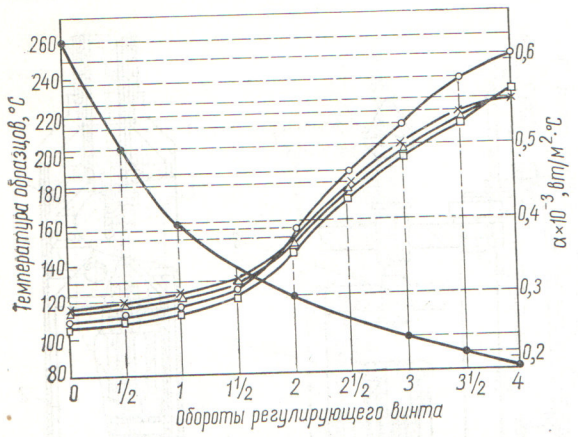

Рис. 6. Изменение температуры образцов в секциях и коэффициента теплоотдачи в зависимости от положения регулирующего винта:

● — коэффициент теплоотдачи от образцов к теплоносителю; ○, □ — температура образцов в верхних секциях; ×, △ — температура образцов в нижних секциях.

цов в каждой секции и средний коэффициент теплоотдачи представлены на рис. 6.

Коэффициент теплоотдачи, определявшийся по формуле

$$\alpha = \frac{q_s}{\bar{t}_0 - \bar{t}_ж}$$

[где α — коэффициент теплоотдачи, $вт/м^2 \cdot °C$; q_s — тепловой поток с поверхности образца (определяется удельным энерговыделением в канале реактора, т. е. плотностью материала образца, и зависит от его геометрии; для рассматриваемого случая $q_s = 2{,}5 \cdot 10^4$ $вт/м^2$); $\bar{t}_0$ — усредненная по четырем секциям температура образцов; $\bar{t}_ж$ — средняя температура теплоносителя в ампуле], плавно изменялся от $\sim 0{,}7 \cdot 10^3$ до $\sim 0{,}2 \cdot 10^3$ $вт/м^2 \cdot °C$ за четыре оборота регулирующего винта; одновременно подогрев теплоносителя менялся примерно от 0,5 до 5° С.

Из рассмотрения представленных зависимостей можно видеть, что ампульное устройство позволяет облучать образцы конструкционных материалов, плавно изменяя температуру в интервале 80—250° С.

Следует отметить возможность облучения образцов при более высокой температуре (600—700° С). Для этого ампула должна быть герметичной и иметь дополнительное термическое сопротивление. Однако это приведет к понижению диапазона регулирования температуры, поэтому целесообразнее использовать ампульное устройство, описанное выше.

В заключение авторы приносят благодарность сотрудникам службы эксплуатации реактора СМ-2, принимавшим деятельное участие в разработке и освоении ампульных устройств.

Поступила в Редакцию 19/VI 1969 г.

Поведение металлического бериллия в реакторе СМ-2

З. И. ЧЕЧЕТКИНА, В. П. ГОЛЬЦЕВ, В. И. КЛИМЕНКОВ, С. Н. ВОТИНОВ, В. А. ЦЫКАНОВ

УДК 621.039.532.5:621.039.553

Металлический бериллий используется в реакторе СМ-2 с 1962 г. в качестве вытеснителя части воды из нейтронной ловушки. Вытеснитель представляет собой четыре вкладыша, размещаемых между топливными сборками реактора и центральным каналом, установленным в нейтронной ловушке. Каждый вкладыш состоит из двух блоков. Через них проходит циркониевая трубка, в которой перемещается стержень аварийной защиты реактора. Нижняя часть стержней изготовлена также из бериллия.

В конце 1964 г. после получения удовлетворительных данных о стойкости металлического бериллия в условиях реактора СМ-2 была произведена реконструкция реактора с заменой бокового отражателя из окиси бериллия на металлический бериллий [1]. С тех пор накоплен дополнительный экспериментальный материал. Некоторые из полученных данных приводятся ниже.

Исследуемый материал и условия облучения. Опыты проводили на образцах, вырезанных из вкладышей и стержней аварийной защиты до и после их выдержки в реакторе. Исследовали также контрольные образцы до и после облучения. Вкладыши изготовлены из горячепрессованных блоков дистиллированного порошкового бериллия зернистостью $\leqslant 600$ *мк* по известной технологии [2]. Предел прочности такого бериллия при 20° С составлял 15—17 $кГ/мм^2$. Стержни аварийной защиты диаметром 20 *мм* были изготовлены методом горячего выдавливания из горячепрессованных блоков. Исследуемые детали, находившиеся в нейтронной ловушке, подвергались наибольшему воздействию облучения. Поток тепловых нейтронов по сечению вкладышей изменялся в пределах

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

$1{,}5\cdot10^{15}$—$5\cdot10^{14}$ *нейтр/см²·сек*. Поток быстрых нейтронов ($E_n \geqslant 0{,}8$ *Мэв*) составлял $1\cdot10^{15}$ *нейтр/см²·сек*, а энерговыделение за счет поглощения γ-излучения — 100 *вт/г*. Контрольные образцы облучались в экспериментальных каналах реактора, где нейтронные потоки и энерговыделение за счет поглощения γ-излучения были в 2—4 раза меньше.

Как бериллиевые детали, так и контрольные образцы охлаждались водой первого контура реактора; давление воды 50 *атм*, температура 50—70° С. После реконструкции спецочистки в 1964 г. [1] качество воды существенно улучшилось. Так, количество сухого остатка понизилось от 4—5 до 1 *мг/л*, содержание кислорода — от 10 до 0,04 *см³/л* и водорода — от 10 до 5—7 *см³/л*.

Температура контрольных образцов при облучении практически равна температуре воды, а температура изделий при работе реактора составляла 100—120° С.

Результаты исследований. Основное внимание было уделено размерной стабильности, плотности, структурным изменениям и механическим свойствам бериллия.

Визуальный осмотр извлеченных из реактора бериллиевых деталей показал, что состояние поверхности зависит от качества воды, общего времени пребывания бериллия в воде, а также от интегральной дозы облучения. На рис. 1 приведены фотографии вкладышей, один из которых (*а*) работал в реакторе в первый период с 1962 по 1964 г., а другой (*б*) — в последующее время, когда качество среды было улучшено. Состояния поверхности деталей существенно отличаются. Если в первом случае видны обширные области точечной коррозии, то во втором поверхность значительно чище, имеются лишь отдельные следы точечной коррозии. С ростом дозы облучения степень коррозии увеличивается, однако она значительно меньше, чем у деталей, получивших меньшую дозу облучения, но работавших в менее качественном теплоносителе.

Результаты осмотра некоторых блоков выявили, что с возрастанием дозы облучения на поверхности блоков помимо точечной коррозии возникают макротрещины, которые распространяются в основном вдоль деталей и нередко приводят к возникновению сколов на гранях блоков. Изменений геометрических размеров исследуемых деталей и контрольных образцов не обнаружено даже после облучения быстрыми нейтронами до интегральной дозы $(3—4)\times\times10^{22}$ *нейтр/см²*.

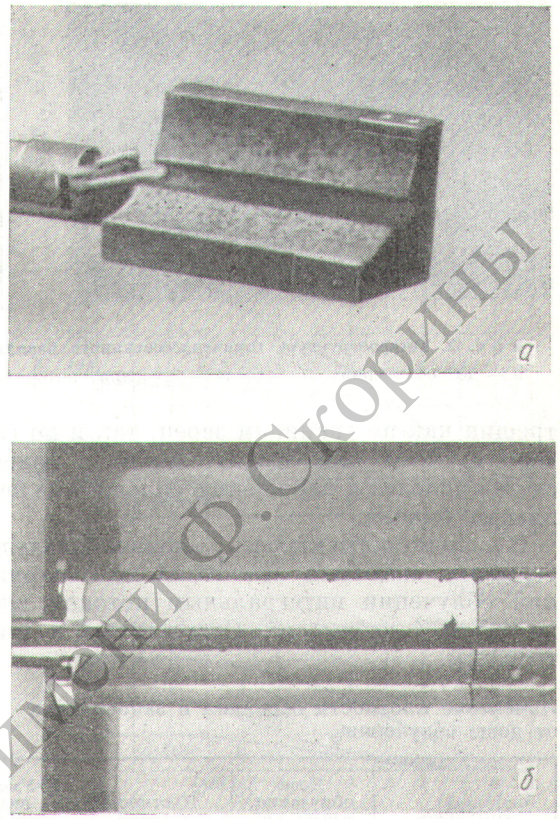

Рис. 1. Общий вид бериллиевых блоков после облучения потоками:
а — $1\cdot10^{22}$ *нейтр/см²*; *б* — $(3\div4)\cdot10^{-22}$ *нейтр/см²*.

Из приведенных в таблице результатов исследований видно, что плотность бериллия во всех случаях сохранялась постоянной до облучения дозами $(5—7)\cdot10^{21}$ *нейтр/см²*. На отдельных образцах, вырезанных из блоков, облученных дозами от 10^{22} *нейтр/см²* и выше, обнаружено уменьшение плотности до 1,5%. Изменение плотности горячевыдавленного бериллия при указанных дозах облучения практически отсутствует.

Металлографические исследования показали, что облучение горячепрессованного бериллия до $5\cdot10^{21}$ *нейтр/см²* не приводит к заметным изменениям микроструктуры. Можно отметить только изменение травимости зерен и их границ. При интегральном потоке около 10^{22} *нейтр/см²* в структуре наблюдаются двойники, линии скольжения, микротрещины и заметная дискретная пористость, преимущественно по границам зерен (рис. 2). Облучение дозами больше 10^{22} *нейтр/см²* приводит к дальнейшему развитию пористости и распространению микро-

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

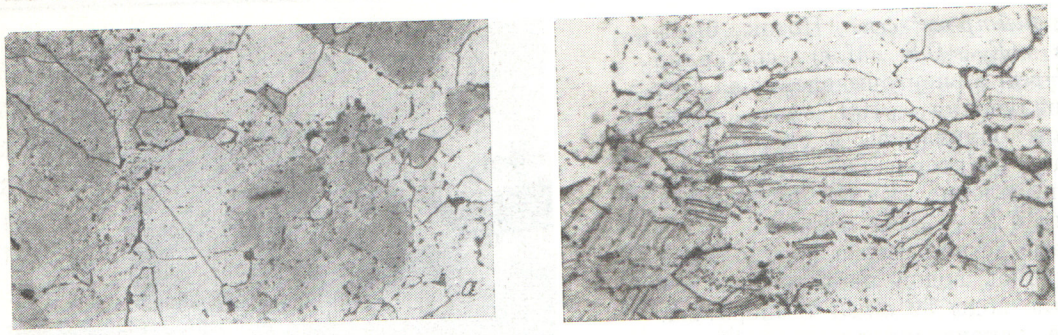

Рис. 2. Микроструктура горячепрессованного бериллия (× 200):
а — до облучения; *б* — после облучения потоком $1 \cdot 10^{22}$ *нейтр/см²*.

трещин как по границам зерен, так и по самим зернам. Последнее обстоятельство в конечном счете приводит к нарушению сплошности бериллиевых блоков.

В микроструктуре горячевыдавленного бериллия заметных изменений не обнаружено при облучении интегральным потоком вплоть до $1{,}5 \cdot 10^{22}$ *нейтр/см²*. Отсутствуют и микротрещины.

Изменение плотности бериллия в зависимости от дозы облучения

Материал	Доза облучения, *нейтр/см²* ($E_n \geqslant 0{,}8$ *Мэв*)	Плотность, *г/см³*	Уменьшение плотности, %
Бериллий горячепрессованный			
Контрольные образцы	До облуч.	1,826 ÷ 1,835	—
То же	$1{,}1 \cdot 10^{20}$	1,826 ÷ 1,835	—
« «	$3{,}7 \cdot 10^{21}$	1,826 ÷ 1,835	—
Образцы, вырезанные из блоков	$5{,}0 \cdot 10^{21}$	1,830 ÷ 1,840	—
То же	$1{,}0 \cdot 10^{22}$	1,810 ÷ 1,840	до 1,5%
« «	$1{,}5 \cdot 10^{22}$	1,800	до 1,5%
« «	$2{,}0 \cdot 10^{22}$	1,790 ÷ 1,810	до 1,5%
« «	$3{,}0 \cdot 10^{22}$	1,815 ÷ 1,790	до 1,5%
Бериллий горячевыдавленный			
Контрольные образцы	До облуч.	1,830 ÷ 1,840	—
То же	$1{,}1 \cdot 10^{20}$	1,830 ÷ 1,840	—
« «	$3{,}7 \cdot 10^{21}$	1,830 ÷ 1,840	—
Образцы, вырезанные из стержня	$3{,}7 \cdot 10^{21}$	1,827 ÷ 1,840	—
То же	$1{,}0 \cdot 10^{22}$	1,827 ÷ 1,840	—
« «	$1{,}5 \cdot 10^{22}$	1,827 ÷ 1,840	—

На рис. 3 представлена зависимость изменения микротвердости от дозы облучения. Резкое повышение микротвердости наблюдается при облучении до интегрального потока $(3—5) \cdot 10^{21}$ *нейтр/см²*. При дальнейшем облучении микротвердость возрастает медленнее, достигая значения 700 *кГ/мм²* при $(3—4) \times \times 10^{22}$ *нейтр/см²*.

Изучение изменений механических свойств облученного бериллия при сжатии проводили на образцах размером $7 \times 7 \times 10$ *мм*, вырезанных из облученных деталей, и на специально изготовленных образцах диаметром 6 *мм* и высотой 9 *мм*.

На рис. 4 представлена зависимость условных пределов прочности $\sigma_в$, текучести $\sigma_{0,2}$ и относительной осадки от дозы облучения.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что предел прочности практически не изменяется до дозы $(3—5) \cdot 10^{21}$ *нейтр/см²*. С повышением дозы облучения предел прочности уменьшается и при 10^{22} *нейтр/см²* составляет 70 *кГ/мм²* по сравнению с 110 *кГ/мм²* у необлученного материала. Предел текучести и относительная осадка не изменяются до 10^{20} *нейтр/см²*. Повышение дозы облучения сопровождается повышением предела текучести и уменьшением величины осадки, которая при

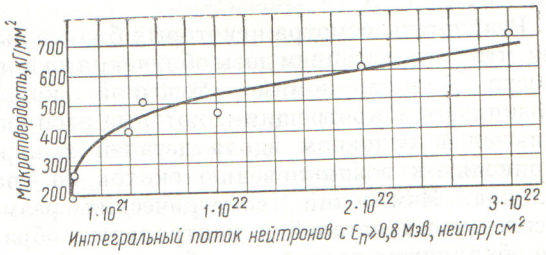

Рис. 3. Зависимость микротвердости бериллия от дозы облучения.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

$(0{,}7-1)\cdot 10^{22}$ *нейтр/см*^{2} становится равной нулю.

При облучении дозой выше 10^{22} *нейтр/см*^{2} материал становится настолько хрупким, что из него не удается вырезать образцы для механических испытаний.

Следует заметить, что при одних и тех же дозах облучения прочностные характеристики у контрольных образцов выше, чем у вырезанных из облученных блоков. Характер изменения свойств при сжатии у горячевыдавленного бериллия такой же, как у горячепрессованного. При этом механические свойства при сжатии в направлении вдоль оси выдавливания с облучением изменяются быстрее, чем при сжатии поперек оси выдавливания, а при дозах $(5-7)\times 10^{21}$ *нейтр/см*^{2} механические свойства вдоль и поперек оси выдавливания сравниваются.

Обсуждение результатов. Наиболее полно наблюдавшиеся эффекты можно объяснить, связав их механизмы с накоплением в бериллии гелия, количество которого, как показывают расчеты и эксперимент, при интегральном потоке $3\cdot 10^{22}$ *нейтр/см*^{2} достигает 60 н. *см*^{3}/*см*^{3} (трития примерно в 20 раз меньше). Так, наблюдавшееся неуклонное повышение микротвердости, по-видимому, нельзя связать только с накоплением таких радиационных дефектов, как вакансии и внедренные атомы или их комплексы, поскольку оно обычно приходит к насыщению уже при интегральном потоке $10^{19}-10^{20}$ *нейтр/см*^{2}.

Исходя из того, что инертные газы при всех температурах нерастворимы или мало растворимы в металлах, следует допустить, что гелий пребывает в квазирастворенном состоянии, находясь в дефектных местах кристаллической решетки либо занимая поры. При этом не наблюдается значительного распухания бериллия, но понятно наблюдавшееся повышение предела текучести и снижение пластичности, поскольку эти характеристики весьма чувствительны к примесям внедрения. Снижение предела прочности при сжатии после облучения интегральным потоком $(3-5)\cdot 10^{22}$ *нейтр/см*^{2} может быть связано с появлением микротрещин, которые образуются, по-видимому, под действием термических напряжений. Последние являются результатом высокого энерговыделения и снижения теплопроводности бериллия. О наличии напряжений свидетельствует появление следов скольжения и двойников в структуре облученного бериллия. Возможно, с появлением микротрещин связано небольшое уменьшение плотности, а также развитие макротрещин, наблюдавшихся на поверхности бериллиевых деталей, подвергнутых сильному облучению.

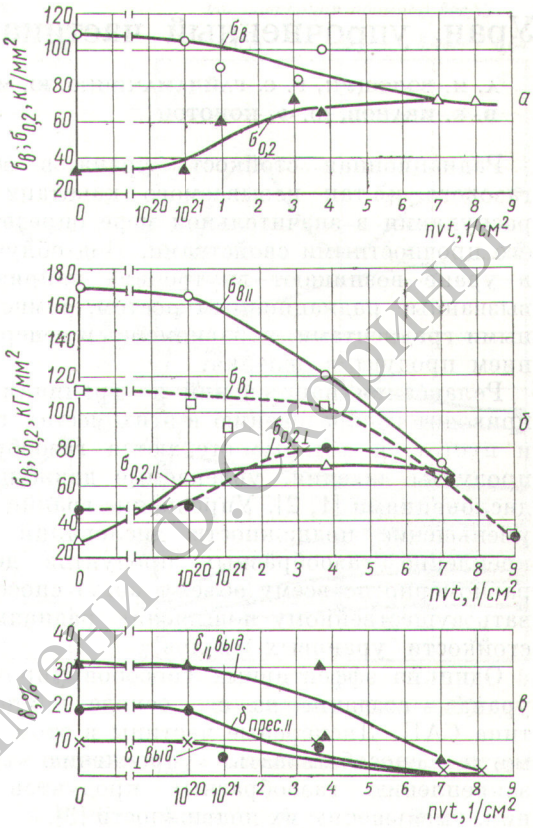

Рис. 4. Зависимость механических свойств при сжатии горячепрессованного (*а*) и горячевыдавленного (*б*) бериллия от дозы облучения (*в* — тот и другой бериллий).

На основании всех фактов допустимой дозой облучения бериллиевых деталей, не несущих внешних механических нагрузок, можно считать интегральный поток быстрых нейтронов $2\cdot 10^{22}$ *нейтр/см*^{2}.

Поступила в Редакцию 30/IV 1969 г.
В окончательной редакции 12/III 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Цыканов и др. Kernenergie, 10, 310 (1966).
2. Б. Г. Игнатьев и др. Доклад № 351, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии. (Женева, 1964).

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины