

УДК 537.534:538.911

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИОННО-ЛУЧЕВОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВЫСОКООРИЕНТИРОВАННОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА

© 2025 г. Н. Н. Андрианова^{a, b}, А. М. Борисов^{a, b, c}, Е. А. Воробьева^a, М. А. Овчинников^{a, *}

^aНаучно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скobel'цына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^bМосковский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, 125993 Россия

^cМосковский государственный технологический университет “СТАНКИН”,
Москва, 127055 Россия

*e-mail: ov.mikhail@gmail.com

Поступила в редакцию 30.08.2024 г.

После доработки 30.09.2024 г.

Принята к публикации 30.09.2024 г.

Экспериментально исследован поверхностный слой высокоориентированного пиролитического графита после облучения ионами аргона с энергией от 10 до 30 кэВ с флюенсом до 10^{19} ион/см² в интервале температур мишней от комнатной до 600°C. Закономерности изменения поверхности облученного слоя сопоставлены с известными закономерностями изменений морфологии и размеров пирографитов при облучении быстрыми реакторными нейтронами. Найдено, что выше критического флюенса ионного облучения высокоориентированного пиролитического графита происходит резкое возрастание амплитуды шероховатости поверхности со столбчато-игольчатой морфологией R на несколько порядков величины больше проективного пробега ионов R_p . Показано, что температурный интервал, соответствующий максимальным значениям величины амплитуды шероховатости поверхности, близок к температурному интервалу интенсивного радиационного формоизменения графита при нейтронном облучении, приводящего к его вторичному разбуханию. Проведена оценка критического флюенса образования столбчато-игольчатой морфологии при энергии облучения ионами аргона от 10 до 30 кэВ. Измеренные уровни критического флюенса ионов, выраженные в числе радиационных смещений, после их коррекции, с учетом различий эффективности радиационных повреждений нейтронами и ионами, могут быть использованы для оценки стойкости ядерных углеродных материалов с помощью имитационного ионного облучения.

Ключевые слова: высокоориентированный пиролитический графит, радиационно-индукционные изменения размеров, ионное облучение, спектроскопия комбинационного рассеяния света, ионно-индукционный рельеф, растровая электронная микроскопия.

DOI: 10.31857/S1028096025020107, EDN: EHSGYG

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее близкий по структуре к монокристаллу графита высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ) часто применяют в качестве модельного в исследованиях поведения ядерных графитов при нейтронном облучении [1–5]. Одной из задач таких исследований является оценка времени жизни графитовых материалов при

нейтронном облучении в реакторах, выраженного в числе радиационных смещений на атом (СНА). Для достижения числа радиационных смещений, необходимого для потери ядерными графитами конструкционных свойств, испытания в ядерных реакторах требуют большого времени, порядка одного года. Сократить это время до нескольких часов позволяет имитация радиационного

воздействия на графиты с помощью облучения ионными пучками [6–9]. Для этого используют ускоренные до энергии в диапазоне от нескольких десятков кэВ до нескольких МэВ пучки ионов как химически активных элементов (водорода, азота и собственных ионов углерода), так и инертных газов (гелия, неона, аргона и др.). Помимо радиационных смещений, ионное облучение приводит к их внедрению и распылению поверхности образца, которые необходимо учитывать при анализе возможностей имитации путем сопоставления получаемых результатов с данными нейтронного облучения.

В настоящей работе измененный поверхностный слой ВОПГ изучали после облучения ионами аргона с энергией от 10 до 30 кэВ и флюенсом до 10^{19} ион/см² в интервале температур мишени от комнатной до 600°C. Полученные данные вместе с описанными в [10–12] сопоставлены с известными данными по нейтронному облучению графитов.

ЭКСПЕРИМЕНТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мишениями в эксперименте служили образцы высокоориентированного пиролитического графита УПВ-1Т. Облучение ионами Ar⁺ с энергией 30 кэВ проводили на масс-монохроматоре в НИИЯФ МГУ [13]. Держатель мишени с резистивным нагревателем позволял варьировать температуру мишени от комнатной до 600°C. Облучение образцов проводили при температурах 50, 150, 250 и 550°C. Температуру контролировали с помощью хромель-алюмелевой термопары, спай которой прикрепляли на облучаемой стороне мишени вне зоны облучения. Плотность ионного тока составляла ~0.3 mA/cm². Флюенс частиц

при облучении составлял 10^{18} ион/см². Контроль ионного облучения проводили путем периодической регистрации тока ионов и электронов для определения флюенса ионов и коэффициента ионно-электронной эмиссии. Поверхность образцов анализировали при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ) и с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) с длиной волны 473 нм на спектрометре “ИНТЕГРА Спектра”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее часто время жизни ядерных графитов оценивают по критическому флюенсу нейтронов Φ_{kp} и соответствующему числу радиационных смещений на атом (СНА), выше которого происходит резкий рост объема частиц образца, приводящий к так называемому вторичному разбуханию графитовых материалов [4, 5, 14, 15]. Величина Φ_{kp} различна для разных сортов графита и зависит от температуры нейтронного облучения [4, 5]. При ионном облучении рост объема частиц образца проявляется в значительном изменении морфологии поверхностного слоя. На рис. 1 представлены РЭМ-изображения поверхности ВОПГ после облучения ионами аргона с энергией 30 кэВ с флюенсом 10^{18} ион/см² при температуре 50, 250 и 550°C. Видно, что наибольшее развитие морфологии поверхности в виде столбчато-игольчатых элементов высотой ~2.5 мкм происходит при 250°C.

Структуру облученного ВОПГ оценивали с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (рис. 2). Спектр комбинационного рассеяния необлученного УПВ-1Т содержит характерные для графитов пики первого порядка: пик G, связанный с колебаниями активной моды

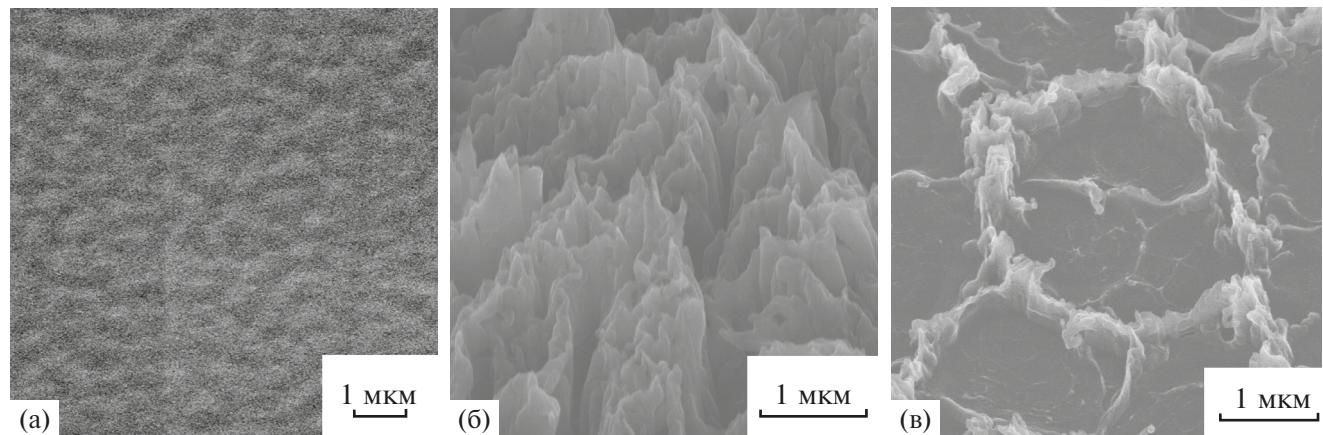


Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности УПВ-1Т после облучения ионами аргона с энергией 30 кэВ и флюенсом 1×10^{18} ион/см² при температуре 50 (а); 250 (б); 550°C (в).

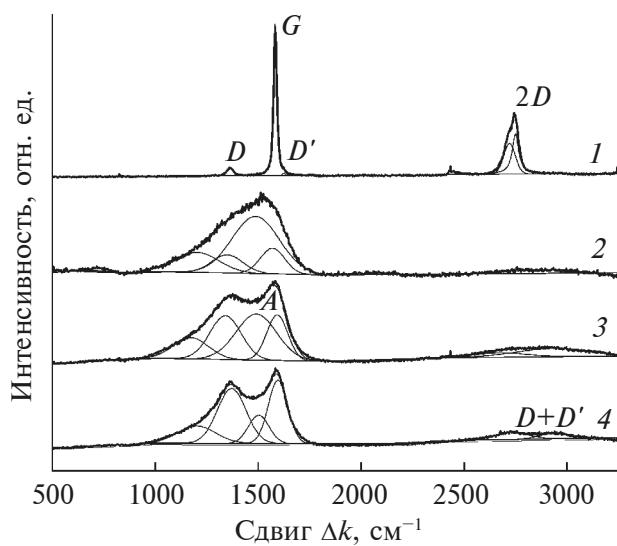


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния до (1) и после облучения ионами аргона с энергией 30 кэВ с флюенсом 1×10^{18} ион/см $^{-2}$ при температуре 50 (2); 250 (3); 550°C (4). Сплошными тонкими линиями показано разложение спектров функциями Гаусса и Лоренца.

комбинационного рассеяния кристалла графита; пики D и D' , возникающие из-за конечного размера кристалла и дефектов кристаллической структуры; пики второго порядка [16]. Разложение спектров проводили с помощью функций Гаусса и Лоренца. Появление в спектре необлученного ВОПГ пиков D и D' может быть связано с поворотом образца при съемке [17] или съемкой вблизи края кристаллита [18]. Значительная анизотропия ВОПГ и высокая скорость диффузии дефектов являются дополнительными факторами возникновения пика D . Облучение при комнатной температуре приводит к аморфизации поверхности с доминирующим пиком при ~ 1480 – 1520 см $^{-1}$ и пиком при ~ 1250 см $^{-1}$, связанным с ионными включениями и появлением цепочечных соединений углерода [19]. Разложение спектров комбинационного рассеяния света образцов УПВ-1Т, облученных при температуре выше 150°C, на гауссовские компоненты показывает, что увеличение температуры облучения приводит к постепенному разрешению пиков D и G в спектрах комбинационного рассеяния и уменьшению аморфной составляющей. При температуре облучения 550°C в спектрах появляются пики второго порядка. Увеличение интенсивности пика $2D$ в графитоподобных материалах связывают с возрастанием количества графеновых слоев в кристаллитах [19]. В целом на поверхности УПВ-1Т при температуре облучения выше 150°C формируется разупорядоченный графитоподобный слой.

На рис. 3 представлены данные о влиянии температуры облучаемого ВОПГ (T) на амплитуду шероховатости поверхности (R) как меры ионно-индукционного воздействия. Величину R определяли по РЭМ-изображениям, полученным при наклоне поверхности образцов относительно электронного пучка в микроскопе на фиксированный угол (30 или 45°). Зависимость $R(T)$ количественно отражает сильное влияние температуры облучаемого ВОПГ на модификацию поверхностного слоя образца и может быть сопоставлена с температурными зависимостями, характеризующими изменение размеров кристаллитов графита при нейтронном облучении, приводящее к изменению морфологии образца.

Разбухание, пластические процессы аккомодации механических напряжений, возникающих при анизотропных изменениях формы кристаллитов, приводят к значительному увеличению шероховатости поверхности и к аномально глубокому внедрению аргона [11, 12], которые качественно отражают такую же температурную зависимость, как и амплитуда ионно-индукционной шероховатости R . В области температур меньше 150°C, где происходит аморфизация графита, отмеченные выше процессы подавляются. Ионное облучение приводит к возникновению на поверхности образца типичных ямок травления с небольшой величиной R , глубина внедрения аргона соответствует проективному пробегу.

Как при нейтронном, так и ионном облучении графита радиационные смещения приводят к дефектам структуры и к изменению размеров кристаллитов из-за изменения параметров решетки (a и c) [20, 21]. Происходит изменение формы кристаллитов из-за неодинакового изменения параметров решетки: роста в направлении оси c и сжатия по оси a . Наиболее значительны такие изменения при температуре облучения меньше 500°C. Увеличение параметра c вызвано деформацией кристаллической решетки внедренными атомами и их комплексами, а уменьшение параметра a – релаксацией решетки на вакансиях. С повышением температуры облучения изменения параметров решетки графита уменьшаются. При температуре выше 500°C изменения незначительны. При облучении практически всегда происходит увеличение объема кристаллитов:

$$\Delta V/V = \Delta x_c/x_c + 2\Delta x_a/x_a, \quad (1)$$

где V – объем кристаллита; Δx_c – изменение размера кристаллита в направлении оси c ; Δx_a – изменение размера кристаллита в направлении оси a .

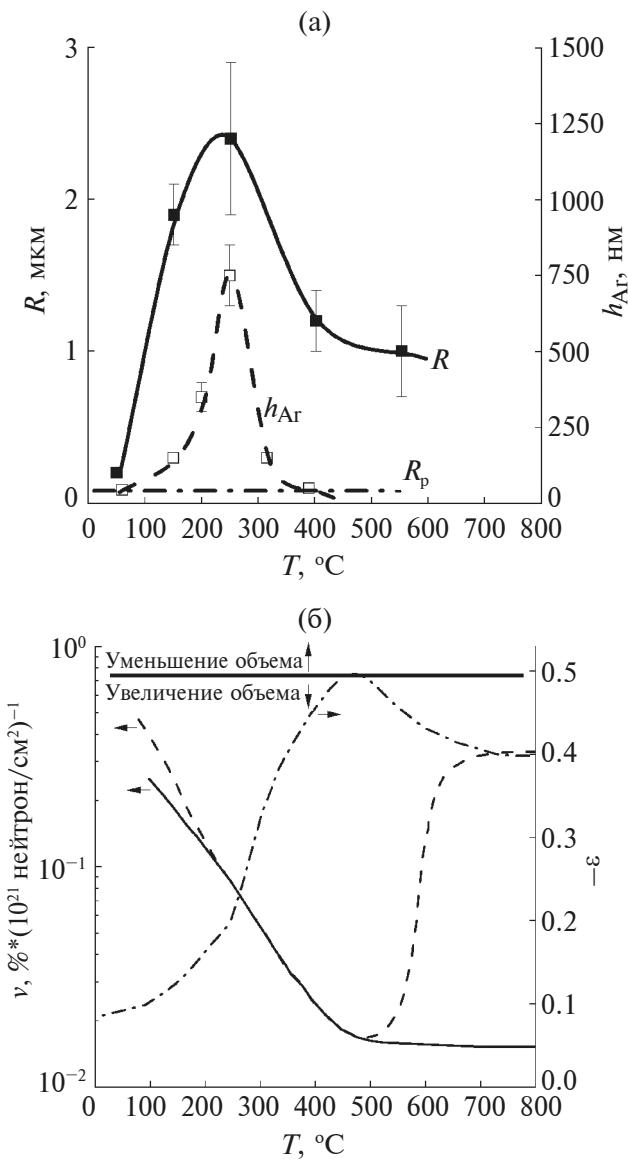


Рис. 3. Зависимость амплитуды шероховатости поверхности образца R , глубины имплантированного аргона h_{Ar} по данным [11] и проективного пробега R_p от температуры облучения УПВ-1Т ионами Ar^+ с энергией 30 кэВ (а); зависимости относительного изменения объема кристаллита графита вдоль кристаллографических направлений a и c : $\varepsilon = (\Delta x_a/x_a)/(\Delta x_c/x_c)$ от температуры облучения нейтронами (штрихпунктирная линия) по данным [20] и скорости относительного роста толщины пирографита v при низком $<10^{21}$ нейtron/cm² (сплошная линия) и высоком $>10^{21}$ нейtron/cm² флюенсе нейтронов (пунктирная линия) по данным [4] (б).

Так, при $\Delta x_c/x_c > 2|\Delta x_a/x_a|$, $\Delta V/V > 0$. Как показало обобщение многих экспериментов в [20] (рис. 3б), это условие выполняется практически при всех температурах с минимумом изменения объема при 500°C. В области температур облучения меньше 500°C с ростом температуры абсолютное

изменение размеров образцов пирографита (рост и усадка) быстро снижается.

При облучении нейтронами, согласно литературным данным [4], само начало этого изменения размеров образца по флюенсу Φ сдвигается в сторону больших значений Φ . Однако облучение при 500–600°C с Φ выше 1.5×10^{21} нейtron/cm² (до которого изменение формы кристаллитов протекало с невысокой скоростью и линейно по Φ) резко увеличивает скорость изменения размеров образцов: при $\Phi = 4 \times 10^{21}$ нейtron/cm² относительное увеличение толщины образцов достигает 55%, а усадка — 7.5%. При еще более высокой температуре облучения 750–850°C резкое увеличение скоростей роста и усадки начинается выше 1×10^{21} нейtron/cm². После облучения с $\Phi = 4 \times 10^{21}$ нейtron/cm² относительное увеличение толщины образцов достигает 95%, а усадка — 21%. Такой эффект связывают в [4] с процессами на “надкристаллитном” уровне, т. е. с изменением гранулярной структуры пирографита в процессе получения ВОПГ, поскольку рост параметра $\Delta x_c/x_c$ составляет всего 1.12%.

Отметим, что при облучении ионами аргона кристаллическая структура, согласно данным спектроскопии комбинационного рассеяния света, на поверхности образца становится разупорядоченной и значительного роста параметров решетки также не происходит. Рост столбчато-игольчатых образований при облучении также может быть связан с процессами на “надкристаллитном” уровне. Экспериментально измеренная в [4] (рис. 3б) скорость роста образцов по толщине экспоненциально падает с температурой облучения подобно изменению параметра c . Выше 470°C скорость роста образцов по толщине становится независимой от температуры. Однако при повышенном флюенсе с вторичным резким ростом толщины (пунктирная кривая скорости на рис. 3б) $v(T)$ проявляется резкий рост после минимума при 400–500°C [4]. В целом эксперименты показывают, что критический флюенс Φ_{kp} перехода к высокой скорости и вторичному разбуханию образцов в области до 400°C увеличивается, а при последующем росте температуры уменьшается, так же как уменьшается критический флюенс вторичного разбухания при исследованиях высотемпературного облучения графитов [22]. Максимальное значение критического флюенса $\Phi_{kp,\max}$ приходится на температуру 400–500°C.

На рис. 3б сплошная линия соответствует скорости изменения толщины образца при нейтронном облучении при условии $\Phi < \Phi_{kp}$, тогда как пунктирная — при $\Phi > \Phi_{kp}$. Для ионного облучения зависимость $R(T)$ получена при одном и том же

флюенсе $\Phi_{\text{ион}} = 10^{18}$ ион/ см^2 идет подобно сплошной линии на рис. 3б с выходом на плато при 400–530°C. Можно предположить, что при 400–550°C $\Phi_{\text{ион, макс}} > \Phi_{\text{ион}}$. При флюенсе $\Phi_{\text{ион}} \sim 10^{19}$ ион/ см^2 амплитуда шероховатости поверхности образца R становится очень большой [10] и уже соответствует возрастающей с температурой пунктирной ветви на рис. 3б. Это означает, что $\Phi_{\text{ион, макс}} < 10^{19}$ ион/ см^2 . Таким образом, величина критического флюенса ионного облучения $\Phi_{\text{ион, макс}}$, как и при нейтронном облучении, является максимальной при 400–500°C и составляет величину большую 10^{18} , но меньшую 10^{19} ион/ см^2 .

Оценить уровень $\Phi_{\text{ион, кр}}$ в числе СНА позволяют измерения характеристик поверхностного слоя после облучения ионами с различной энергией. На рис. 4 представлены результаты влияния на ВОПГ высокодозного облучения ионами аргона с энергией 10–30 кэВ по нормали к поверхности образцов при температуре 250°C. Из рисунка видно, что энергетические зависимости глубины внедренного аргона по данным [11] и амплитуды шероховатости R качественно подобны. При энергии ионов $E = 10$ кэВ (меньше энергетического порога глубокого модифицирования $E_p = 15$ кэВ) характерными элементами рельефа образца являются одиночные конусы высотой около 0.2 мкм. При аномально глубоком модифицировании поверхностного слоя при $E > E_p$ на поверхности доминируют столбчато-игольчатые структурные элементы с существенно большей (1–2 мкм) амплитудой шероховатости поверхности образца R . Возрастающая с энергией ионов E величина R ионно-индукционной шероховатости в 50 раз больше аномальной глубины внедренного в поверхностный слой аргона. Критический уровень радиационных нарушений, соответствующий пороговой энергии 15 кэВ и оцененный в [11], составляет 65 СНА.

Надо отметить, что уровни СНА, полученные при ионном облучении, требуют коррекции применительно к имитации нейтронного облучения [6–9, 23, 24]. В частности, большое различие эффективности радиационных повреждений легкими и тяжелыми частицами [25] приводит к завышенным значениям СНА при ионном облучении. Отметим также, что для современных ядерных графитов значения критических уровней вторичного разбухания составляют несколько десятков СНА. Например, для эталонного ядерного графита РОСО АХФ критические уровни вторичного разбухания при нейтронном облучении составляют 17 и 29 СНА при 875 и 600°C соответственно [14]. Новые разработки ядерных реакторов [6] требуют поиска углеродных материалов, выдерживающих при их эксплуатации более 200 СНА.

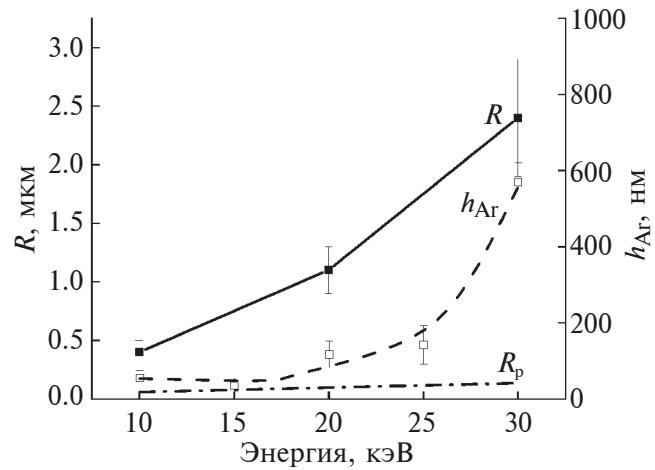


Рис. 4. Зависимость амплитуды шероховатости поверхности образца R , глубины имплантированного аргона h_{Ar} , по данным [11], и проективного пробега R_p от энергии ионов Ar^+ . Температура облучения 250°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально изучен измененный поверхностный слой ВОПГ после облучения ионами аргона с энергией от 10 до 30 кэВ и флюенсом до 10^{19} ион/ см^2 в интервале температур мишней от комнатной до 600°C. Полученные закономерности изменения характеристик облученного слоя сопоставлены с известными закономерностями изменений морфологии и размеров пирографитов при облучении быстрыми реакторными нейтронами. Найдено, что выше критического флюенса ионного облучения ВОПГ происходит резкое возрастание амплитуды шероховатости поверхности R со столбчато-игольчатой морфологией на несколько порядков величины больше проективного пробега R_p ионов. Показано, что для величины критического флюенса существует максимум при 400–500°C, аналогично величине критического флюенса облучения углеродных материалов быстрыми нейтронами, приводящего к вторичному разбуханию углеродных материалов и определяющего время их жизни в атомных реакторах. Сходство фундаментальных процессов радиационного формоизменения кристаллитов при нейтронном и ионном облучении проявляется также в близких значениях температуры максимума критического флюенса вторичного разбухания и резкого роста шероховатости ВОПГ. Измеренные при ионном облучении уровни критического флюенса, выраженные в числе радиационных смещений СНА, после их коррекции, с учетом различий эффективности радиационных повреждений нейтронами

и ионами, могут быть использованы для оценки стойкости ядерных углеродных материалов с помощью имитационного ионного облучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова. При выполнении работы использовано оборудование “Ускорительного комплекса МГУ”. Авторы выражают благодарность Цыркову Р.А. за помощь в проведении микроскопических исследований.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виргильев Ю.С., Гундорова Н.И., Куроленкин Е.И., Лебедев Ю.Н., Макарченко В.Г. Непрошин Е.И., Попельхина М.И., Харитонов А.В. // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. матер. 1980. Т. 16. № 4. С. 669.
2. Виргильев Ю.С., Гундорова Н.И., Куроленкин Е.И., Непрошин Е.И., Харитонов А.В. // Физ. и хим. обраб. матер. 1982. № 2. С. 3.
3. Brocklehurst J.E, Kelly B.T. // Carbon. 1993. V. 31. № 1. P. 179.
[https://www.doi.org/10.1016/0008-6223\(93\)90170-F](https://www.doi.org/10.1016/0008-6223(93)90170-F)
4. Виргильев Ю.С., Чугунова Т.К., Макарченко В.Г., Муравьева Е.В. // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. матер. 1984. Т. 20. № 8. С. 1378.
5. Virgil'ev Yu.S., Kalyagina I.P. // Inorg. Mater. 2004. V. 40. P. S33.
<https://www.doi.org/10.1023/B:INMA.0000036327.90241.5a>
6. Was G.S., Jiao Z., Getto E., Sun K., Monterrosa A.M., Maloy S.A., Anderoglu O., Sencer B.H., Hackett M. // Scripta Materialia. 2014. V. 88. P. 33.
<https://www.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2014.06.003>
7. Вас Г.С., Основы радиационного материаловедения. Металлы и сплавы. М.: Техносфера, 2014. 992 с.
8. Liu D., Cherns D., Johns S., Y. Zhou, J. Liu, W.-Y. Chen, I. Griffiths, C. Karthik, M. Li, M. Kuball, J. Kane, W. Windes // Carbon. 2021. V. 173 P. 215.
<https://www.doi.org/10.1016/j.carbon.2020.10.086>
9. Telling R.H. Heggie M.I. // Phil. Mag. 2007. V. 87. P. 4797.
<https://www.doi.org/10.1080/14786430701210023>
10. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Севостянова В.С., Шульга В.И. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейtron. иссл. 2013. № 3. С. 103.
<https://www.doi.org/10.7868/S0207352813030050>
11. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., Sevostyanova V.S., Virgiliev Yu.S. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2013. V. 315. P. 117.
<https://www.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.04.014>
12. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Севостянова В.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 6. С. 723.
<https://www.doi.org/10.7868/S0367676514060052>
13. Mashkova E.S., Molchanov V.A. Medium-Energy Ion Reflection from Solids. Amsterdam: North-Holland, 1985. 444 p.
14. Burchell T.D. Eatherly W.P. // J. Nucl. Mater. 1991. V. 179–181. P. 205.
15. Платонов П.А., Штромбах Я.И., Карпухин В.И., Виргильев Ю.С., Чугунов О.К., Трофимчук Е.И. Действие излучения на графит высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. // Атомно-водородная энергетика и технология: Сб статей. Вып. 6. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 77.
16. Ferrari A.C., Robertson J. // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. P. 14095.
<https://www.doi.org/10.1098/rsta.2004.1452>
17. Hbiriq Y., Ammar M. R., Fantini C., L. Hennet, M. Zaghrouri // Phys. Rev. B. 2023. V. 107. P. 134305.
<https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.107.134305>
18. Pimenta M.A., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S., L. G. Cançado, A. Jorio, R. Saito // Phys. Chem. Chem. Phys. 2007. V. 9. № 11. P. 1276.
<https://www.doi.org/10.1039/B613962K>
19. Larouche N., Stansfield B.L. // Carbon. 2010. V. 48. № 3. P. 620.
<https://www.doi.org/10.1016/j.carbon.2009.10.002>
20. Kelly B. T. Dimensional changes and lattice parameter changes in graphite crystals due to interstitial atoms and vacancies. // Proc. 2nd Conference on Industrial Carbon and Graphite. Society of Chemical Industry. London. 1965. P. 483.
21. Burchell T.D. // MRS Bull. 1997. V. 22. P. 29.
<https://www.doi.org/10.1557/S0883769400033005>
22. Жмурков Е.И., Бубненков И.А., Дремов В.В., Самарин С.И., Покровский А.С., Харьков Д.В. Графит в науке и ядерной технике. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 163 с.
23. Andrianova N.N., Avilkina V.S., Borisov A.M., Mashkova E.S., Parilis E.S. // Vacuum. 2012. V. 86. P. 1630.
<https://www.doi.org/10.1016/j.vacuum.2011.12.010>
24. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., Virgiliev Yu.S. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2013. V. 315. P. 240.
<https://www.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.04.011>
25. Ehrhart P., Schilling W., Ullmaier H. // Encyclopedia Appl. Phys. 1996. V. 15. P. 429.

Temperature and Energy Regularities of Ion-Beam Modification of Highly Oriented Pyrolytic Graphite

N. N. Andrianova^{1, 2}, A. M. Borisov^{1, 2, 3}, E. A. Vorobyeva¹, M. A. Ovchinnikov^{1,*}

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993 Russia*

³*Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, 127055 Russia*

*e-mail: ov.mikhail@gmail.com

The surface layer of highly oriented pyrolytic graphite after irradiation with argon ions with energies from 10 to 30 keV and fluences up to 10^{19} ions/cm² in the target temperature range from room temperature to 600°C has been experimentally studied. The regularities of the irradiated layer surface change are compared with the known regularities of changes in the morphology and dimensions of pyrolytic graphites under irradiation with fast reactor neutrons. It is found that above the critical fluence of ion irradiation of highly oriented pyrolytic graphite, a sharp increase in the roughness amplitude R of the surface with columnar-acicular morphology occurs, which is several orders of magnitude greater than the projective range R_p of ions. It is shown that the temperature range corresponding to the maximum values of the amplitude of the surface roughness is close to the temperature range of intense radiation-induced deformation of graphite under neutron irradiation, leading to its secondary swelling. An assessment of the critical fluence of the formation of columnar-acicular morphology at argon ion irradiation energy of 10 to 30 keV is carried out. The measured levels of critical ion fluence, expressed as the number of radiation displacements, after their correction, taking into account the differences in the efficiency of radiation damage by neutrons and ions, can be used to assess the resistance of nuclear carbon materials using simulated ion irradiation.

Keywords: highly oriented pyrolytic graphite, radiation-induced dimensional changes, ion irradiation, Raman spectroscopy, ion-induced topography, scanning electron microscopy.