ($\times 200$):
а — необлученная BeO ; травление; б — облучение потоком $4 \cdot 10^{20}$ нейтр/см²; без травления.

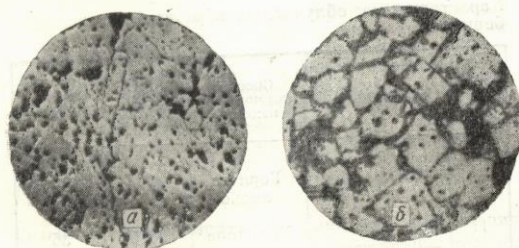


Рис. 2. Шлифы окиси бериллия из партии II ($\times 200$):
а — облучение потоком $5 \cdot 10^{20}$ нейтр/см²; слабое травление; б — облучение потоком $7 \cdot 10^{20}$ нейтр/см²; без травления.

микрорастрескивание также начинается при потоках выше $5 \cdot 10^{20}$ нейтр/см². Образцы сохраняют свою форму после облучения потоком $2 \cdot 10^{21}$ нейтр/см², при этом они заметно охрупчиваются и раскалываются на отдельные куски от легких ударов. На шлифах хорошо видна развитая сетка микротрещин.

Мелкозернистые горячепрессованные образцы утрачивали свою прочность и легко рассыпались в порошок после облучения потоком $4 \cdot 10^{21}$ нейтр/см². Обнаруженные микротрещины в основном проходят по границам зерен. Облучение потоком $3 \cdot 10^{20}$ нейтр/см² горячелитых крупнозернистых образцов окиси бериллия со стеклофазой не вызывает в них появления микротрещин.

Независимо от формы и размеров образцы окиси бериллия при отсутствии внешних механических напряжений сохраняют свою целостность, несмотря на полное разупрочнение. Образование трещин на них визуально не отмечается.

С ростом дозы облучения на шлифах всех изучавшихся образцов отмечается увеличение ширины и глубины канавок травления на межзеренных границах.

Обсуждение результатов

Рентгеноструктурные исследования облученной при температуре $\sim 100^\circ\text{C}$ окиси бериллия [1, 2, 5] свидетельствуют о том, что рост параметров a и c стремится к насыщению в интервале потоков $(5 \div 10) \times$

$\times 10^{20}$ нейтр/см². По-видимому, можно ожидать, что образцы, выдержавшие облучение такими потоками, при дальнейшем облучении не будут разрушаться.

Как и ожидалось, крупнозернистая высокоплотная керамика из чистой окиси бериллия оказалась наименее радиационно стойкой. Мелкозернистые образцы наиболее стойки под облучением, однако и они разупрочняются при облучении потоком $4 \cdot 10^{21}$ нейтр/см².

Установленные факты преимущественного межзернового разрушения, расширения межзерновых границ в облученном материале, электронно-микроскопические наблюдения последовательных стадий раскрытия микротрещины [4] приводят к заключению, что границы зерен более повреждаемы, чем материал кристаллов. В решетке окиси бериллия, состоящей из легких атомов, термические зоны Бринкмана, видимо, имеют малые размеры. Основная же часть энергии, передаваемая нейтронами атомам решетки, благодаря фокусирующим соударениям рассеивается на больших расстояниях [6, 7]. На границе зерна, где отсутствует дальний порядок, нейтроны должны создавать значительно большие повреждения. По-видимому, большей повреждаемостью границ зерен можно объяснить разрушение мелкозернистых образцов после достижения насыщения в приросте параметров a и c .

Несмотря на относительно большую величину зерна в образцах II и III партий, они выдерживают потоки нейтронов до $(1-2) \cdot 10^{21}$ нейтр/см², причем добавка 0,5% Al_2O_3 приводит к большей стойкости BeO .

Повышенную стойкость можно объяснить двумя причинами.

Наличие пористости (6,5%) в указанных образцах допускает некоторую компенсацию смещений кристаллов при их анизотропном росте. Прослойки эвтектики $\text{BeO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ создают пластичные зоны между зернами. Можно было предполагать, что высокая плотность, большие, вытянутые, хаотично расположенные зерна в образцах со стеклофазой (партия V) приведут к более быстрому разрушению по сравнению с образцами партии I. Однако эти образцы хорошо выдерживают облучение потоком $3 \cdot 10^{20}$ нейтр/см².

Установленное в настоящей работе заметное влияние на радиационную стойкость образцов различных добавок в окиси бериллия позволяет надеяться на возможность получения из нее изделий, которые смогут выдерживать высокие интегральные потоки нейтронов при температуре 100°C . Это, по-видимому, можно сделать путем одновременного уменьшения зерна и создания хороших пластичных прослоек между зернами.

Результаты проведенной работы сводятся в основном к следующему.

1. Изучена радиационная стойкость различных образцов окиси бериллия отечественного производства. Наиболее стойким под действием облучения оказался мелкозернистый материал.
2. Обнаружено влияние различных добавок на улучшение стойкости окиси бериллия.
3. Анализ данной работы позволяет сделать предположение о большей повреждаемости границ зерен в поликристалле.
4. В качестве возможного пути повышения радиационной стойкости предлагается создание мелкозернистого материала с пластичными прослойками между зернами.

Авторы выражают благодарность С. Т. Конобеевскому за полезные консультации в ходе экспериментов

и при обсуждении работы, В. И. Кушаковскому за мелкозернистые образцы, предоставленные для проведения экспериментов.

Поступило в Редакцию 16/VIII 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Radiation Damage in Reactor Materials. Vienna, IAEA, 1963.
2. J. of Nucl. Materials, 14 (1964).

3. П. О. Грибовский. Горячее литье керамических изделий. М., Госэнергоиздат, 1961.
4. А. В. Худяков, З. Е. Островский, В. И. Клименков. «Атомная энергия», 23, 226 (1967).
5. С. Т. Конобеевский, В. И. Клименков, В. М. Косенков. «Докл. АН СССР», 165, 524 (1965).
6. J. Gibson et al. J. Appl. Phys., 30, 18 (1959).
7. J. Vineyard. J. Phys. Soc. Japan, 18, Suppl. 3 (1963).

Трехступенчатая разделительная установка из ртутных масс-диффузионных колонн

Б. И. НИКОЛАЕВ, Г. А. СУЛАБЕРИДZE, Г. А. ТЕВЗАДZE,
В. А. ЧУЖИНОВ, Г. А. ОСИПОВ

УДК 541.182.3.543.52

В работах [1, 2] сообщалось об экспериментальном исследовании процесса разделения в масс-диффузионной колонне с использованием ртути в качестве рабочей жидкости. С целью дальнейшей разработки метода и изучения каскадирования одиночных колонн была построена трехступенчатая установка, на которой выполнено исследование процесса разделения на изотопах неона.

Последовательное соединение отдельных колонн осуществлялось по схеме, использованной в работе [3] (см. рисунок)*.

Переток газа из верхней части предыдущей колонны в нижнюю часть последующей обеспечивался гидродинамическим перепадом давления на диафрагме, создаваемым протекающим через диафрагму потоком пара рабочей жидкости.

* Приведенная схема предусматривала возможность исследования каждой колонны каскада в отдельности.

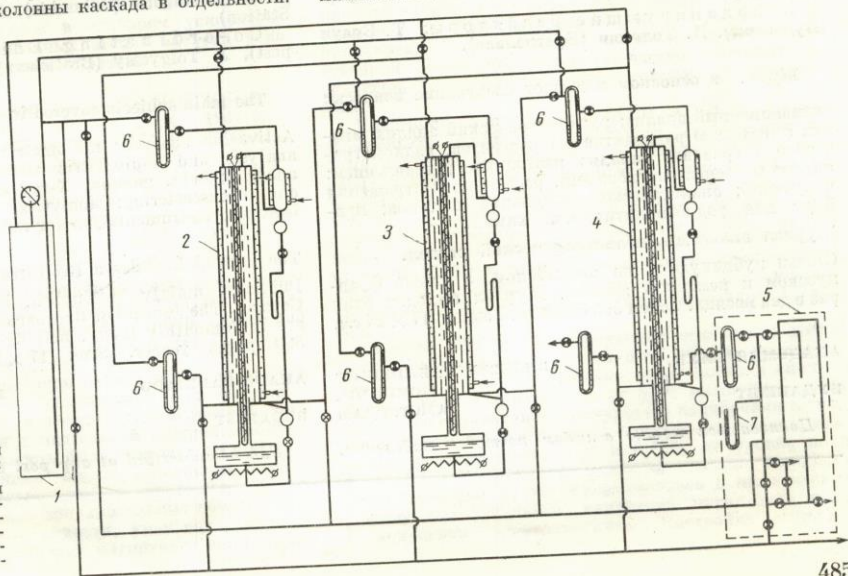
Величина потока контролировалась с помощью капиллярного расходомера. Контрольные измерения показали, что величина межступенчатого потока была достаточной для обеспечения эффективного обмена газом между колоннами.

Питание установки исходным продуктом осуществлялось из 120-литрового объема, а отбор тяжелого изотопа проводился из нижней части последней ступени.

В качестве диффузионного сопротивления использовалась однослойная сетчатая диафрагма, изготовленная из проволоки нержавеющей стали 1X18H9T и имеющая длину диффузионного сопротивления 0,6 см. Общая площадь диффузионного сопротивления 0,36 м², рабочая площадь диафрагм трех колонн составляла 0,36 м², максимальная длина диафрагмы каждой колонны 1 м, максимальная мощность, потребляемая установкой, 4—5 квт.

Схема трехступенчатой каскадной установки:

1 — объем с исходным продуктом; 2, 3, 4 — ступени каскада; 5 — система отбора; 6 — капиллярные расходомеры; 7 — ртутный манометр.



485