УДК 621.039.532.21

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГРАФИТА ГР-280, ОБЛУЧЁННОГО ДО ВЫСОКОГО ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ

Покровский А.С., Белан Е.П., Харьков Д.В.

АО «ГНЦ НИИАР», Димитровград, e-mail: harkov@niiar.ru

В работе представлены экспериментальные зависимости коэффициента теплопроводности графита ΓP -280 от флюенса нейтронов в интервале 5-32· 10^{25} м $^{-2}$ и температуры облучения в диапазоне 450-650 °C. Коэффициент теплопроводности определяли методом лазерной вспышки. Измерения были выполнены при температуре, равной температуре облучения. В интервале флюенсов нейтронов 5-15· 10^{25} м $^{-2}$ коэффициент теплопроводности значительно не меняется, а при флюенсах выше 15· 10^{25} м $^{-2}$ – уменьшается с увеличением флюенса. С увеличение температуры облучения коэффициент теплопроводности уменьшается. С использованием доступных экспериментальных данных создана аналитическая зависимость коэффициента теплопроводности от флюенса и температуры облучения в области флюенса нейтронов выше критического. Отмечено хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений коэффициента теплопроводности в интервале температур облучения 400–800 °C.

Ключевые слова: графит, нейтронное облучение, удельная теплоёмкость, теплопроводность

THERMAL CONDUCTIVITY OF GRAPHITE GR-280 EXPOSED TO HIGH FLUENCE Pokrovskiy A.S., Belan E.P., Kharkov D.V.

Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad, e-mail: harkov@niiar.ru

The thermal conductivity has been studied by method of laser flash. The object of research is GR-280 graphite irradiated by fast neutrons at a BOR-60 reactor. The graphite is manufactured by standard electrode technology. The samples were irradiated in a flux of $1,5\cdot10^{19}~\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ at temperature of 450 and 650 °C. The fluence was 5–32· $10^{25}~\text{m}^{-2}$. Measurements have been made at temperature, equal irradiation temperature. In the fluence interval of $5-15\cdot10^{25}~\text{m}^{-2}$ the thermal conductivity considerably does not change, at fluence above $15\cdot10^{25}~\text{m}^{-2}$ – decreases with increase of fluence. With increase of irradiation temperature the thermal conductivity decreases. With use of available experimental data the analytical dependence of thermal conductivity in the range of fluence higher critical is created (critical fluence – neutron fluence when the volume of graphite after shrinkage and swelling came back to its initial value). Good coincidence of the experimental and design values of thermal conductivity in the interval of irradiation temperatures of 400-800 °C is noted.

Keywords: graphite, neutron irradiation, specific heat, thermal conductivity

Реакторный графит ГР-280 широко используется в качестве материала кладки активной зоны в уран-графитовых реакторах, в частности, в энергетических реакторах типа РБМК. Для обоснования работоспособности кладок этих реакторов были проведены исследования по влиянию реакторного облучения на размерную стабильность, механические и теплофизические свойства графита ГР-280 в интервале флюенсов $0,1-22\cdot10^{25}\,\mathrm{m}^{-2}$ (здесь и далее для $E > 0.18 \text{ M} \cdot \text{B}$) при температурах до 550°С [4]. Было показано, что реакторное облучение приводит к сильной деградации теплопроводности графита, особенно быстрое падение теплопроводности наблюдается при облучении до малых флюенсов нейтронов ($1 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2}$). При флюенсах около $5 \cdot 10^{25} \, \text{м}^{-2}$ наблюдается стабилизация значений теплопроводности, однако при увеличении флюенсов до $15 \cdot 10^{25} \,\mathrm{m}^{-2}$ скорость падения теплопроводности демонстрирует тенденцию к увеличению.

В связи с повышением срока эксплуатации реакторов и, как следствие, с плани-

руемым увеличением предельного флюенса нейтронов представляет интерес изучение теплопроводности при облучении графита до более высоких флюенсов $35 \cdot 10^{25} \,\mathrm{m}^{-2}$ с одновременным повышением температуры облучения до 650°C, которая достижима в графитовых блоках наиболее энергонапряжённых каналов [5]. Кроме того, массив имеющихся результатов имеет тот недостаток, что из-за сложности высокотемпературных измерений коэффициента теплопроводности большинство результатов было получено при температурах измерения, не совпадающих с температурой облучения, что снижало достоверность результатов при рабочих температурах, полученных путем экстраполяции. В работе представлены экспериментальные зависимости коэффициента теплопроводности графита ГР-280 от флюенса нейтронов в интервале $5-32 \cdot 10^{25}$ м $^{-2}$ и температуры облучения в диапазоне 450-650°C, а также выбрано аналитическое выражение для расчета коэффициента теплопроводности образцов в области высоких флюенсов нейтронов.

Материалы и методы исследования

Образцы графита марки Γ P-280, представляющие собой таблетки размером \emptyset 8×5 мм и \emptyset 6×2 мм, были вырезаны методом электроискровой резки из прямоугольных блоков, полученных по стандартной электродной технологии, подробно описанной в работах [1, 10]. Вырезку осуществляли таким образом, чтобы оси таблеток располагались параллельно оси выдавливания блоков (образцы параллельной вырезки).

Образцы графита были облучены в реакторе БОР60 до флюенса нейтронов $5-32\cdot10^{25}$ м⁻² (E>0.18 МэВ) при температурах 450-650 °C.

Коэффициент теплопроводности образцов рассчитывали по формуле [5]:

$$\lambda = a \cdot \rho \cdot c_{n},\tag{1}$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\mathrm{Br}/(\mathrm{M}\cdot\mathrm{K}); a$ – коэффициент температуропроводности, $\mathrm{M}^2/\mathrm{c}; \rho$ – плотность, $\mathrm{Kr}/\mathrm{M}^3; c_n$ – удельная теплоемкость, $\mathrm{Д}\mathrm{ж}/(\mathrm{Kr}\cdot\mathrm{K}).$

Коэффициент температуропроводности измеряли на таблетках размером Ø8×5 мм методом лазерной вспышки на установке LFA 427 в соответствии со стандартом ASTM С 714-72 [11], погрешность измерения составляла 5 %.

Измерение удельной теплоемкости проводили на таблетках размером Ø6×2 мм методом дифференциальной сканирующей калориметрии на установке DSC 404 F1. Измерения проводили в среде аргона, скорость нагрева составляла 20°С/мин.

Плотность образцов измеряли геометрическим методом с погрешностью 5 %.

Результаты исследования и их обсуждение

На графиках (за исключением рис. 1) и в тексте приведены коэффициенты теплопроводности, измеренные при температуре, равной температуре облучения, а флюенсы указаны для нейтронов с энергией выше 0,18 МэВ.

Зависимость коэффициента теплопроводности исходного графита ($\lambda_{\text{исх}}$) от температуры испытания ($T_{\text{исп}}$) приведена на рис. 1. При $T_{\text{исп}} = 20\,^{\circ}\text{C}$ значение $\lambda_{\text{исх}}$ со-

ставляет 125 Вт/м·К, с увеличением $T_{\text{исп}}$ до 1200°С оно уменьшается приблизительно в 2,7 раза. Высокое абсолютное значение $\lambda_{\text{исх}}$ при $T_{\text{исп}} = 20$ °С, а также тот факт, что максимальное значение $\lambda_{\text{усх}}$ находится ниже комнатной температуры (учитывая, что зависимость коэффициента теплопроводности графита от $T_{\text{исп}}$ имеет форму купола), свидетельствует о чистоте графита и совершенстве его кристаллической структуры [2, 3].

На рис. 1 представлены также зависимости удельной теплоемкости исходного и облучённого графита ($c_{\rm рисx}$ и $c_{\rm poбл}$) от температуры испытания. Как видно из графика, облучение не оказывает значительного влияния на величину удельной теплоемкости, так как в пределах погрешности эксперимента $c_{\rm pucx}$ и $c_{\rm poбл}$ совпадают. Поэтому далее при расчёте коэффициента теплопроводности облучённых образцов ($\lambda_{\rm oбл}$) по формуле (1) использовали $c_{\rm pucx}$. Слабое влияние реакторного облучения на с графита ранее также отмечали в работе [3].

После облучения теплопроводность графита уменьшается. Как видно из рис. 2, величина относительного изменения коэффициента теплопроводности $\Delta \lambda/\lambda_{\text{исх}} = (\lambda_{\text{обл}} - \lambda_{\text{исх}})/\lambda_{\text{исх}}$ немонотонно спадает с возрастанием флюенса нейтронов для всех температур облучения $(T_{\text{обл}})$.

Для всех температур облучения можно выделить три интервала флюенса нейтронов (γ), в которых зависимость от него коэффициента теплопроводности различается: 1-й интервал — это интервал малых флюенсов (до $5\cdot10^{25}$ м $^{-2}$), где наблюдается резкое падение величины $\Delta\lambda/\lambda_{\text{нсх}}$; 2-й интервал — это интервал промежуточных флюенсов ($5\cdot10^{25}$ – $15\cdot10^{25}$ м $^{-2}$), где изменение $\Delta\lambda/\lambda_{\text{нсх}}$ незначительно; и 3-й интервал — это интервал флюенсов выше $15\cdot10^{25}$ м $^{-2}$, где вновь начинается ускорение темпов падения λ .

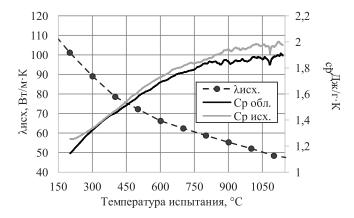


Рис. 1. Зависимость удельной теплоёмкости исходного и облучённого графита ΓP -280 ($T_{oбs} = 450$, флюенс $16\cdot 10^{25}\,\mathrm{M}^{-2}$) и коэффициента теплопроводности исходного графита от температуры испытания

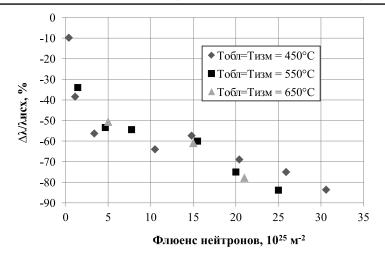


Рис. 2. Зависимость от флюенса нейтронов относительного изменения коэффициента теплопроводности графита ГР-280

Общепринято, что на первой стадии происходит падение λ за счет ускоренного накопления радиационных дефектов [2, 3], в данном случае вакансий и их малых комплексов. На второй стадии имеет место стабилизация концентрации дефектов изза возрастающего количества стоков. Такое изменение λ является типичным для большинства материалов под облучением. Появление третьей стадии, связанной с ускоренным падением величины λ , является специфическим эффектом, характерным для графита.

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры облучения $\lambda_{\text{обл}}(T_{\text{обл}})$ представлена на рис. 3. Зависимость $\lambda_{\text{обл}}(T_{\text{обл}})$ для флюенса $0.5\cdot10^{25}$ м $^{-2}$ построена с привлечением экспериментальных данных из работы [9]. При облучении образцов до флюенса меньше $5\cdot10^{25}$ м $^{-2}$ ве

личина $\lambda_{\text{обл}}$ увеличивается с увеличением $T_{\text{обл}}$, а при облучении образцов до флюенса больше $5\cdot 10^{25}$ м $^{-2}$ — наоборот, уменьшается. Так, при облучении до флюенса $15\cdot 10^{25}$ м $^{-2}$ величина $\lambda_{\text{обл}}$ уменьшается на $50\,\%$, а при облучении до флюенса $0,5\cdot 10^{25}$ м $^{-2}$ увеличивается на $10\,\%$ при увеличении $T_{\text{обл}}$ от 450 до $650\,^{\circ}$ С.

Увеличение теплопроводности с увеличением $T_{\text{обл}}$, которое наблюдается при малых флюенсах, находится в соответствии с существующими представлениями, что увеличение $T_{\text{обл}}$ приводит к дополнительному отжигу радиационных дефектов и, следовательно, к увеличению $\lambda_{\text{обл}}$. Уменьшение $\lambda_{\text{обл}}$ при увеличении $T_{\text{обл}}$ наблюдаемое на образцах графита, облучённых до высокого флюенса, по нашему мнению, является специфическим эффектом, присущим графиту.

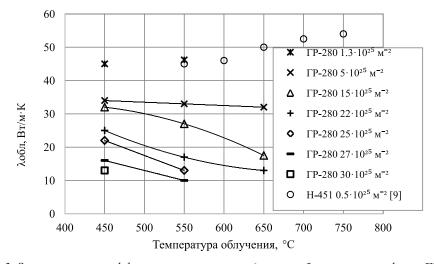


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности облучённого графита ГР-280 от температуры облучения

Мы полагаем, что причиной упомянутых выше особенностей изменения теплопроводности в зависимости от флюенса и температуры облучения при больших флюенсах является накопление микротрещин, образующихся в графите из-за значительного радиационного анизотропного изменения размеров кристаллитов, которые приводят к большим внутренним напряжением и растрескиванию графита.

В пользу того, что поведение λ графита в области высоких флюенсов контролируется трещинообразованием, свидетельствуют данные рис. 4, где сопоставляются зависимости от флюенса нейтронов относительного изменения коэффициента теплопроводности ($\Delta\lambda/\lambda_{\text{ucx}}$) и относительного изменения объема образца ($\Delta V/V_{\rm ucx}$), полученные в данной работе и приведённые в работе [5] соответственно. Образцы были взяты из одной партии и облучались в одних и тех же условиях. Ускоренный рост $V_{\rm off}$ при облучении образцов до флюенсов выше 20.10^{25} м⁻² вызван активным зарождением и ростом микротрещин [5]. В этом же диапазоне флюенсов (от $20 \cdot 10^{25}$ м⁻² и выше), как видно из рис. 4, происходит и ускоренное падение $\lambda_{\text{обл}}$

Аналитическое описание зависимости теплопроводности от параметров облучения

Прямой расчет коэффициента теплопроводности облучённого графита от флюенса нейтронов и температуры облучения на данный момент невозможен ввиду недостатка знаний о радиационных дефектах и процессах рассеяния фононов на различных препятствиях. В настоящее время предпринимаются попытки создания полуэмпирической зависимости величины $\lambda_{\text{обл}}$ от параметров облучения с использованием базы уже имеющихся экспериментальных результатов.

Наиболее известным является выражение, представляющее собой модификацию фундаментального уравнения Дебая для рассеяний тепла в материале по фонон-фононному механизму, предложенное в работе [7]:

$$\lambda_{\text{OGJI}} = R \cdot \beta \cdot \left(\frac{1}{K_U} + \frac{1}{K_{GB}}\right)^{-1}, \qquad (2)$$

где $\lambda_{\text{обл}}$ — коэффициент теплопроводности облучённого графита; β — структурный множитель, учитывающий пористость, ориентацию образца и др. (для большинства марок реакторного графита он не зависит от температуры и равен 0,6); K_u , R и K_{GB} — коэффициенты, учитывающие фонон-фононное рассеяние, рассеяние фононов на дефектах решетки и на границах зерен соответственно.

Зависимости R, K_{GB} и K_u от температуры облучения и флюенса были определены экспериментально из широкого массива данных [8, 12, 13]. Используя эти зависимости и уравнение (2), авторы рассчитали коэффициенты теплопроводности образцов, облучённых до флюенса $5\cdot10^{25}$ м $^{-2}$ и выше при температурах $450-700\,^{\circ}\mathrm{C}$ (рис. 5). Сравнение рассчитанных значений $\lambda_{oбn}$ с экспериментальными, полученными в данной работе, показывает их принципиальное отличие.

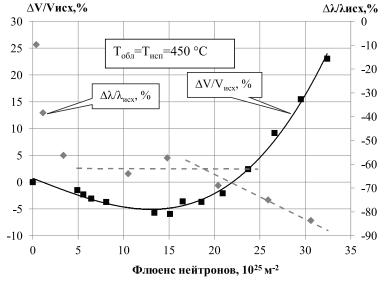


Рис. 4. Зависимость от флюенса нейтронов относительного изменения коэффициента теплопроводности и относительного изменения объёма образцов графита ГР-280, облучённого при 450°C

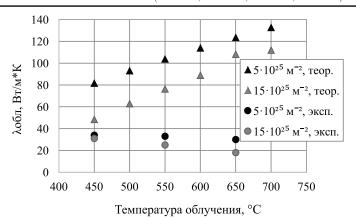


Рис. 5. Зависимость теоретических (рассчитанных по формуле (2)) и экспериментальных значений коэффициента теплопроводности облучённого графита ГР-280 от температуры облучения

Причиной этого мы считаем тот факт, что для формирования выражения $R(\gamma, T_{\text{обд}})$ использовался массив данных, полученный при малых флюенсах (до 1 сна), и поэтому оно не учитывает интенсивное образование в графите микротрещин при высоких флюенсах.

Для оценки коэффициента теплопроводности при высоких флюенсах, по нашему мнению, более перспективным представляется уравнение, предложенное в работе [6], которое связывает изменение коэффициента теплопроводности с распуханием образца при облучении:

$$\lambda_{\text{обл}} = \frac{\lambda_{\text{исх}}}{S(T) + A \cdot V_R(\gamma, T) \cdot (\gamma - \gamma_{\text{кр}}) + 1}; \quad (3)$$

$$V_R(\gamma, T) = \left(\frac{\Delta V}{V_{\text{HCX}}}(\gamma) \middle/ \left(\frac{\Delta V}{V_{\text{HCX}}}\right)_{\text{min}}\right)_T - 1, \quad (4)$$

где $\lambda_{_{\rm исх}}, \lambda_{_{\rm обл}}$ — коэффициент теплопроводности исходного и облучённого графита; $V_{_{\rm исх}}$ — исходный объём образца; S — относительное изменение термосопротивления $(1/\lambda_{_{\rm обл}})$ в интервале флюенсов, где зависимость коэффициента теплопроводности от флюенса выходит на плато (2 стадия); γ — флюенса выходит на плато (2 стадия); γ — критический флюенс (флюенс, при котором объем образца после стадии усадки возвращается к своему исходному значению), 10^{25} мг²; $\Delta V/V_{_{\rm исх}}$ — относительное изменение объема образца при $T_{_{\rm обл}}$; $(\Delta V/V_{_{\rm исх}})_{_{\rm min}}$ — минимальное относительное изменение объема образца при $T_{_{\rm обл}}$; Λ — экспериментальный множитель, равный —0,1.

Для практического использования этой формулы необходимо определить зависимости от параметров облучения отдельных её членов. Данные относительного изменения объема образцов графита ГР-280 под

облучением взяты из работы [5]. Все образцы для измерения объёма и коэффициента теплопроводности относятся к одной партии и облучены в одних и тех же условиях.

Зависимость коэффициента теплопроводности исходного графита от $T_{\text{исц}}$ (рис. 1) можно аппроксимировать функцией

$$\lambda_{\text{nex}} = 16912/T + 35,917. \tag{5}$$

Значения величины S, усреднённые по нескольким маркам реакторного графита [6], а также для графита ГР-280, полученные в данной работе, представлены на ри. 6. В интервале температуры облучения 400– $900\,^{\circ}$ С зависимость $S(T_{\text{обл}})$ описывается линейной функцией

$$S = -0.002 \cdot T + 2.67. \tag{6}$$

Температурные зависимости $\gamma_{\rm kp}$ нескольких марок отечественного и зарубежного реакторного графита, включая наши данные, приведены на рис. 7, из которых видно, что в интервале $T_{\rm oбn}$ от 300 до 850–900°С величина $\gamma_{\rm kp}$ практически линейно спадает с увеличением $T_{\rm oбn}$ и зависимость $\gamma_{\rm kp}$ от $T_{\rm oбn}$ можно описать функцией следующего вида:

$$\gamma_{KD} = -0.033 \cdot T + 37.5.$$
 (7)

Функция $V_{R}(\gamma, T)$ может быть преобразована следующим образом:

$$V_{R}(\gamma, T) = \frac{\Delta V(\gamma, T)}{\gamma - \gamma_{\kappa p}} \cdot \frac{1}{\Delta V_{\min}(T)} \times (\gamma - \gamma_{\kappa p}) - 1 = K \cdot (\gamma - \gamma_{\kappa p}) - 1,$$
(8)

где
$$K = \frac{\Delta V(\gamma, T)}{\gamma - \gamma_{\text{кр}}} \cdot \frac{1}{\Delta V_{\text{min}}(T)}$$
 представляет

собой относительную скорость распухания графита.

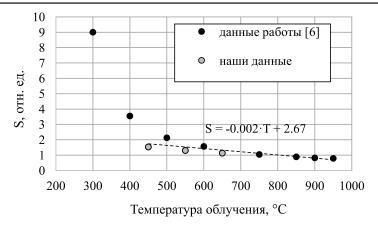


Рис. 6. Зависимость величины S реакторного графита от температуры облучения

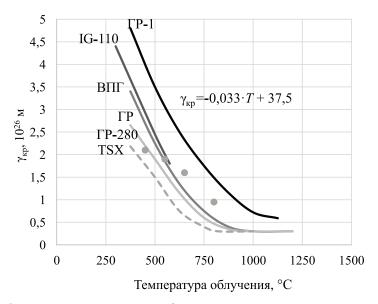


Рис. 7. Зависимость критического флюенса нейтронов реакторного графита от температуры облучения [2]

На рис. 8 а приведены графики зависимости $V_R(\gamma,T)$ от флюенса нейтронов, которые можно аппроксимировать прямыми линиями, что указывает на то, что величина K не зависит от флюенса нейтронов. Зависимость величины K, равной тангенсу угла наклона кривых на рис. 8, а, от $T_{\text{обл}}$, представлена на рис. 8, б и может быть аппроксимирована функцией

$$K = -0.0036 \cdot T + 1.3753.$$
 (9)

Формула (3) с соответствующими уравнениями (4)–(9) представляет собой аналитическую зависимость коэффициента теплопроводности графита ГР-280 от температуры облучения и флюенса нейтронов в области флюенса нейтронов выше критического. График этой зависимости вместе с имеющимися экспериментальными точками приведен на рис. 9. Видно, что с увели-

чением $T_{\text{обл}}$ в интервале 450–800°С, типичном для эксплуатации в реакторах РБМК, величина $\lambda_{\text{обл}}$ резко падает до значений ниже 5 Вт/м·К.

Отметим, что формула адекватно описывает экспериментальные результаты до $T_{\rm oбл}$ 750–800°С. Это связано, по нашему мнению, с тем, что зависимость $\gamma_{\rm kp}$ от $T_{\rm oбл}$ (рис. 7), которую мы считали линейной, при $T_{\rm oбл}$ выше 800°С имеет явную тенденцию к затуханию, и, следовательно, формула (7) должна быть скорректирована с учетом этого эффекта.

Принимая во внимание, что многие марки российских и зарубежных графитов по своей структуре и конечной термообработке аналогичны графиту ГР-280, можно полагать, что полученная аналитическая зависимость может быть полезна при оценке коэффициента их теплопроводности.

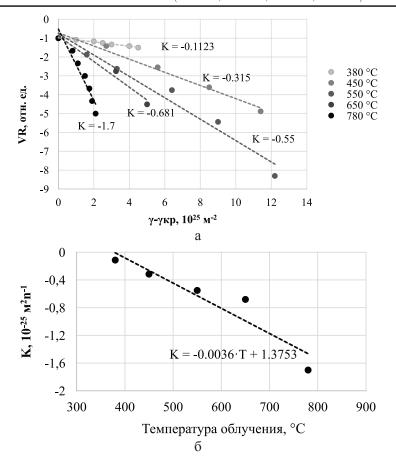


Рис. 8. Экспериментальные точки и график функции $V_{p}(\gamma, T)$: a – общий вид; δ – зависимость углового коэффициента функции $V_{_{D}}(\gamma, T)$ от температуры облучения

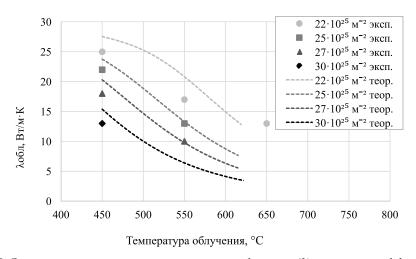


Рис. 9. Экспериментальные и рассчитанные по формуле (3) значения коэффициента теплопроводности облучённого графита ГР-280 в зависимости от температуры облучения. Температура измерения равна температуре облучения

Заключение

1. В работе представлены экспериментальные зависимости коэффициента теплопроводности графита ГР-280 от флюенса нейтронов в интервале $5-32 \cdot 10^{25} \,\mathrm{m}^{-2}$ и температуры облучения в диапазоне 450–650°C.

Измерения $\lambda_{\text{обл}}$ выполнены при $T_{\text{исп}} = T_{\text{обл}}$. 2. На кривой зависимости $\lambda_{\text{обл}}$ от флюенса нейтронов отмечено три стадии: первая стадия $(0-5\cdot10^{25} \text{ м}^{-2})$, характеризующаяся резким

- падением $\Delta\lambda\lambda_{_{\rm исх}}$, составляющим примерно 55%; вторая стадия (5· 10^{25} – $15\cdot10^{25}$ м $^{-2}$), где изменение величины $\Delta\lambda\lambda_{_{\rm исx}}$ незначительно и равняется приблизительно 5%, и третья стадия (выше $15\cdot10^{25}$ м $^{-2}$), где начинается ускоренное по сравнению со второй стадией падение величины $\Delta\lambda\lambda_{_{\rm исx}}$.
- 3. Зависимость теплопроводности от температуры облучения определяется флюенсом нейтронов: при облучении до флюенсов ниже $5\cdot 10^{25}~{\rm M}^{-2}~\lambda_{\rm обл}$ увеличивается с увеличением $T_{\rm обл}$, а при флюенсах выше $5-10\cdot 10^{25}~{\rm M}^{-2}~-$ уменьшается. Уменьшение коэффициента теплопроводности в интервале температур облучения $450-650\,{}^{\circ}{\rm C}$ при флюенсе $22\cdot 10^{25}~{\rm M}^{-2}$ достигает $50\,\%$.
- 4. Приведены аргументы того, что специфические эффекты, обнаруженные в характере зависимости теплопроводности от флюенса и температуры облучения при флюенсах больше критического, являются следствием накопления в графите под облучением микротрещин, которые образуются из-за значительного анизотропного изменения размеров кристаллитов.
- 5. Для аналитического описания полученных результатов было применено выражение, связывающее изменение коэффициента теплопроводности с распуханием образцов при облучении до флюенса нейтронов выше критического. С использованием доступных экспериментальных данных рассчитаны необходимые коэффициенты и построены расчетные зависимости $\lambda_{\text{обл}}$ от флюенса и температуры облучения. Отмечено хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений коэффициента теплопроводности в интервале температур облучения $400-850\,^{\circ}\text{C}$.

Список литературы

- 1. Вяткин С.Е. Ядерный графит / С.Е. Вяткин и др. М.: Атомиздат, 1967. 280 с.
- 2. Виргильев Ю.С. Реакторный графит: разработка, производство и свойства / Ю.С. Виргильев и др. // Российский химический журнал (ЖРХО им. Д.И. Менделеева). -2006.-T.50, № 1.-C.4-12.
- 3. Гончаров В.В. Действие облучения на графит ядерных реакторов / В.В. Гончаров и др. М.: Атомиздат, 1978. 272 с.
- 4. Нормы расчета на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых канальных реакторов НГР-01-90, № Е-230-2536. М.: НИКИЭТ, НИИграфит, ИАЭ, ЧПИ, 1991. 255 с.
- 5. Харьков Д.В. Влияние высокодозного нейтронного облучения на изменение физических свойств реакторного графита: дис. ... канд. техн. наук. Димитровград. 2011. 71 с.

- 6. Haag, G. Properties of ATR-2E Graphite and Property Changes due to Fast Neutron Irradiation // Report No. Jul-4183 (Jülich, Germany, 2005). Jülich, Germany, 2005. P. 148.
- 7. Kelly B.T. // Chemistry and Physics of Carbon. 1969. Vol. 5. P. 119.
- 8. Maruyama T. Neutron irradiation effects on the thermal conductivity and dimensial change of graphite materials / T. Maruyama and M. Harayama // J. Nucl. Mat. 1992. Vol. 195. P. 44.
- 9. Mohanty S. HTGR Graphite Core Component Stress / S. Mohanty and S. Majumdar // Technical Letter Report (Washington, September 2011). Washington, 2011. P. 115.
- $10.\ Nightingale\ R.\ Nuclear\ graphite. London: Academic\ Press, <math display="inline">1962.-547\ p.$
- 11. Parker W.J. Flash method of Determining Thermal Diffusiviy, Heat Capacity and Thermal Conductivity // Journal of Applied Physics. 1961. Vol. 32. P. 1679.
- 12. Taylor R. The thermal conductivity of fast neutron irradiated graphite / R. Taylor, B.T. Kelly and K. E. Gilchrist // J. Phys. Chem. Solids. 1969. Vol. 30. P. 2251.
- 13. Wu C.H. Neutron Irradiation Effects on the Properties of Carbon Materials / C.H. Wu, J.P. Bonal and B. Thiele // J. Nucl. Mat. -1994. Vol. 212–215. P. 1168.

References

- 1. Vyatkin S.E., Deev A.E., Nagornyy V.G., Ostrovskiy V.S., Sigarev A.M., Sokker G.A. Yadernyy grafit. Moskva, 1967.
- 2. Virgilev Yu.S., Seleznev A.N., Sviridov A.A., Kalyagina I.P. Reaktornyy grafit: razrabotka, proizvodstvo i svoystva. Rossiyskiy khimicheskiy zurnal (ZRKHO im. D. I. Mendeleeva). 2006. T. 50, no. 1. pp. 4–12.
- 3. Goncharov V.V., Burdakov N.S., Virgilev Yu.S., Karpukhin V.I., Platonov P.A. Deystvie oblucheniya na grafit yadernykh reaktorov. Moskva. Atomizdat, 1978. 272 p.
- 4. Normy rascheta na prochnost tipovykh uzlov i detaley iz grafita uran-grafitovykh kanalnykh reaktorov NGR-01-90, no. E-230-2536. Moskva. NIKIET, NIIgrafit, IAE, CHPI, 1991. 255 p.
- 5. Kharkov D.V. Vliyanie vysokodoznogo neytronnogo oblucheniya na izmenenie fizicheskikh svoystv reaktornogo grafita: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Dimitrovgrad. 2011. 71 p.
- 6. Haag G. Properties of ATR-2E Graphite and Property Changes due to Fast Neutron Irradiation. Report no. Jul-4183 (Jülich, Germany, 2005). Jülich, Germany, 2005. pp. 148.
- 7. Kelly B.T. Chemistry and Physics of Carbon. 1969. Vol. 5. pp. 119.
- 8. Maruyama T., Harayama M. Neutron irradiation effects on the thermal conductivity and dimensial change of graphite materials. J. Nucl. Mat. 1992. Vol. 195. pp. 44.
- 9. Mohanty S., Majumdar S. HTGR Graphite Core Component Stress. Technical Letter Report (Washington, September 2011). Washington, 2011. pp. 115.
- $10.\ Nightingale\ R.\ Nuclear graphite.\ London: Academic\ Press, 1962.\ 547\ p.$
- 11. Parker W.J. Flash method of Determining Thermal Diffusiviy, Heat Capacity and Thermal Conductivity. Journal of Applied Physics. 1961. Vol. 32. pp. 1679.
- 12. Taylor R., Kelly B.T., Gilchrist K.E. The thermal conductivity of fast neutron irradiated graphite. J. Phys. Chem. Solids. 1969. Vol. 30. pp. 2251.
- 13. Wu C.H., Bonal J.P., Thiele B. Neutron Irradiation Effects on the Properties of Carbon Materials. J. Nucl. Mat. 1994. Vol. 212–215. pp. 1168.