

О вторичном распухании графита

ВИРГИЛЬЕВ Ю. С., КАЛЯГИНА И. П., КУРОЛЕНКИН Е. И., МАКАРЧЕНКО В. Г.

Как известно, облучение при $T > 450$ °С флюенсом $> 10^{22}$ нейтр./см² вызывает вторичный рост, или распухание, графита с образованием вакансионных пор и микротрещин [1].

Поскольку компенсация изменений объема имеющимися порами быстро исчерпывает себя из-за высокой скорости роста кристаллитов, можно полагать, что облучение при комнатной температуре также приведет к вторичному распуханию графита, причем при значительно меньшем флюенсе. Для проверки было проведено облучение двух серий образцов графита марки ГМЗ до флюенса $(2 \div 3) \cdot 10^{20}$ и $8 \cdot 10^{21}$ нейтр./см² с последующим измерением их свойств (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что прирост параметра s у образцов первой серии не превышал 1%, в то время как у высокооблученных образцов второй серии он достигает 8—10% и согласуется с предшествующими данными [2]. Увеличение длины малооблученных образцов первой серии не достигло стадии «насыщения». Прирост длины параллельных образцов второй серии, вырезанных параллельно оси продавливания, несколько превышает значения, соответствующие стадии насыщения для графита этой марки при указанной температуре. Несмотря на высокий прирост длины образцов, вырезанных перпендикулярно оси продавливания, значения электросопротивления и модуля упругости этих образцов, как и образцов первой серии, соответствуют стадии насыщения, характерной для данного графита.

Для усиления наблюдаемого эффекта облучение исследуемых образцов продолжили при более низкой температуре 70 °С флюенсом до $18,5 \cdot 10^{20}$ нейтр./см². В процессе дополнительного облучения длина малооблученных образцов первой серии возрастала со скоростью, характерной для образцов графита ГМЗ, не подвергавшихся предварительному облучению. Стадия насыщения наступила

после достижения флюенса $\sim 8,5 \cdot 10^{20}$ нейтр./см², причем соответствующие значения прироста длины оказались выше, чем у образцов, не подвергавшихся предварительному облучению. При дополнительном флюенсе выше $11,5 \cdot 10^{20}$ нейтр./см² намечалось вторичное распухание образцов (табл. 2), которое сопровождалось резким увеличением электросопротивления до $115 \cdot 10^{-6}$ Ом·м и до $140 \cdot 10^{-6}$ Ом·м соответственно у образцов, вырезанных параллельно и перпендикулярно оси продавливания.

Образцы были покрыты густой сеткой микротрещин. При рентгеновском исследовании дифракционные максимумы оказались полностью размытыми. Общий прирост длины после предварительного и дополнительного облучения достигал 3, 6 (рис. 1, а) и 6,5% (рис. 2, б). Согласно табл. 2, при дополнительном облучении рост высокооблученных образцов (вторая серия) происходит с существенно меньшей скоростью, чем низкооблученных (первая серия). Из рис. 1 видно, что значение флюенса ($F_{\text{перех}}$), соответствующего началу интенсивного распухания (при всей условности этой характеристики) растет с увеличением температуры облучения.

Используя данные по высокотемпературному облучению [3] и полученные в настоящей работе, можно построить температурную зависимость $F_{\text{перех}}$ (рис. 2). Кривая оказывается асимптотной кривой температурной зависимости для скорости приведенной установившейся радиационной ползучести $v_{\text{пр}}$ [3]. Исключая температуру на рис. 2, имеем соотношение

$$F_{\text{перех}} = Av_{\text{пр}}^{-0,7}, \quad (1)$$

с учетом известной [4] зависимости

$$v_{\text{пр}} = B(\dot{S}_c - \dot{S}_a)^{0,7},$$

получаем

$$F_{\text{перех}} = C(\dot{S}_c - \dot{S}_a)^{-0,5}, \quad (2)$$

где A, B, C — константы; \dot{S}_c, \dot{S}_a — скорости роста кристаллографических областей по осям c и a соответственно.

Разность скоростей $(\dot{S}_c - \dot{S}_a)$ экспоненциально снижается с ростом температуры, поэтому механическое взаимодействие между растущими кристаллографическими

Свойства образцов до и после облучения при 130—170 °С

Таблица 1

Характеристика	До облучения	После облучения	
		$F=(2 \div 3) \times 10^{20}$ нейтр./см ²	$F=8 \times 10^{21}$ нейтр./см ²
Относительное изменение длины, %	0	[0,5/0,5 *	1,2/4,0
Электросопротивление, Ом·мм ² /м (10^{-6} Ом·м)	12/14	33/44	32/39
Модуль упругости, 10^5 кгс/см ² ($0,98 \cdot 10^{10}$ Па)	0,7/0,6	2,1/1,6	2,5/1,6
Параметр ре-сетки c , Å (10^{-10} м)	6,742	6,808	7,760

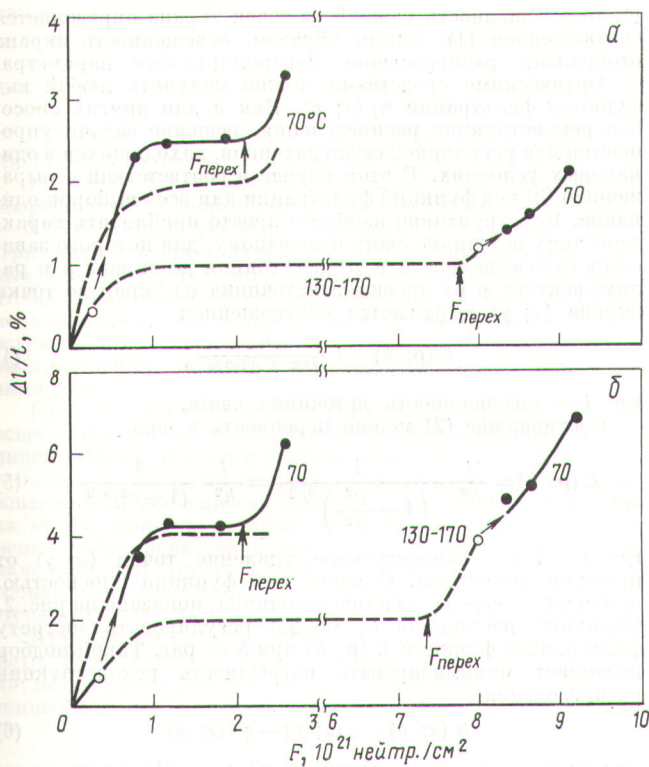
* В числителе — данные для образцов, вырезанных параллельно оси продавливания, в знаменателе — перпендикулярно этой оси.

Таблица 2

Изменение длины образцов в результате дополнительного облучения при 70 °С, %

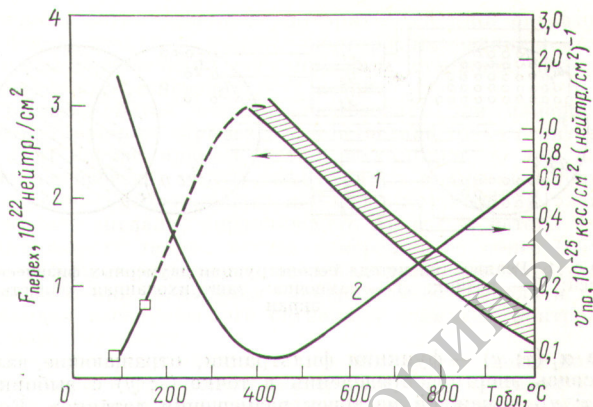
Серия	Направление вырезки образцов относительно направления продавливания	После предварительного облучения при 130—170 °С, %	После дополнительного облучения * флюенсом, 10^{20} нейтр./см ²			
			5,0	8,5	11,5	18,5
Первая		0,5	1,70	1,95	2,00	2,60
	⊥	0,5	3,30	4,15	3,80	5,90
		1,2	0,20	0,35	0,90	—
Вторая		4,0	0,70	1,20	2,80	—
	⊥	—	—	—	—	—

* Усредненные значения для нескольких образцов. За исходный взят размер предварительно облученного образца.



Р и с. 1. Зависимость изменения длины образцов, вырезанных параллельно (а) и перпендикулярно (б) оси продавливания, от флюенса нейтронов: ○ — начальное облучение при 130—170 °С; ● — последующее облучение при 70 °С; — — — данные для графита ГМЗ при указанных температурах, полученные ранее [2]

областями будет начинаться при все более высоких значениях флюенса. Однако при температуре выше 300—350 °С эта разность практически становится постоянной, в связи с чем $F_{перех}$ не должно увеличиваться. Для объяснения нисходящей ветви кривой f на рис. 2 заметим, что выше 400 °С вакансии радиационного происхождения приобретают заметную подвижность. Выделение вакансий из пересыщенной ими графитовой матрицы, последующая их коа-



Р и с. 2. Зависимость от температуры облучения значения флюенса $F_{перех}$, соответствующего началу вторичного распухания графита (1), и приведенной скорости установившейся радиационной полураспухания (2) [3]; заштрихованная полоса построена по данным работы [3]; □ соответствует $F_{перех}$ на рис. 1

гуляция в вакансионные микропоры и объединение последних в микротрещины лежат в основе предложенного в работе [1] механизма вторичного распухания графита при высокотемпературном облучении. Скорости перечисленных взаимосвязанных процессов растут с увеличением температуры облучения (во всяком случае, до 1000—1100 °С), поэтому значение $F_{перех}$ снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куроленин Е. И., Виргильев Ю. С. В кн.: Реакторное материаловедение. Труды конф. по реакторному материаловедению. Т. 2. М., изд. ЦНИИатоминформ, 1978, с. 135.
2. Виргильев Ю. С., Калягина И. П., Макаренко В. Г. «Атомная энергия», 1979, т. 46, вып. 3, с. 180.
3. Гончаров В. В. и др. Действие облучения на графит ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1978.
4. Виргильев Ю. С. и др. В кн.: Конструкционные материалы на основе графита. Вып. 7. М., «Металлургия», 1972, с. 73.

Поступило в Редакцию 20.11.78

УДК 681.518:53.083.94

Индикатор физических полей «Полескоп»

АЛЕКСАКОВ Г. Н., ТЕРЕХОВ Г. П.

Опыт эксплуатации уран-графитовых каналных реакторов РБМК показал, что при тех же размерах конструкций их мощность можно значительно форсировать, не увеличивая риска перехода в область критических тепловых нагрузок, за счет оперативной оптимизации энергораспределения [1]. Один из путей решения этой задачи — усовершенствование устройств отображения энергораспределения или распределения нейтронов. С одной стороны, эти устройства должны давать оператору более полную общую картину распределения, а с другой — упрощать выбор конкретных локальных управляющих воздействий.

РБМК оснащены развитой системой датчиков внутреннего контроля. Однако электрический сигнал каждого из датчиков дает информацию о значении контролируемого параметра в точке его размещения, и поэтому для представления общей картины энергораспределения информационная система должна выполнять две функции: вос-

становливать (реконструировать) по выборкам-сигналам конечного числа датчиков непрерывное энергораспределение и изображать полученное энергораспределение в виде, удобном для восприятия оператора. Эти операции должны выполняться достаточно быстро с тем, чтобы оператор располагал временем на принятие решений о выборе корректирующих воздействий и на их исполнение.

Задача реконструкции достаточно гладкого энергораспределения $g(x; y)$, заданного выборками значений контролируемого параметра в точках $g(x, y)_i$, решается в общем случае [2] путем аппроксимации непрерывной функции $g(x; y)$ рядом

$$g(x; y) \approx g^a(x; y) = \sum_{i=1}^l g(x; y)_i \alpha_i(x; y), \quad (1)$$