

контроля и для основного металла по требованиям технических условий. При контроле приповерхностной части корпуса (металла, сварных соединений и наплавов) головными волнами и методом корневой тандем необходимо обеспечить уровни чувствительности, установленные приложениями 5 и 8 ОСТ 108.004.108-80 и приложениями 3 и 14 унифицированной методики ПНАЭГ-07-030-91. При контроле зеркально-теневым методом наклонными преобразователями должны обнаруживаться различно ориентированные плоскостные дефекты (трещины, расслоения и т.п.). Требуемая чувствительность этого метода не установлена. Если исходить из того, что концепция «течь перед разрушением» в чистом виде не может быть применена к корпусу реактора, а также принять во внимание скорость роста трещин в металле реактора и максимальный промежуток времени между двумя циклами УЗК, равный 4 годам (между двумя капитальными ремонтами), то чувствительность, соответствующая 10—20% толщины стенки корпуса реактора, представляется достаточной для ее реализации в системе контроля.

Система эксплуатационного УЗК корпуса реактора, реализующая рассмотренные методику контроля и уровни чувствительности, позволяет постоянно следить за состоянием металла и исключает пропуск опасных несплошностей.

Здесь рассмотрены лишь методические вопросы УЗК корпуса реактора. При анализе методик необходимо также оценивать объемы прозвучиваемого металла, коэффициент использования каждой операции методики контроля при проверке различных частей корпуса.

При анализе собственно систем контроля оценка применяемой методики контроля является определяющим фактором. В то же время при оценке систем контроля необходимо рассматривать другие факторы, характеризующие систему, а именно время контроля, форму представляемой информации по результатам контроля, мобильность (массу и объем системы, время ее подготовки к контролю), простоту или сложность управления, надежность акустической, электронной и механической частот и др.

Поступила в Редакцию 7.04.94

УДК 539.12.043

РАДИАЦИОННЫЙ ОТЖИГ ЭЛЕКТРОНАМИ И γ - КВАНТАМИ ОБЛУЧЕННОГО НЕЙТРОНАМИ АЛМАЗА

Николаенко В.А., Карпухин В.И. (РНЦ «Курчатовский институт»)

В рабочем канале МР при мощности 1300 кВт плотность потока γ -излучения энергией 0,2—4,5 МэВ составляет около $10^{15} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Это излучение, взаимодействуя с веществом, трансформируется в поток электронов энергией 0,1—4,2 МэВ и плотностью $10^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ [1]. Образующиеся электроны взаимодействуют с атомами решетки, изменяя их состояние и создавая дефектные атомы или отжигая уже созданные дефекты. Если принять за энергию смещения $E_d = 25 \text{ эВ}$ (энергия смещения регулярного атома из узла в решетке алмаза), то число первично-выбитых электронами атомов составит $3,5 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$. Энергия этих первично-выбитых атомов невелика, и число смещений фактически равно числу первично-выбитых атомов.

Быстрые нейтроны плотностью потока $1,8 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ при мощности канала 1300 кВт создают более $10^{16} \text{ смещ./см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Поэтому при облучении в реакторе вкладом электронов (или γ -излучения) в создание дефектов можно пренебречь [1]. Если же при облучении алмаза в реакторе (при той же мощности канала) рассматривать взаимодействия, при которых атомы получают энергию 2,5 эВ (средняя энергия активации отжига дефектов в алмазе), то благодаря электронам (γ -квантам) число таких

взаимодействий достигает $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Низкоэнергетические нейтроны ($E < 75 \text{ эВ}$) в создании дефектов в алмазе не участвуют, но их вклад в радиационный отжиг, когда $E = 2,5 \text{ эВ}$, составляет $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, что в 10 раз меньше соответствующего вклада γ -квантов ($6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$). Еще в 10 раз ниже вклад нейтронов энергией более 75 эВ. Нейтроны большой энергии в основном образуют пики смещения — зоны повышенной концентрации дефектов — и в процессе изотермического облучения не понижают общей концентрации дефектов.

Таким образом, и нейтроны, и γ -кванты способны как создавать дефекты, так и стимулировать их отжиг. Но в условиях реакторного облучения спектр и интенсивность этих двух типов излучения таковы, что нейтроны в основном создают дефекты, а γ -кванты вызывают их отжиг. Влияние интенсивности γ -излучения на скорость накопления дефектов в алмазе при облучении в реакторе уже подтверждено экспериментально [2, 3].

Прямые эксперименты по отжигу дефектов в алмазе β -частицами и γ -квантами были проведены в электронном микроскопе и на γ -установке. Этими частицами облучали алмаз с предварительно созданными в нем дефектами при облучении в реакторе. Концентрацию дефектов оценивали по изменению объема кристаллической решетки алмаза.

Отжиг электронами облученного нейтронами алмаза. Дефекты в алмазе отжигали в электронном микроскопе. В качестве образца использовали монокристалл алмаза, облученный нейтронами в МР при 60°C до флюенса $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,18 \text{ МэВ}$). Объемное расширение алмаза после облучения составило 3,68%.

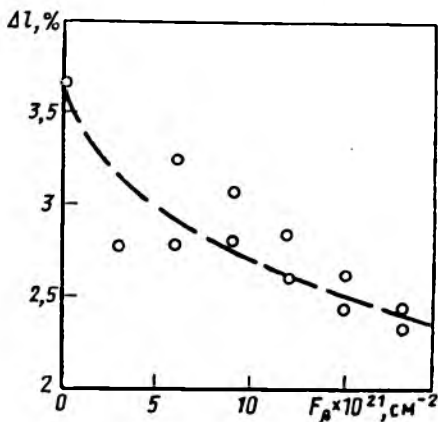
Облученный монокристалл размером $2 \times 3 \text{ мм}$ утоняли до нескольких тысяч ангстрем для работы «на просвет». В электронном микроскопе кристалл был ориентирован направлением $[110]$ по пучку электронов.

Электронограммы снимали через каждые 5 мин облучения. Энергия электронов 200 кэВ, плотность потока $10^{19} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, температура комнатная. Параметр решетки алмаза определяли по расстоянию между рефлексами на электронограммах. Поскольку рефлексы располагаются под малыми углами, погрешность составляла $\pm 0,2\%$.

На рис. 1. приведены результаты одного из экспериментов. За время облучения 30 мин, когда флюенс электронов составил $1,8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, объемное расширение алмаза с 3,68% уменьшилось до 2,3%. Это соответствует результату отжига такого же алмаза за то же время при 450°C . Полученный эффект не связан с нагревом образца пучком электронов, так как аналогичный результат получен в случае облучения при температуре жидкого азота.

Таким образом, облучение β -частицами в электронном микроскопе алмаза, содержащего дефекты, приводит к их отжигу. Электроны трансформируют дефекты, созданные нейтронным облучением, переводя их в другое энергетическое состояние, и изменяют первоначальный спектр энергии активации отжига радиационных дефектов в алмазе.

Отжиг γ -квантами облученного нейтронами алмаза. Несколько образцов алмаза, облученных в разных условиях в реакторе при $\sim 100^\circ\text{C}$, были в дальнейшем облучены γ -квантами на установке ГУТ-200 с использованием ^{60}Co в качестве источника. Энергия излучения 1,17 и 1,32 МэВ, плотность потока γ -квантов — $1,7 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.



Р и с. 1. Зависимость объемного расширения алмаза от дозы облучения электронами

Облучение проводили в течение нескольких месяцев с периодическим отбором проб порошка алмаза для определения расширения его кристаллической решетки. Результаты представлены в табл. 1. На рис. 2 приведены данные для образца АКА-3-5.

Т а б л и ц а 1. Изменение объемного расширения алмаза при отжиге γ -квантами на установке ГУТ-200, %

Маркировка образца алмаза	До отжига	Время, 10^3 ч			
		2,4	4,7	5,6	6,9
		Флюенс γ -квантов, 10^{19} см $^{-2}$			
		1,44	2,85	3,43	4,23
АКА-3-5	2,344	2,328	2,327	2,318	2,316
АКА-3-4	1,134	1,122	1,113	1,113	1,110
В-190,4.28	1,210	1,198	1,194	1,190	—

Приведенные результаты получены при 30 °С (измерение термопарой). Контрольный отжиг нескольких образцов облученного алмаза при 40 °С в течение 770 и 2400 ч показал, что в пределах погрешности $\pm 0,005\%$ расширение облученных образцов не изменилось. Это указывает на отсутствие термического отжига во время нахождения образцов в установке.

Обсуждение результатов. Как следует из табл. 2, за время облучения в реакторе образцы алмаза получили дозу γ -излучения в 2,2, 4,5 и 2,3 раза большую, чем при последующем облучении на установке ГУТ-200. Радиационный отжиг объемного расширения образцов алмаза АКА-3-4, АКА-3-5 и В-190, 4.28 при выдержке на γ -установке (см. табл.1) составил 0,024, 0,028 и 0,020% соответственно. Следовательно, при облучении в реакторе вклад воздействия γ -излучения равен 0,053, 0,126 и 0,046% соответственно.

Т а б л и ц а 2. Условия облучения образцов алмаза

Марка образца	МР			Электронный микроскоп	ГУТ-200
	рабочий канал		отражатель		
	граница	центр			
	АКА-3-4	АКА-3-5			
			В-190,4.28	В-148-2	
Поток, см ⁻¹ ·с ⁻² :					
γ-квантов	2,7·10 ¹⁴	5,4·10 ¹⁴	2,1·10 ¹³	—	1,7·10 ¹²
β-частиц	3,2·10 ¹²	6,6·10 ¹²	2,5·10 ¹¹	10 ¹⁹	2,0·10 ¹⁰
Время, с	3,46·10 ⁵	3,46·10 ⁵	4,57·10 ⁶	1,8·10 ³	2,49·10 ⁷
Флюенс, см ⁻² :					
γ-квантов	9,3·10 ¹⁹	1,9·10 ²⁰	9,6·10 ¹⁹	—	4,23·10 ¹⁹
β-частиц	1,1·10 ¹⁸	2,3·10 ¹⁸	1,14·10 ¹⁸	1,8·10 ²²	4,98·10 ¹⁷
Объемное расширение, %	1,134	2,344	1,210	3,68	
Доля отжига, %	0,053	0,126	0,046	1,38	

В работе [3] приведены результаты облучения алмаза в рабочем канале и бериллиевом блоке МР. При одинаковой дозе облучения нейтронами $5 \cdot 10^{20}$ см $^{-2}$ ($E > 0,18$ МэВ) флюенс γ -излучения в соответствующих каналах равнялся $2,8 \cdot 10^{21}$ и $0,7 \cdot 10^{21}$ см $^{-2}$ соответственно. При этом объемное расширение алмаза в рабочем канале составило 3,6% в бериллиевом блоке — 4,6%. Эта разница обусловлена дополнительным радиационным отжигом образцов в рабочем канале с более высоким флюенсом γ -излучения $2,8 \cdot 10^{21} - 0,7 \cdot 10^{21} = 2,1 \cdot 10^{21}$ см $^{-2}$. Результат находится в хорошем

согласии с данными настоящей работы. При облучении образца АКА-3-5 в рабочем канале МР при флюенсе γ -излучения $1,9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ радиационный отжиг уменьшил объемное расширение алмаза на 0,126%. В работе [3] повышенный в 10 раз флюенс γ -излучения ($2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$) привел примерно к 10-кратному увеличению радиационного отжига (1%).

Следует отметить, что в отношении радиационного отжига эффективность облучения на γ -установке оказывается в несколько раз выше эффективности облучения в электронном микроскопе. Например, при облучении на ГУТ-200 исходное объемное расширение образца АКА-3-4 1,134% уменьшилось на 0,024% при флюенсе электронов $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, в электронном микроскопе образца В-148-2 — на 1,38% при флюенсе электронов $1,8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$.

Низкая эффективность облучения в электронном микроскопе может быть связана как с каналированием электронов в ориентированном монокристалле, так и с влиянием окружающей матрицы, поскольку диаметр пучка электронов составлял 2 мкм.

В заключение следует отметить, что эффект γ -отжига, по-видимому, свойствен и другим облучаемым материалам, в связи с чем учет плотности потока γ -квантов может иметь и практическое значение.

Авторы выражают признательность своим коллегам Е.П. Рязанцеву, Б.А. Гуровичу, В.С. Скобкину, С.И. Алексееву и В.Г. Гордееву за выполнение работ по утонсению алмаза, облучение алмаза в реакторе, на электронном микроскопе и γ -установке, а также подробные и полезные обсуждения результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпухин В.И., Чугунов О.К. Влияние реакторного γ -излучения на радиационный отжиг дефектов: Препринт ИАЭ-1649, 1968. 38 с.
2. Гордеев В.Г., Николаенко В.А. Расширение кристаллической решетки алмаза в зависимости от времени облучения: Препринт ИАЭ-4363/11, 1986. 13 с.
3. Николаенко В.А., Карпухин В.И., Гордеев В.Г. Влияние γ -излучения на кристаллические материалы при облучении в реакторе. — Атомная энергия, 1994, т. 77, вып. 3, с. 186—189.

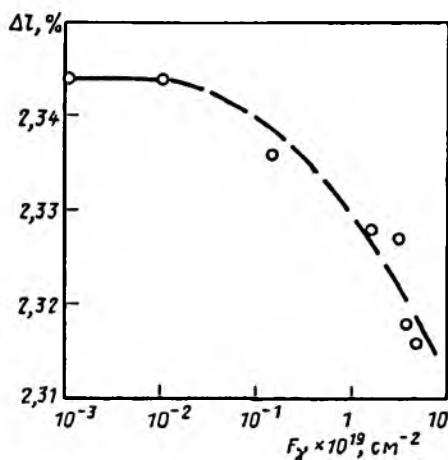
Поступила в Редакцию 30.03.95

УДК 621.039.7

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО НИЗКО- И СРЕДНЕАКТИВНЫХ ОТВЕРЖДЕННЫХ ОТХОДОВ

Быховская Т.А., Захарова К.П., Карпова Т.Т., Масанов О.Л., Орлова А.А.,
Химченко О.М. (ГНЦ РФ ВНИИНМ им. А.А. Бочвара)

Для отверждения низко- и среднеактивных отходов в нашей стране, как и в большинстве других, принята концепция их захоронения вблизи поверхности, т.е. в могильниках, расположенных на поверхности земли или небольшой глубине [1—4]. На размещенные в таких могильниках отвержденные отходы может влиять изменение состава контактирующей воды, переменная температура, наличие микробиологического воздействия и др.



Р и с. 2. То же, что на рис. 1, от дозы облучения γ -квантами