

Результаты измерений прочности на сжатие *

Таблица 2

Номер образ-ца	Температура отжига, °C											
	без отжига				850				1000			
	необлученные		облученные		необлученные		облученные		необлученные		облученные	
	$\sigma_{\text{пред}}$, кг/мм ²	ϵ , %	$\sigma_{\text{пред}}$, кг/мм ²	ϵ , %	$\sigma_{\text{пред}}$, кг/мм ²	ϵ , %	$\sigma_{\text{пред}}$, кг/мм ²	ϵ , %	$\sigma_{\text{пред}}$, кг/мм ²	ϵ , %	$\sigma_{\text{пред}}$, кг/мм ²	ϵ , %
1	159	40	117	32	155	39	105,5	17	152	7,15	—	—
2	140	40	—	—	151	38,4	—	—	167	41,6	148	33,1
6	106	40	90	37,9	119	43,8	98	35,8	107	31,4	—	—

* Механические свойства облученного бериллия после отжига при температурах ниже 600° C близки к характеристикам неотожженного металла.

лившийся на границах зерен, коагулирует в кристаллографически ограненные поры («отрицательные кристаллы», см. рис. 2, е). Размер этих пор 1—2 мк, их число составляет 10^{10} — $1,5 \cdot 10^{10}$ в 1 см³ металла.

В мелкозернистом металле размер гелиевых пузырей 500—1000 Å, плотность их $6 \cdot 10^{13}$ пузырей/см³ (см. рис. 2, з).

В образцах с повышенным содержанием окиси бериллия гелиевые пузыри при миграции образуются преимущественно у включений окиси, при этом пузырьки на свободной поверхности границы зерна имеют несколько меньший диаметр, чем в образцах с малым содержанием ВеО.

Из полученных результатов наибольший интерес представляет повышенная стойкость к распуханию пористых материалов и образцов с большим содержанием окиси бериллия. Это можно объяснить удержанием газа: в первом случае — порами, во втором — включениями окиси бериллия.

Снижение размера зерна в исследованном бериллии также приводит к заметному повышению радиационной стойкости материала. Это результат, во-первых, увеличения прочности границ и, во-вторых, уменьшения их проницаемости.

Поступило в Редакцию 12/III 1969 г.
В окончательной редакции 14/VII 1969 г.

О величине газового распухания в облученной окиси бериллия

А. В. ХУДЯКОВ, Н. В. СУДАКОВА, Г. С. БАЛАНДИН

УДК 621.039.532.5:621.039.553

Проблема стойкости окиси бериллия в реакторе при высокотемпературном облучении связана с накоплением продуктов ядерных реакций. Главным из них является гелий, который способен при высоких температурах образовывать поры.

Результатирующее распухание компактных образцов ВеО при высокотемпературном облучении или при отжиге после низкотемпературного облучения изучалось многими авторами [1, 2], однако в этих исследованиях не рассматривался прирост объема только за счет возникновения гелиевой пористости.

В настоящей работе описаны исследования ВеО из отражателя реактора СМ-2, изготовленной холодным прессованием с последующим спеканием при температуре 1800° C в течение 6 ч (плотность 2,8 г/см³, средний размер зерна ~35 мк) [3, 4]. Отобранные для исследования образцы ВеО, облученные интегральным потоком быстрых ($E \geq 1$ Мэв) нейтронов $5 \cdot 10^{20}$ нейтр/см² при температуре 70° C, не содержали микротрещин. Пористость изучали после отжига образцов в вакууме при температурах 1400 и 1500° C. При исследовании применяли несколько методов.

Электронномикроскопические исследования [3] проводили для определения объема гелиевых пор. На микрофотографиях (увеличение 10 000) со сколов облученных образцов, отожженных при температурах 1400 и 1500° C в течение 81 и 15 мин соответственно, изме-

ряли размеры пор, после чего вычисляли их удельный объем. Электронномикроскопические исследования образцов, отожженных при этих температурах в изотермическом режиме, показали, что к указанным выше временам отжига гелиевые поры укрупнились до размеров 1000 Å, позволяющих проводить измерения с ошибкой менее 10%.

Микроскопической пикнометрией на шлифах [5] определяли общий объем вновь образованной пористости. Шлифы изготовляли из необлученных и облученных интегральным потоком $5 \cdot 10^{20}$ нейтр/см² образцов [4], отожженных при температуре 1500° C. Относительная ошибка измерений величин объемного распухания не превышала 5% от измеряемой величины. Подсчет пор внутри зерна проводили в образцах, механически измельченных в порошок с размером частиц 10—100 мк. Частицы порошка помещали в обкладки прозрачной ацетатной пленки. Измерение размеров пор в порошке проводили в микроскопе МБИ-3 на просвет при увеличении 420. Относительная ошибка в определении суммарной величины пористости в 50 частицах составляла ~3%.

Методом гидростатического взвешивания определяли изменение объема открытой пористости. Этот метод применен только для решения вопроса о том, где выделяется гелий: сосредотачивается ли он в порах внутри материала или выделяется в результате значительной

Изменение объемной пористости в BeO при отжиге

Таблица 1

Характеристика образцов BeO	Температура отжига, $^{\circ}\text{C}$	Время отжига, мин	Число пор на шлифе	Объемная пористость ($\times 100\%$)	Абсолютный прирост пористости, %	Число измерений
Необлученные	—	—	331	$8,6 \pm 0,4$	—	1
	1500	60	309	$8,9 \pm 0,4$	—	1
Облученные	—	—	221	$8,3 \pm 0,4$	—	1
	—	—	432	$8,9 \pm 0,4$	—	1
	1500	15	397	$11,0 \pm 0,4$	$2 \pm 0,4$	1
	1500	60	200	$11,6 \pm 0,1$	$3 \pm 0,2$	13
	1500	225	343	$12,5 \pm 0,4$	$44 \pm 0,5$	1

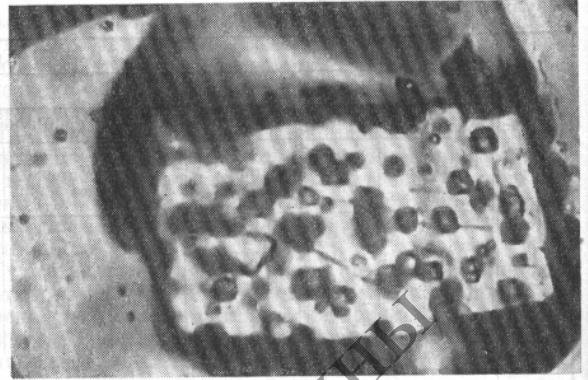


Рис. 1. Частица необлученной BeO ($\times 840$).

Изменение пористости в зернах в BeO при отжиге

Таблица 2

Время отжига, мин	30	100	
Температура отжига, $^{\circ}\text{C}$	1300	1400	1500
Число частиц	50	50	121
Число пор в частицах	507	490	2562
Пористость, %	$0,78 \pm 0,025$	$0,82 \pm 0,025$	$0,95 \pm 0,010$

Изменение открытой пористости BeO при отжиге

Таблица 3

Образцы	Относительный объем открытой пористости, %	
	до отжига	после отжига в течение 1 ч 1500°C
Необлученные	1,9	1,5
Облученные	0,86	0,4

Примечания. 1. Несоответствие открытой пористости в необлученных и облученных образцах до отжига объясняется некоторыми отклонениями в технологии производства облучавшегося и эталонного блоков окиси бериллия. 2. Абсолютная ошибка измерения составляла $\pm 0,1\%$.

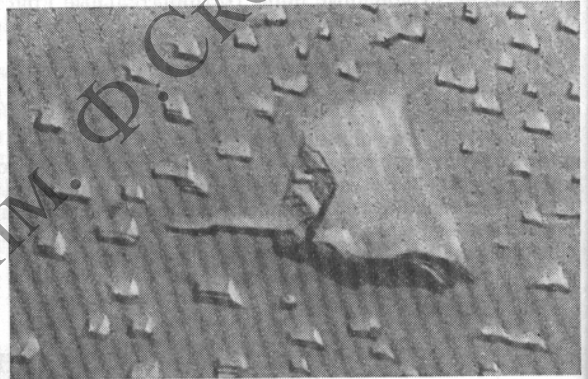


Рис. 2. Облученная интегральным потоком $5 \cdot 10^{20}$ нейтр/см² BeO , отожженная при температуре 1500°C в течение 4 мин ($\times 10000$).

Результаты измерений пористости методом микроскопической пикнометрии на шлифах и в частицах порошка, а также методом гидростатического взвешивания представлены в табл. 1—3 соответственно.

На рис. 1 представлена одна из фотографий исследуемых частиц порошка BeO , на основании которой по единой кристаллографической направленности пор можно судить о том, что частицы являются монокристаллами. Следовательно, определяемая в них пористость (см. табл. 2) является внутризерновой. В то же время данные о росте пор в облученных образцах, полученные микроскопической пикнометрией на шлифах (см. табл. 1), относятся к увеличению свободного объема как на границах, так и внутри зерен.

Таким образом, сравнивая данные табл. 1 и 2, можно видеть, что основной прирост пористости в облученных образцах после их отжига происходит вследствие образования межзеренной пористости. Из табл. 3 видно, что в процессе отжига происходит уменьшение открытой пористости. Это свидетельствует о процессе спекания в приповерхностных слоях образцов [6]. Следовательно, образование нового объема пор внутри исследуемых облученных образцов происходит без значительной утечки гелия на внешнюю поверхность.

утечки газа на внешнюю поверхность. Вопрос решался оценкой изменения открытой пористости облученных образцов в процессе отжига. Изменение пористости исследовали как в необлученных, так и в облученных образцах после отжига их при температуре 1500°C в течение 1 ч и гидростатическим взвешиванием с вакуумной пропиткой в воде. Образцы имели вес около 1 г. Относительная ошибка измеряемой величины составляла не более 1%.

Одна из типичных микрофотографий со скола облученного и отожженного образца представлена на рис. 2.

Измерения объема гелиевых пор с помощью электронной микроскопии проводили в облученных образцах, отожженных при температурах 1400 и 1500° С на площадях сколов, равных 630 и 320 мк² соответственно. Средний размер пор оказался равным для этих случаев 0,61 и 0,72 мк. Объем гелиевых пор составил примерно 1% от общего объема материала. Сравнение этих данных с соответствующими результатами, полученными методом микроскопической пикнометрии на шлифах (см. табл. 1), показывает, что разница в полученных величинах находится в пределах экспериментальных ошибок, а приток объема на начальной стадии выделения гелия составляет 1—2%. Эту величину объемного распухания можно сравнить с количеством накопившегося в процессе облучения и выделившегося в процессе отжига гелия.

Как показано в работе [1], при интегральном потоке $5 \cdot 10^{20}$ нейтр/см² в 1 см³ ВеО накапливается около 0,45 н·см³ гелия. Переведа свободный объем, образовавшийся в результате роста пор, в количество вакантных мест кристаллической решетки ($N_{\text{вак}}$), а объем газа в количестве атомов гелия ($N_{\text{гел}}$), можно показать, что $N_{\text{гел}}/N_{\text{вак}}$ равно 1/400, т. е. основным механизмом роста гелиевых пор должно быть влияние давления газа в порах, приводящее к слиянию в них вакансий, находящихся в термодинамическом равновесии. Так как границы зерен представляют собой хороший источник

вакансий, то пористость в основном развивается именно на этих дефектах поликристалла.

Последнее обстоятельство указывает на необходимость применения при высокотемпературном облучении мелкозернистой ВеО, в которой увеличена суммарная поверхность межзеренных границ.

Определенная величина газового распухания в окиси бериллия может быть использована при проектировании высокотемпературных реакторов с деталями из ВеО.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность В. И. Клименкову за полезные обсуждения.

Поступило в Редакцию 28/II 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Radiation Damage in Reactor Materials, Vienne IAEA, 1963.
2. J. Nucl. Mat., 14 (1964).
3. А. В. Худяков, В. Е. Островский, В. И. Клименков. «Атомная энергия», 23, 226 (1967).
4. А. В. Худяков и др. «Атомная энергия», 24, 483 (1968).
5. Я. Е. Гегузин, Н. Н. Овчаренко. «Порошковая металлургия», 5, 15 (1962).
6. Я. Е. Гегузин. Макроскопические дефекты в металлах. М., Металлургиздат, 1962.

Нейтроны с энергией менее 1 Мэв в спектрах (α, n) Ве-нейтронных источников

В. И. ФОМИНЫХ

УДК 539.124.03

Нейтронные спектры (α, n)Ве-источников согласуются между собой в области энергии более 2 Мэв [1, 2]. Однако в области малых энергий существуют значительные расхождения экспериментальных данных, полученных различными авторами даже для однотипных источников. Например, для RaBe (α, n)-источника указываются значения нейтронов с энергией менее 1 Мэв от 5 [3] до 37% [4].

Эти расхождения влияют на величину средней энергии нейтронов источника — характеристику, важную для практической нейтронной дозиметрии, — а также сказываются на точности экспериментов, в которых нейтронные детекторы (в том числе нейтронные радиометры и дозиметры) градуируются по источникам, полный поток нейтронов которых измерен абсолютным методом. Знание доли нейтронов с энергией менее 1 Мэв необходимо при расчете поправок при абсолютных измерениях потока нейтронов в источниках.

В данной работе для оценки этой доли нейтронов в общем числе нейтронов, испускаемых (α, n)Ве-источниками, использовались два детектора. Эффективность одного из них была максимальна в области менее 1 Мэв, а эффективность другого — относительно постоянна в широком диапазоне энергии нейтронов [5].

В качестве детектора с максимальной эффективностью в области малых энергий использовалась спициллиационная таблетка на основе смеси В₂О₃ и ZnS(Ag), помещенная в полиэтиленовую сферу диаметром 6,3 см. Снаружи сфера была покрыта кадмиевым экраном.

Эффективность такой системы в области энергий 0—1 Мэв [6] относительно постоянна в интересующем нас диапазоне энергий и резко падает в области больших энергий. Средняя эффективность детектора в области малых энергий определялась по RaBe (γ, n)-источнику с известным полным потоком нейтронов Q по формуле

$$\bar{\epsilon} = \frac{(N - N_{\phi}) 4\pi R^2}{QS}, \quad (1)$$

где N — скорость счета; R — расстояние до центра детектора; S — площадь детектора; N_{ϕ} — поправка на рассеянное излучение.

Полученное экспериментальное значение $\bar{\epsilon}$ согласуется со значением, рассчитанным на основании данных работы [6] по формуле

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_0^1 \epsilon(E) dE}{\int_0^1 dE}. \quad (2)$$

Эффективность детектора при энергии выше 1 Мэв ($\bar{\epsilon}_2$) оценивалась по Po — В-источнику с известным полным потоком и спектром нейтронов (~98% нейтронов, испускаемых Po — В-источником имеют энергию более 1 Мэв).