

следует учитывать возможность достижения перегревов до $\sim 200^\circ\text{C}$ при давлениях насыщения 1—2 *ата*.

Поступило в Редакцию 15/1 1969 г.
В окончательной редакции 25/VI 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Edwards, H. Hoffman. Papers ISME Semi-International Symposium. Vol. 2. Tokyo, 1967.
2. G. Grass et al. Proceeding of the International Conference on the Safety of Fast Reactors. Aix-En-Provence, September 19—22, 1967. Documentation Francaise. Paris, 1968, IIb-4-1.
3. P. Marto, W. Rahsenow. Massachusetts Institute of Technology. Report 5219-33, 1965.
4. I. Chen. Trans. ASME, Ser. C, 90, No. 3 (1968).
5. La Conidec et al. См. [2], IIb-3-1.
6. A. Krakoviak. High-Temperature Liquid-Metal Heat Transfer Technology Meeting. Vol. 1, ORNL-3605, Sept., 1963.

7. В. М. Боршанский и др. «Атомная энергия», 21, 58 (1966).
8. P. Berenson, I. Killakey. См. [6], стр. 34.
9. H. Fauske. См. [2], IVa-1-1.
10. G. Pinchera et al. См. [2], IVa-2-1.
11. R. Holtz, R. Singer. A.I.Ch.E. Journal, 14, No. 4 (1968).
12. А. П. Кудрявцев и др. В сб. «Жидкие металлы». М., Атомиздат, 1967.
13. P. Griffith, I. Wallis. Chem. Engng Progr. Sympos., Series, V, 56, 30 (1960).
14. В. И. Субботин и др. Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Симпозиум СЭВ. Том 1, Обнинск, 1967.
15. M. Jaroch. См. [2], IIb-2-1.
16. I. Edwards, H. Hoffman. US AEC Report ANL-7100, 1965.
17. K. Claxton. См. [2], IIb-8-1.
18. A. Becker. Nucl. Sci. Abstr., 22, No. 20, 4366 (1968).

Свойства облученного бериллия

Л. А. КОРНИЕНКО, И. И. ПАПИРОВ, Г. Ф. ТИХИНСКИЙ, А. С. ДАВИДЕНКО

УДК 621.039.535:621.039.548

Настоящая работа посвящена изучению влияния размеров зерна и количества окиси бериллия в горячепрессованном бериллии на его радиационную стойкость при нейтронном облучении.

Исходным материалом для изготовления образцов служили порошки бериллия крупностью —600 и —56 *мк*, полученные путем помола дистиллированного бериллия в атмосфере аргона. Средний размер зерен в образцах равен 120 и 25 *мк* соответственно. Повышенное содержание окиси бериллия в образцах достигалось дополнительным окислением порошков в смеси кислорода с аргоном. Характеристика порошков и их химический состав приведены в табл. 1.

Образцы получали горячим прессованием порошков в графитовых прессформах.

Условия облучения: интегральный поток быстрых нейтронов $1,2 \cdot 10^{20}$ *нейтр/см²* (с энергией более 1 *Мэв*), температура 280°C . Облученные образцы вместе со

«свидетелями» отжигали при температурах 600; 850 и 1000°C в течение 1 ч.

Изучалось влияние радиационных эффектов на плотность, измеренную гидростатическим взвешиванием с точностью $\pm 10^{-5}$ г, на твердость по Виккерсу при нагрузке 5 кг (время нагружения 30 *сек*) и на механические свойства при сжатии.

Распределение гелия в материале исследовалось методами электронной металлографии поверхностей изломов (метод реплик) и просвечивающей электронной микроскопии в электронном микроскопе УЭМБ-100В при ускоряющем напряжении 100 *кв*.

После облучения плотность всех исследованных образцов не изменилась. Изменения плотности после отжига в течение 1 ч при 600 и 850°C сравнимы с точностью измерений. Послерadiационный отжиг при 1000°C привел к увеличению объема на 1% для образцов бериллия из порошков крупностью —600 *мк*

Характеристика и химический состав порошков

Таблица 1

Номер образца	Крупность исходного порошка, <i>мк</i>	Характеристика порошков	Содержание примесей, %											
			Mg	Fe	Al	Ni	Si	Mo	Cu	Mn	Cr	BeO	C	Ca
1	—56	Помол в аргоне	0,007	0,025	0,034	0,003	0,1	0,032	0,005	0,0034	0,0075	1	0,05	0,01
2	—56	Дополнительное окисление	0,014	0,04	0,038	0,003	0,078	0,003	0,0025	0,004	0,0075	2,11	0,03	0,005
6	—600	Помол в аргоне	0,003	0,04	0,03	0,005	0,01	—	0,01	—	—	0,1—0,3	0,08	—
7	—56	Дополнительное окисление	0,005	0,1—0,3	0,03	0,007	—	—	0,016	—	—	5,5	0,06	—
8	—600	Помол в аргоне	0,0002	0,025	0,02	0,005	—	—	0,01	0,03	—	0,1	0,14	—
9	—56	То же, пористость 5%	0,003	0,03	0,03	0,005	—	—	0,0024	0,0036	—	0,12	0,23	—

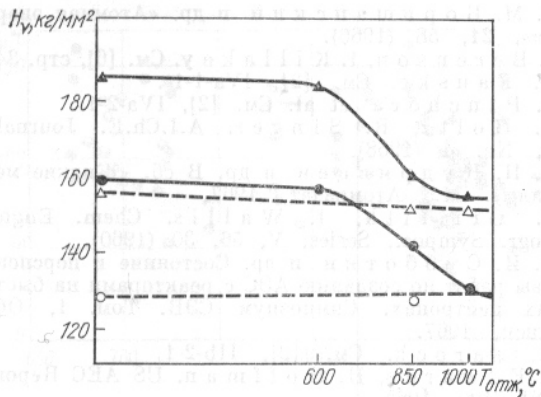


Рис. 1. Зависимость твердости облученных и необлученных образцов от температуры отжига.

Необлученные образцы: ○ — образец 6 (см. табл. 1), △ — образец 1; облученные образцы: ● — образец 6, ▲ — образец 1.

(образец 8, см. табл. 1) и 0,15% для образцов бериллия из порошков крупностью —56 мк (образец 7). Следует отметить, что в образце с пористостью 5% (образец 9) изменения плотности не обнаружено при всех значениях температуры отжига. Это объясняется выделением гелия в межзеренные поры, имеющиеся в образцах.

Облучение указанной дозой нейтронов приводит к заметному увеличению твердости (рис. 1), одинаковому

для материалов с различной величиной зерна. Твердость облученного бериллия не изменяется при температурах отжига до 600° С, а затем начинает уменьшаться и при температуре отжига >850° С практически равна твердости необлученного металла.

Предельное разрушающее напряжение после облучения снижается из-за охрупчивания материала гелием; при последующем отжиге происходят необратимые изменения в образцах, и предельные напряжения, характерные для необлученных образцов, уже не достигаются (табл. 2).

Существенным для понимания процессов, происходящих при облучении и последующем отжиге, является изучение распределения гелия в материале. На электронномикроскопических снимках образцов после облучения наблюдаются вытянутые петли дислокаций размером 200—500 Å и плотностью $5 \cdot 10^{13} - 10^{14}$ петель/см³.

Последующий отжиг при 600° С в течение 1 ч приводит к аннигиляции петель и образованию пузырей размером 150—200 Å, локализованных на линиях дислокаций (рис. 2, а).

Отжиг крупнозернистого бериллия при 850° С приводит к выходу гелия на границы зерна и образованию больших пузырей (1000—1500 Å); плотность их составляет $1 \cdot 10^{12}$ пузырей/см³ (см. рис. 2, б). В образцах мелкозернистого бериллия пузыри не вырастают до значительных размеров из-за того, что миграция гелия затруднена вследствие торможения окисью бериллия на границах зерен.

Повышение температуры отжига до 1000° С дает наиболее заметный эффект роста и миграции пузырей. В образцах крупнозернистого бериллия гелий, выде-

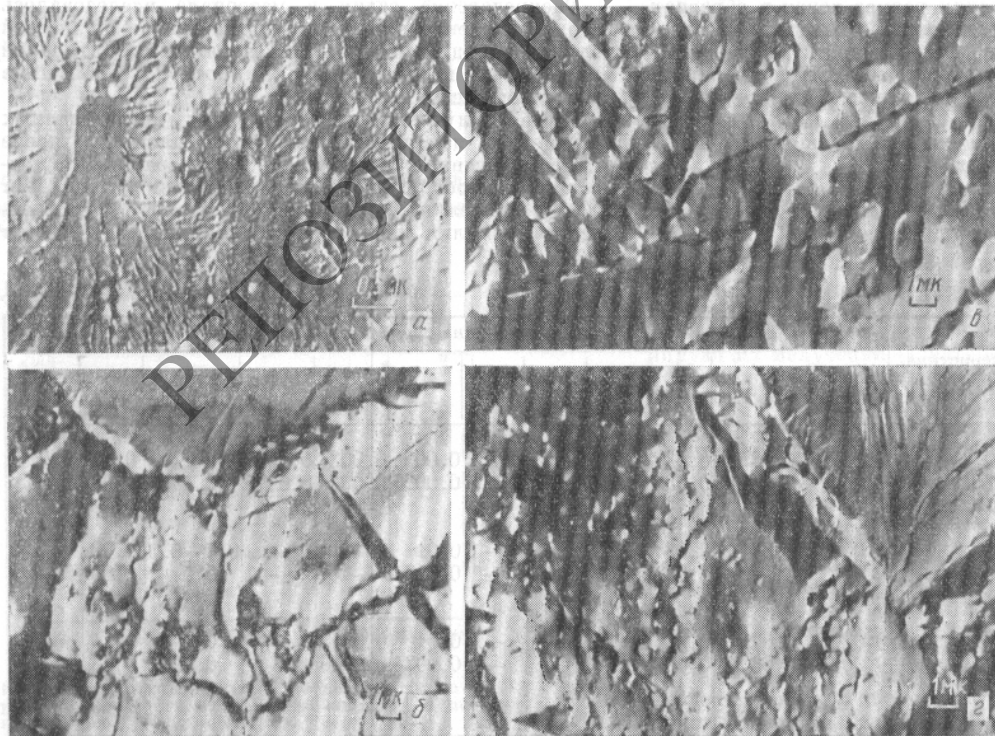


Рис. 2. Гелиевые пузыри в облученном бериллии после отжига при различных температурах:

а — $T_{отж} = 600^\circ \text{C}$ ($\times 25\ 000$); б — 850°C ($\times 4\ 000$); в — $1\ 000^\circ \text{C}$ ($\times 4\ 500$); г — $1\ 000^\circ \text{C}$ ($\times 6\ 000$).

Результаты измерений прочности на сжатие *

Таблица 2

Номер образца	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°С близки к характеристикам неотожженного металла.

лившийся на границах зерен, коагулирует в кристаллографически ограниченные поры («отрицательные кристаллы», см. рис. 2, в). 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, г).

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 протяженности 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°С 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°С, не содержали микротрещин. Пористость изучали после отжига образцов в вакууме при температурах 1400 и 1500°С. 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°С 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°С. Относительная ошибка измерений величины 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