

О критериальном выражении дозой зависимости радиационных повреждений в графите

КЛИМЕНКОВ В. И.

УДК 621.039.532.21

Исследованные закономерности радиационного повреждения графита в области невысоких температур позволяют построить критериальные соотношения для учета разных условий облучения. Эти соотношения удобны в практическом использовании при расчетных оценках радиационного повреждения графита в случае облучения в разных точках кладки уран-графитового реактора в связи с наличием определенного распределения температуры и плотности нейтронного потока по кладке или для различающихся условий облучения в разных реакторах.

Зависимость радиационных повреждений от этих параметров облучения известна и выражается установленным на основании концепции эквивалентных температур [1] критерием подобия условий облучения (критерий Курчатов) [2, 3]:

$$Kv = \frac{Q}{kT} + \ln \frac{\Phi}{\Phi_0}, \quad (1)$$

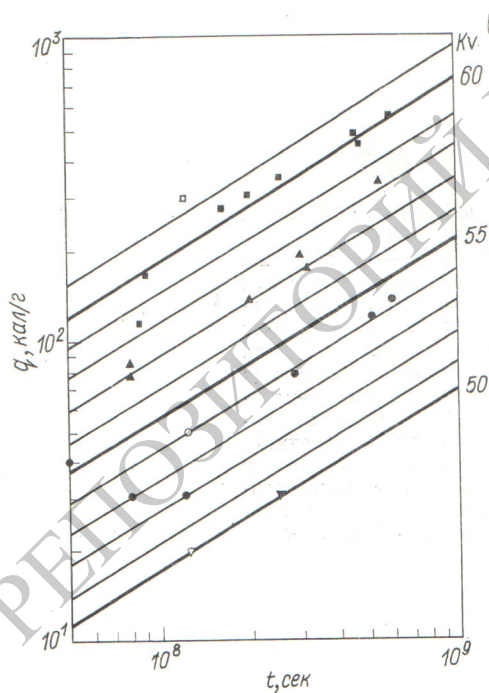


Рис. 1. Скрытая энергия в графите. Прямые — по формуле (4), точки — по экспериментам работ [4, 5]

Kv для ∇ —50; \circ —54; \blacktriangle —57; \blacksquare —60; \square —61.

где Φ — плотность потока повреждающих нейтронов, $нейтр/см^2 \cdot сек$ ($\Phi_0 = 1$ $нейтр/см^2 \cdot сек$); Q — энергия активации отжига радиационных дефектов в области температур облучения не выше $600^\circ C$; T — температура облучения, $^\circ K$; k — постоянная Больцмана.

Параметрическая зависимость Kv от T и Φ в удобном для пользования виде представляется графически [2, 3]. Для накопления скрытой энергии, запасаемой графитом при облучении [4, 5], известна аналитическая зависимость от дозы и температуры облучения [6, 7]:

$$\ln q = \text{const} + p \ln \Phi t + \frac{1-p}{2} \cdot \frac{Q}{kT}, \quad (2)$$

где t — время облучения, $сек$; $p = 0,60 \pm 0,04$ — эмпирическая константа [7].

Это выражение справедливо для температур $155 - 355^\circ C$ и доз облучения до 10^{21} $нейтр/см^2$.

Представив его несколько иначе:

$$\ln q = \ln a + b \left(\ln \frac{\Phi}{\Phi_0} + \frac{Q}{kT} \right) + p \ln t \quad (3)$$

(где b — константа, полученная как результат некоторого приближения и усреднения), можно в итоге простых преобразований записать критериальное выражение для скрытой энергии:

$$q = a (te^{bKv})^p. \quad (4)$$

Данные работ [4—7] позволяют определить константы $a = 1,68 \cdot 10^{-9}$; $b = 0,4$.

На рис. 1 выражение (4) представлено графически, что в сочетании с декартовым абаком для Kv , T , Φ [2, 3] дает возможность удобно пользоваться зависимостью. Как видно, расхождения с экспериментальными данными [4, 5] незначительны и вполне удовлетворяют практическим требованиям расчетных оценок в границах экспериментальных ошибок измерений всех величин (T , Φ , q).

В связи с известной корреляцией между зависимостями накопления скрытой энергии и набухания графита в области невысоких температур от интегрального потока нейтронов и температуры [8—10] можно предполагать о справедливости выражения, аналогичного (4), для набухания:

$$\frac{\Delta V}{V} = a' (te^{b'Kv})^{p'}. \quad (5)$$

Обратное преобразование (5) к виду, аналогичному выражению (2), позволяет провести анализ, подобный работам [6, 7]. Удовлетворительное совпадение теоретических прямых в логарифмических координатах при $a' = 2 \cdot 10^{-6}$; $b' = 0,4$; $p' = 0,3$ с экспериментальными результатами [10—12] подтверждает предположение о справедливости выражения (5), достоинством которого является связь распухания графита с параметрами облучения, такими, как плотность нейтронного потока и температура, включаемыми в критерий Курчатова.

Необходимо подчеркнуть, что здесь рассматривается плотность повреждающего потока нейтронов, определяемая по любому нейтронному спектру по принципу одинакового повреждающего эффекта [13, 14]. Наряду с расчетной привязкой к этой универсальной шкале в случае известного нейтронного спектра [15] возможна экспериментальная привязка, не требующая знания спектра [2].

Применение критериальных выражений (4) и (5) ограничено областью значений критерия Kv от 50 до 70, соответствующего диапазону плотностей потока $10^{12}—10^{14}$ нейтр/см²·сек и невысоких температур облучения до 300° С, где справедлива концепция эквивалентных температур и доз [1]. Для этой области известна величина $Q = 1,2$ эв. Чрезвычайный интерес представляет развитие аналогичных, удобных для практики критериальных выражений радиационного изменения удельного объема для области высоких температур. Однако здесь пока не установлены зависимости изменений от всех параметров облучения.

Формулы (4) и (5) вносят уточнение в прежние выражения зависимости радиационных повреждений графита при невысоких температурах от интегрального потока нейтронов, когда за ось абсцисс принималась экспозиционная доза в виде интегрального нейтронного потока (или переноса нейтронов) Φt , а параметрами кривых являлись температура облучения T и плотность потока нейтронов Φ . Такое выражение дает на графиках сложное семейство кривых. Поскольку множители Φ и t в соответствии с концепцией эквивалентных температур не могут входить равнозначно в произведение Φt , правильным и наиболее удобным выражением зависимости от интегрального потока нейтронов является график со временем экспозиции по оси абсцисс и с критерием подобия Kv в качестве параметра (см. рис. 1). Из (4) и (5) можно сделать и другой интересный вывод о выражении в виде $D = te^{0,4Kv}$ повреж-

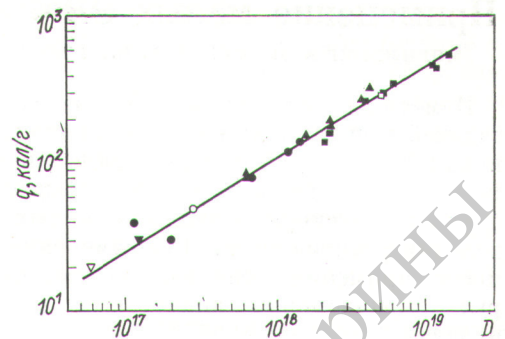


Рис. 2. Дозная зависимость накопления скрытой энергии в графите. Доза $D = te^{0,4Kv}$. Прямая — по формуле (4), точки — по экспериментам работ [4, 5]. (Обозначения те же, что на рис. 1.)

дающей дозы, получаемой облучаемым графитом в реакторах при различных условиях. Все экспериментальные точки хорошо ложатся на одну кривую (рис. 2). Ввиду простоты получаемой на этих графиках дозно-температурной зависимости может быть при необходимости легко введен какой-либо дополнительный параметр, например различие в марках графита.

Поступила в Редакцию 25/IV 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bridge H. e.a. Radiation Damage in Reactor Materials. Vienna, IAEA, 1963, p. 531.
2. Клименков В. И., Дворецкий В. Г. «Атомная энергия», 1973, т. 34, вып. 2, с. 93.
3. Клименков В. И. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Радиационное материаловедение. Методы и техника облучения в реакторах. Димитровград, изд. НИИАР, 1973, вып. 1, с. 33.
4. Клименков В. И., Завгородний А. Я. «Атомная энергия», 1961, т. 11, вып. 2, с. 126.
5. Bell J. e.a. «Phil. Trans. Roy. Soc.», 1962, v. 254, p. 361.
6. Wooley R. Lab. Berkeley Rep. PD/B-115, 1963.
7. Wooley R. «Brit. J. Appl. Phys.», 1963, v. 14, p. 778.
8. Клименков В. И., Золотухин В. Р. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 2, с. 231.
9. Клименков В. И., Золотухин В. Р. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 5, с. 506.
10. Брохович Б. В. и др. II Женевская конференция (1958). М., Атомиздат, 1959, т. 2, с. 319.
11. Perks A., Simmons J. «Carbon», 1965, v. 4, p. 85.
12. Клименков В. И. и др. В кн.: Радиационная физика твердого тела и реакторное материаловедение. М., Атомиздат, 1970, с. 240.
13. Клименков В. И., Кирсанов В. В. В кн.: Дозиметрия интенсивных потоков ионизирующих излучений. Ташкент, «Фан», 1969, с. 78.
14. Клименков В. И., Дворецкий В. Г. В кн.: Тезисы докл. IV Всесоюзного координационного совещания по дозиметрии интенсивных потоков ионизирующих излучений. М., изд. ВНИИФТРИ, 1971, с. 116.
15. Клименков В. И. В кн.: Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М., «Стандарты», 1972, т. 2, с. 175.