Uzbek Journal of Physics
DOI: https//doi.org/10.52304/.v25i2.430

Исследование электропроводности графита марки С-4 в зависимости от флюенса быстрых нейтронов

Ш.А. Аликулов*, С.А. Байтелесов, Ф.Р. Кунгуров, И.И. Садиков, Д.П. Таджибаев, Д.Д. Тожибоев

Институт ядерной физики АН РУз, Мирзо Улугбекский район, пос. Улугбек, ул. Хорасан 1, 100214, Ташкент, Узбекистан

Получена12.06.2023. revised16.06.2023 г.

* Corresponding author: e-mail alikulov@inp.uz. Phone: (8)-371-289-20-07

Исследована электропроводность графита марки С-4, облученного быстрыми нейтронами флюенсом 2.22×10^{19} н/см^2 в диапазоне температур 298–448 К. Установлена нелинейная зависимость электропроводности от дозы и температуры. Показано, что, чем больше доза облучения графита и чем больше флюенс нейтронов, тем больше уменьшается электропроводность материала.

Ключевые слова: теплопроводность, графит марки С-4, быстрые нейтроны, флюенс, доза.

The electrical conductivity of C-4 grade graphite irradiated by fast neutrons with a fluence of 2.22×10^{19} n/cm^2 in the temperature range of 298–448 K has been studied. A nonlinear dependence of the electrical conductivity on dose and temperature has been established. It is shown that the greater the dose of graphite irradiation and the greater the neutron fluence, the greater the decrease in the electrical conductivity of the material.

Keywords: thermal conductivity, C-4 grade graphite, fast neutrons, fluence, dose.

I. Введение

Развитие ядерной техники идет в направлении увеличения энерго- и теплонапряжённости, интенсивности радиационного воздействия на отдельные элементы конструкции ядерной реакторов, что выдвигает повышенные требования к используемым конструкционным материалам. В ряду других, углеграфитовые материалы находят все более широкое применение в ядерной технике, причем не только в качестве материала кладок, но и для элементов конструкции, например, для оболочек и матриц шаровых твэлов, покрытий микротвэлов в ВТГР, экранов в ТЯР и т.п. В зависимости от условия работы (флюенса нейтронов, интенсивности и температуры облучения) требования к материалам для этих установок существенно отличаются от обычных требований к ядерному графиту [1, 2]. Исследования в области изучения различных свойств графита при облучении нейтронами проводятся в мире уже много лет, и этому посвящено немало публикаций [3-23].

Дефекты структуры сложным образом влияют на электронные свойства графитоподобных материалов. Так, дефекты в слое, с одной стороны, являются ловушками электронов и создают избыточную концентрацию дырочных носителей, с другой стороны, они становятся эффективными центрами рассеяния носителей заряда и значительно снижают их подвижность. Если эффект снижения подвижности преобладает над эффектом увеличения концентрации носителей заряда (как, например, у облученных графитов), то сопротивление повышается. В образцах графита, кроме дефектности структуры и микрогетерогенности, на электропроводность заметное влияние оказывают такие макроскопические факторы, как текстурированность, пористость, трехмерные дефекты, а также изменение концентрации примесей.

В работах [24, 25] рассматривается возможность использования углерод-углеродных композиций в качестве оболочек материалов твэлов для перспективных высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (учитывая ограниченность возможностей обычных ядерных графитов и матричных материалов на их основе). Интересным представляется возможность использования углеродных композиционных материалов и для первой стенки термоядерного реактора, диафрагм, промежуточных экранов, отделяющих первую стенку от плазмы [26].

Реакторный графит широко используется в качестве материала кладки активной зоны в уран-графитовых реакторах, в частности, в энергетических реакторах типа РБМК.

Было показано, что реакторное облучение приводит к сильной деградации электропроводности графита; особенно быстрое падение электропроводности наблюдается при облучении малыми флюенсами нейтронов.

В работе представлены экспериментальные зависимости электропроводности графита С-4 от флюенса нейтронов 2.22×10^{19} н/см^2.

II. Материалы и методика эксперимента

Были подготовлены образцы графита марки С-4 диаметром ∅=12 мм, высотой h=3.64 мм и массой 1.3 г. Образцы графита были облучены в реакторе ВВР-СМ в вертикальном канале 8–2 до флюенса нейтронов 2.22×10^{19} н/см^2 (E>0.8 МэВ) при температуре 323 К (рис. 1).

Спектр нейтронов, выделяющихся в процессе деления, находится в широком энергетическом интервале от небольших энергий до 25 МэВ, который рассчитан по методике, описанной в [27]. Средняя энергия нейтронов деления составляет примерно 2 МэВ, а наиболее вероятная – 0.72 МэВ. Выше 3 МэВ с ростом энергии нейтронов поток нейтронов уменьшается почти экспоненциально. Плотность потока быстрых нейтронов (E_n>0.8 МэВ) в канале составляла 5.22×10^{12} н/(см^{2}с), время облучения образцов в канале – 1182 час.

Температура в канале поддерживалась около 318 К. Отвод тепла, выделяющегося вследствие радиационного нагрева, осуществлялся за счет циркуляции воды первого контура с объемной скоростью 1250 м^3/час

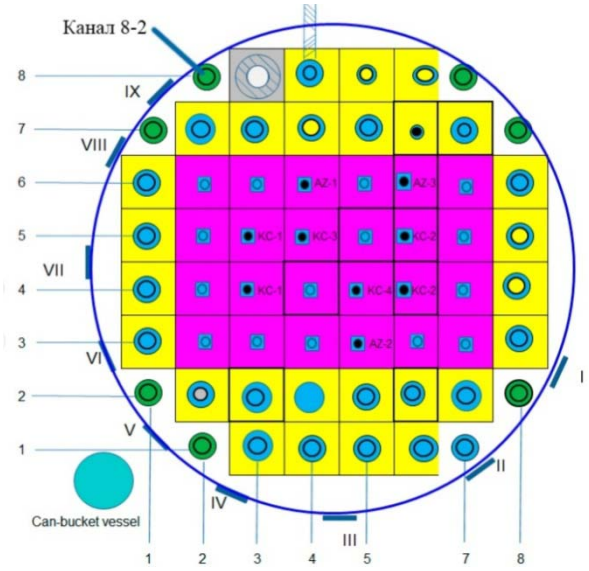


Рисунок 1. Активная зона реактора ВВР-СМ и местоположение канала 8-2, где облучались образцы САВ-1.

III. Результаты измерения электропроводности

Метод измерения электропроводности образцов основан на использовании четырехзондового компенсационного метода (установка микроомметр типа 3207) [28].

Микроомметр типа 3207 – это цифровой микроомметр с 4½ разрядным светодиодным дисплеем, способный измерять низкое сопротивление с разрешением 0.1 мкОм, имеет международный сертификат ISO 90001. Этот метод используется для устранения влияния сопротивления выводов на точность измерений.

Величину электрического сопротивления образцов графита измеряли четырехзондовым компенсационным методом. Удельное электрическое сопротивление ρ определяли из соотношения:

$$\rho = \frac{RS}{L}$$

где R – сопротивление образца, S и L –поперечное сечение и длина образца соответственно.

Зависимость электрического сопротивления образцов графита от температуры исследовали с помощью печи электросопротивления в диапазоне 298–448 К. Температуру в печи меняли со скоростью 2–5 К/мин и контролировали хромель-алюмелевой термопарой. Измерения проводили в

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

режиме нагревания и охлаждения через 25 K с выдержкой 30 мин в каждой точке измерения.

На рис. 2 приведены результаты измерений удельного сопротивления необлученного графита марки С-4 в зависимости от температуры образца.

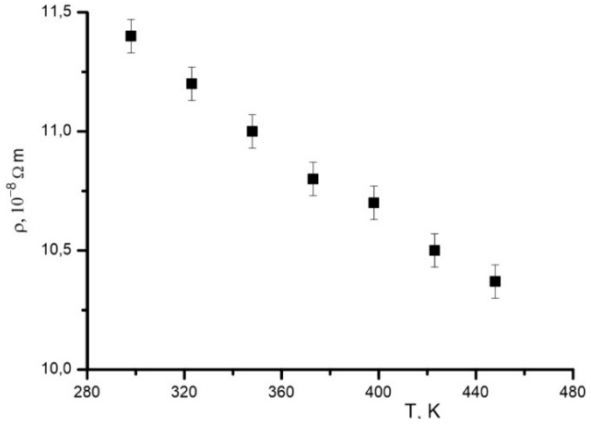


Рисунок 2. Удельное сопротивление необлученного графита марки С-4 в зависимости от температуры образца.

На рис. 3 приведены результаты измерений удельного сопротивления графита марки С-4, облученного флюенсом 2.22×10^{19} н/см^2 в зависимости от температуры образца.

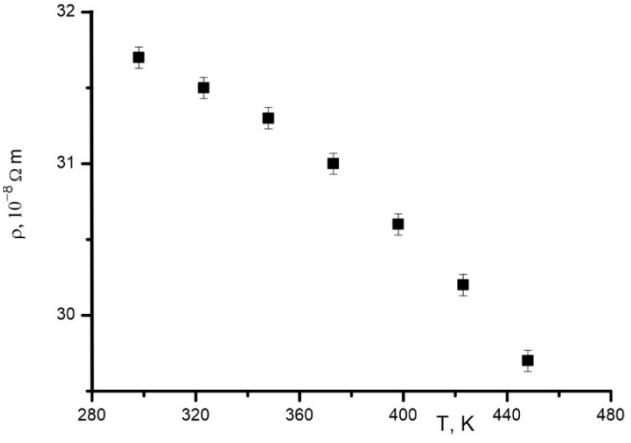


Рисунок 3. Удельное сопротивление графита марки С-4, облученного флюенсом 2.22×10^{19} н/см^2 в зависимости от температуры образца

На рис. 4 приведены результаты измерений удельного сопротивления графита марки С-4, облученного флюенсом 2.22×10^{19} н/см^2 в зависимости от набранного образцом флюенса нейтронов.

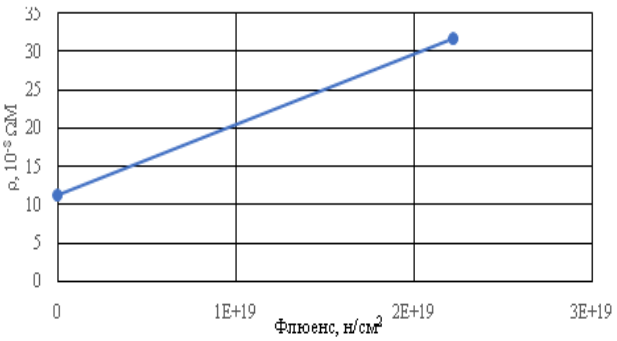


Рисунок 4. Удельное сопротивление графита марки С-4, облученного флюенсом 2.22×10^{19} н/см^2 в зависимости от набранного образцом флюенса нейтронов.

IV. Анализ экспериментальных данных

До облучения величина удельного сопротивления графита марки С-4 при комнатной температуре составляла 1.14×10^{-7} Ом·м. В результате облучения величина удельного сопротивления графита марки С-4 увеличилась в 2.78 раза и составила 3.17×10^{-7} Ом·м. Увеличение удельного сопротивления обусловлено образованием дефектов в результате облучения образцов быстрыми нейтронами в активной зоне реактора ВВР-СМ. Уменьшение удельного сопротивления образца в зависимости от температуры наблюдалось в интервале от 298 К до 423 К.

V. Заключение

Таким образом, анализ полученных экспериментальных результатов позволил установить, что удельное сопротивление графита изменяется нелинейно от температуры. При увеличении флюенса нейтронов удельное сопротивление графита марки С-4 увеличивается.

Исследована электропроводность графита марки С-4, облученного быстрыми нейтронами флюенсом 2.22×10^{19} н/см^2 в диапазоне температур 298–448 К. Установлена нелинейная зависимость электропроводности от дозы и температуры. Показано, что чем больше доза облучения графита и чем больше флюенс нейтронов, тем больше уменьшается электропроводность материала

Электропроводность графита определяется концентрацией носителей заряда и скорости их перемещения. При облучении графита быстрые нейтроны создают радиационые повреждения в кристаличекой решетке графита, они являются ловушками электронов и создают избыточную

©АкадемиянаукРеспубликиУзбекистан, 2023г.

концентрацию дырочных носителей заряда, понижая валентные зоны графита. Поэтому, чем больше доза облучения, тем больше радиационые повреждения и тем больше уменьшается электропроводность графита.

Метаданные

Investigation of the electrical conductivity of C-4 grade graphite depending on a fluence of fast neutrons

Sh.A. Alikulov, S.A. Baytelesov, F.R. Kungurov, I.I. Sadikov, D.P. Tadjibaev, D.D. Tojiboev

Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of RUz, Mirzo Ulugbek district, Ulugbek township, Khorasan 1, 100214, Tashkent, Uzbekistan

The electrical conductivity of C-4 grade graphite irradiated with fast neutrons with a fluence of 2.22×10^{19} n/cm^2 in the temperature range of 298–448 K has been studied. A nonlinear dependence of the electrical conductivity on dose and temperature has been established. It is shown that the greater the dose of graphite irradiation and the greater the neutron fluence, the greater the decrease in the electrical conductivity of the material.

Keywords: thermal conductivity, C-4 grade graphite, fast neutrons, fluence, dose.

Литература (References)

[1] V.V. Goncharov, V.V. Burdakov, Yu.S. Virgiljev, V.I. Karpuhin, P.A. Platonov. Deistvie obluchenija na grafit yadernykh reaktorov (Moscow, Atomizdat, 1978), 272 str.
[2] P.A. Platonov, D.A. Kuleshov, I.F. Novobratskaja, V.F. Dudinov. Fizika Yadernyh Reaktorov No.5, 105-117 (2016).
[3] A. Ammar, D.A. Young. British Journal of Applied Physics **15**(2), 131 (2002). DOI:10.1088/0508-3443/15/2/303.
[4] A. Celzard, J.F. Marêché, G. Furdin and S. Puricelli. Journal of Physics D: Applied Physics **33**, No.23, 3094 (2000). DOI 10.1088/0022-3727/33/23/313).
[5] D.D.L. Chung. Journal of Materials Science **22**, 4190-4198 (1987).
[6] M. Krzesińska, A. Celzard, J.F. Marêché and S. Puricelli. Journal of Materials Research **16**, No.2, 606-614 (2001).
[7] R.E. Nightingale, H.H. Yoshikawa, H.H.W. Losty. Nightingale (Editor) Nuclear Graphite, Chapter 6, Physical Properties, p.185 (1962).
[8] G. Haag. Forschungszentrum Jülich in der Helmholtz-Gemeinschaft Jül-4183. Oktober 2005 ISSN 0944-2952, pp 151.
[9] G. Haag, W. Delle, N. Kirch, H. Nickel, K. Reinhart, E. Ziermann. Results of the Visual In-pile Inspection of the Inner Graphite Reflector of the AVRю Paper presented at the IAEA Specialists Meeting on Graphite Component Structural Design (Japan Atomic Energy Research Institute, 8-11 1986).
[10] G. Haag, D. Mindermann, G. Wilhelmi, H. Persicke, W. Ulsamer. J. Nucl. Mat. **171**, 41-48 (1990).
[11] M.F. O'Connor, G. Haag, W.P. Eatherly, C.R. Kennedy. Suitability Tests for Reflector Graphites. Preprints CARBON '80, Baden-Baden, 583 (1980).
[12] P. Fraipont: Joint Research Centre, Institute for Advanced Materials/Petten Site, Technical Note, Design and Safety Report P/F1/91/9 (1991).
[13] H. Rother: User manual for WRZ1 (two dimensional heat transfer code), personal communication. J.H. Baard, W.P. Voorbraak. Neutron Metrology in the HFR – Graphite Irradiation D85-54, ECN-CX--91-032).
[14] G. Haag. Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'03) (Córdoba, Spain, 3094, 2003).
[15] D.R. de Halas. Nightingale (Editor) (Nuclear Graphite, Academic Press 1962). Chapter 7, Theory of Radiation Effects in Graphite, p. 195.
[16] R.E. Nightingale, H.H. Yoshikawa, H.H.W. Losty. Nightingale (Editor) Nuclear Graphite. Chapter 10. Radiation Effects on Electrical and Thermal Properties (p.295. Academic Press, 1962),
[17] J.E. Brocklehurst, R.G. Brown. Carbon **7**, 487 (1969).
[18] B.T. Kelly, J.E. Brocklehurst. Proc. 3-rd Conf. On Industrial Carbon and Graphite (S.C.I. London, 363, 1971).
[19] B.T. Kelly, J.E. Brocklehurst. J. Nucl. Mat. **65**, 79-85 (1977).
[20] M.R. Cundy, G. Kleist, D. Mindermann. In the International Conf. on Carbon and Graphite 'CARBONE 84' (Bordeaux, France, July 1984).
[21] B.T. Kelly, A.J.E. Foreman. Carbon **12**, 151 (1974).
[22] G. Haag. Irradiation-Induced Creep in Graphite and Use of Creep Data in Reactor Design. In 1-st International Nuclear Graphite Specialists Meeting (INGSM) (Oak Ridge, Tenn., U.S.A., September 2000).
[23] B.T. Kelly, J.E. Brocklehurst. J. Nucl. Mat. **65**, 79-85 (1977).
[24] Radiation damage in graffiti due to fast neutrons in fission and fusion systems. IAEA, 2000, p.184
[25] P.A. Platonov, Ya.I. Strombakh, V.I. Karpukhin, Yu.S. Virgilyev, O.K. Chugunov, E.I. Trofimchuk. In sbornik statei «Atomno-vodorodnaja energetika i tehnologiya» (Moskva, Energoatomizdat) No.6, 77-128 (1984).
[26] L.V. Sergeeva. Zhurnal «Vestnik Mashinostroenija» № 7, 19-21 (2007).
[27] U.S. Salikhbaev, S.A. Baytelesov, A.A. Dosimbaev, Yu.N. Koblik, U.A. Khalikov, B.S. Yuldashev. Journal of Nuclear and Radiation Physics **1**, No.2, 119-123 (2006).
[28] Instruction manual model 3207 digital micro-ohm meter, (USA, , p. 3, 2011).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

С-4 тоифали графитнинг электр ўтказувчанлигини тез нейтронларнинг флюенсига боғликлигини текшириш

Ш.А. Аликулов, С.А. Байтелесов, Ф.Р. Кунгуров, И.И. Садиков, Д.П. Таджибаев, Д.Д. Тожибоев

Ўзбекистон республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институти, МирзоУлугбек тумани, Улугбек шахарчаси, Хуросан 1, 100214, Тошкент, Ўзбекистон

298-448 К ҳарорат оралиғида 2,22*1019 н/см^2 оқимли тез нейтронлар билан нурлантирилган С-4 тоифали графитнинг электр ўтказувчанлиги ўрганилди. Электр ўтказувчанлигининг доза ва ҳароратга ночизиқли боғлиқлиги аниқланди. Графит нурланишининг дозаси ва нейтрон оқими қанчалик кўп бўлса, материалнинг электр ўтказувчанлиги шунчалик камайиши кўрсатилган.

Калит сўзлар: иссиқлик ўтказувчанлиги; С-4 тоифали графит; тез нейтронлар; флюенс; доза.

©АкадемиянаукРеспубликиУзбекистан, 2023г.