

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И АППАРАТУРЫ

УДК 537.534

ЭФФЕКТЫ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ ГРАФИТА ПРИ ВЫСОКИХ ФЛЮЕНСАХ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ ГЕЛИЯ С ЭНЕРГИЕЙ 30 кэВ

© 2025 г. Н. Н. Андрианова^{а, б}, А. М. Борисов^{а, б, с}, Е. А. Воробьева^а,
М. А. Овчинников^{а, *}, В. В. Слепцов^б, Р. А. Цырков^б

^аНаучно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

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

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

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

Поступила в редакцию 23.04.2024 г.

После доработки 23.04.2024 г.

Принята к публикации 30.04.2024 г.

Экспериментально изучено воздействие высокодозного, с флюенсом от $1 \cdot 10^{18}$ до $3 \cdot 10^{18}$ см⁻², облучения ионами гелия с энергией 30 кэВ в интервале температур от комнатной до 600°C на морфологию и структуру поверхности высокоориентированного пиролитического графита УПВ-1Т и мелкозернистого поликристаллического графита МПГ-8. Выявлены ионно-индуцированные морфологические элементы, дополняющие ранее установленные при малых флюенсах облучения ($\sim 10^{17}$ см⁻²). Облучение ВОПГ при высоких флюенсах приводит к отслоениям в виде изогнутых вплоть до скручивания графитовых чешуек и к висцероподобным структурам. Облучение мелкозернистого графита не приводит к кардинальным изменениям его микроструктуры по сравнению с ВОПГ.

Ключевые слова: мелкозернистый плотный графит, высокоориентированный пиролитический графит, ионное облучение, ионы He⁺, радиационные смещения, морфология поверхности, расслоение графита, электронная микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света

DOI: 10.56304/S2079562924060046

ВВЕДЕНИЕ

Графитовые материалы и графитовые композиты претерпевают значительные размерные изменения при генерации радиационно-индуцированных атомных смещений. Это имеет большое значение для нынешних и будущих технологий ядерных и термоядерных реакторов. Как в случае полигранулярных ядерных графитов, так и в случае монокристаллов результирующие изменения размеров могут быть значительными с точки зрения величины и последствий для применения материалов. Понимание механизмов, которые управляют изменением размеров в отдельных графитовых кристаллах, необходимо для использования в многомасштабном моделировании этой системы. Для монокристалла изменение размеров состоит из сжатия в базисных плоскостях графитовой решетки и расширения в направлении перпендикулярно базисным плоскостям [1, 2]. Модели и механизмы, вызывающие эти изменения, являются предметом дискуссий и продолжающихся научных исследований.

Одна из первых моделей “точечных дефектов” предполагает, что радиационно-индуцированные

вакансии агломерируются в базисных плоскостях гексагональной решетки графита, образуя небольшие дислокационные петли. Схлопывание дислокационных петель вызывает сжатие в направлениях *a/b* кристаллической решетки графита. Агломерация выбитых атомов междоузлий приводит к образованию новых базисных плоскостей [3, 4].

Для поликристаллического графита размерные изменения будут меньше, чем для монокристалла при той же дозе облучения, поскольку границы кристаллитов действуют как стоки дефектов. К уменьшению размерных изменений приводят также нанотрещины Мрозовского в базисной плоскости из-за анизотропного теплового расширения/усадки кристаллов графита в полигранулярном графите во время охлаждения от температуры графитизации, которые компенсируют вызванное облучением первоначальное расширение вдоль оси *c* [5–7]. Таким образом, в поликристаллических графитовых материалах при облучении происходит первоначально усадка [6, 7].

Объемное расширение в облученном нейтронами графите может достигать 200%, тогда как по модели “точечных дефектов” расширение по оси

с не превышает 10–20% [8, 9]. В модифицированной модели [8] предполагается образование трехмерных дефектов при высокой дозе, включая кластеры sp^3 , которые вызывают изгиб и турбостратность базисных плоскостей, что является причиной большого увеличения объема. В пользу образования кластеров sp^3 приводится тот факт, что радиационно-индуцированные sp^2 -дефекты имеют тенденцию к отжигу, но при переходе к образованию sp^3 -связей, восстановление исходной структуры затрудняется [10].

В [11] предложена другая модифицированная модель дислокационных диполей и их накопления для объяснения аморфизации графита, вызванной облучением при низких температурах. На начальной стадии аморфизации упорядочение упаковки АВАВ сохраняется, но происходит разупорядочение в плоскости за счет образования дивакансий, и, как следствие, протяженных дислокационных диполей. Дислокационные диполи являются разрывами в гексагональной структуре базисной плоскости и уже не могут взаимно аннигилировать при взаимодействии с междоузельными атомами, приводя к аморфизации. Дислокационные диполи в этой модели являются по сути концентраторами возникновения турбостратности базисных плоскостей.

В [12] для преодоления недостатков традиционной теории точечных дефектов предложена модель дефекта “перегибание и складывание” (“ruck-and-tuck”) базисных плоскостей. Экспериментальные доказательства этой модели получены в недавнем исследовании высокотемпературного нейтронного облучения графита [13].

Вероятность радиационных смещений при нейтронном облучении практически одинакова по всему объему образца. Во время ионного облучения материалов возникает значительный градиент радиационного повреждения, который создает механические напряжения как вокруг локальных дефектов, так и по глубине образца. Материалы с двумерными наноструктурами как у графита имеют тенденцию деформироваться в форме изгиба, перегиба, двойникования и так называемых риппложений в результате комбинированного движения базисных дислокаций и скольжения слоев [14, 15]. Так, при механическом воздействии на высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ) в оптических изображениях часто видны полосы излома с границами, где кристаллы изогнуты под углом двойникования [16]. Границы образуются в направлении либо кресельной, либо зигзагообразной конфигурации гексагона и образуются в результате базисных дислокаций в результате напряжения (например, при сжатии или при отслаивании чешуек ВОПГ). Механизмы изгиба/перегиба могут быть аналогичными механизмам волнистой деформации, наблюдаемой на сжимаемой

стороне изогнутой многостенной углеродной нанотрубки [17].

Проявление механических напряжений вместе с эффектами радиационных смещений при ионном облучении, приводящих к точечным дефектам, скоплениям дефектов и структурным модификациям, наблюдали во многих экспериментах. Так, облучение ВОПГ ионами D^+ или He^+ с энергией 25 кэВ приводит к трем особенностям морфологии поверхности, включающих гребневидную структуру в виде двойниковой сетки ($100^\circ C$ и ниже $5 \cdot 10^{17} D^+/cm^2$), линзообразные щели ($700^\circ C$, $1 \cdot 10^{16} D^+/cm^2$), которые возникают раньше аморфизации, и сферические пузырьки после аморфизации ($300^\circ C$, $1 \cdot 10^{17} He^+/cm^2$) [8]. Часто наблюдаемой особенностью облученной ионами поверхности ВОПГ являются сетки изломов и локализованные выпуклости [18]. Смесь дендритоподобной системы поверхностных трещин, кристаллографически ориентированных гребней и гребней в виде криволинейной сетки с короткими разветвлениями, наблюдали при облучении ВОПГ при комнатной температуре ионами C^+ с энергиями 35 и 165 кэВ с флюенсами до $3 \cdot 10^{16} C^+/cm^2$ [19].

Недавние исследования в [20] ионно-индуцированных топологических изменений поверхности ВОПГ привели к выявлению макроскопического механизма перегибания и складывания. При имплантации ионами C^+ с флюенсами до $1.8 \cdot 10^{17} C^+/cm^2$ наблюдали прожилковую (гребневидную) структуру поверхности, не зависящую от кристаллографических ориентаций. Срезы облученной области ВОПГ сфокусированным ионным лучом выявили под прожилками (гребнями) образование пор, а изображения, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии, показали образование узлов треугольной формы из базисных плоскостей. Движение узлов вверх формирует на наклонных границах базисных плоскостей узла с базисными плоскостями остального материала макромасштабную геометрию перегибания и складывания. Найдено, что этот процесс не зависит от вида ионов. Получены экспериментальные доказательства движения дислокаций в противоположных направлениях вдоль соседних базисных плоскостей и обоснована механистическая модель на основе дислокаций скольжения для объяснения образования прожилок (гребней). Предполагается, что образование макромасштабных прожилок (гребней) может играть важную роль в изменении размеров и свойств облучаемого поликристаллического графита, особенно при наличии градиента напряжения. Авторы считают, что вместе с моделями перегибания и складывания в атомном масштабе и моделями риппложений [14] макромасштабная модель перегибания и складывания предоставляет дополнительный

механизм, ответственный за поведение графитовых материалов при облучении.

Надо отметить, что в технологических и промышленных применениях в графитовых материалах градиент напряжений будет образовываться не только при ионном облучении, но и при нейтронном облучении, внося вклад в изменения размеров, физических и термомеханических свойств. В реальных условиях напряженное состояние графита не может быть в виде одноосного сжатия для стимулирования рипплокаций, а рабочая температура недостаточно высока для того, чтобы преобладал механизм перегибания и складывания на атомном уровне. Таким образом, макромасштабная модель перегибания и складывания предлагает подходящее объяснение размерных изменений поликристаллического графита как при высоких, так и низких температурах, ниже 700°C . В этой связи актуальными являются исследования при более высоких дозах облучения, соответствующих ожидаемой величине радиационных смещений порядка 200 смещений на атом (СНА) в проектируемых атомных реакторах нового поколения, поскольку величина СНА до сих пор в экспериментах не превышала единиц СНА. В данной работе проводится сравнительное исследование ионно-лучевой модификации ВОПГ и мелкозернистого графита при комнатной и повышенной температурах и флюенсах облучения ионами He^+ , приводящих к десяткам и сотням радиационных смещений на атом.

ЭКСПЕРИМЕНТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мишенями в эксперименте служили образцы мелкозернистого поликристаллического графита 20×20 мм МПГ-8 и высокоориентированного пиролитического графита УПВ-1Т 20×5 мм. Зеркальную поверхность мишени из ВОПГ получали путем отслоения поверхностных слоев скотчем. Подготовка образцов МПГ-8 включала абразивную полировку поверхности, ультразвуковую очистку, промывку в этаноле и вакуумный отжиг при температуре не менее 250°C . Облучение ионами He^+ с энергией 30 кэВ проводили на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ [21]. Держатель мишени с резистивным нагревателем позволял варьировать температуру мишени от комнатной до 600°C . Температуру контролировали с помощью хромель-алюмелевой термопары, спай которой укрепляли на облучаемой стороне мишени вне зоны облучения. Плотность ионного тока составляла ~ 0.3 мА/см². Флюенсы облучения составляли $1 \cdot 10^{18}$ и $3 \cdot 10^{18}$ см⁻². Мониторинг ионного облучения проводили путем периодической регистрации тока ионов и электронов для определения флюенса облучения и коэффициента ионно-электронной эмиссии.

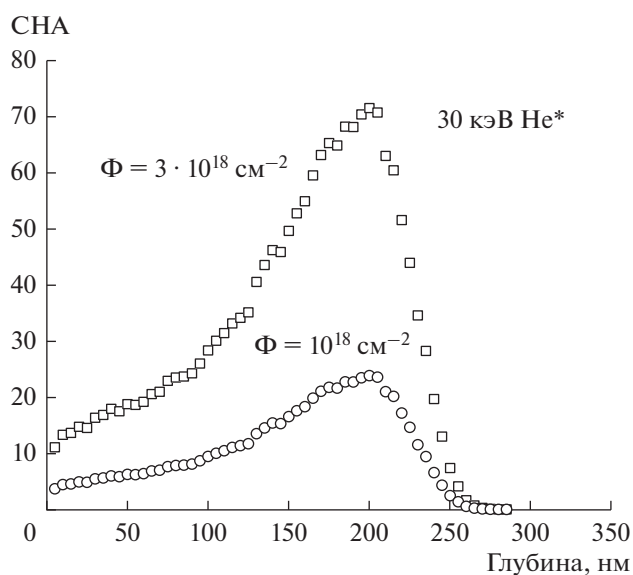


Рис. 1. Профили СНА для случаев облучения графита ионами 30 кэВ He^+ с флюенсом $\Phi = 1 \cdot 10^{18}$ и $3 \cdot 10^{18}$ см⁻².

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. Для сравнения результатов высокодозного облучения ионами гелия с различными флюенсами использовали моделирование в программном пакете SRIM-2013. Результаты моделирования при пересчете профилей дефектообразования в число радиационных смещений на атом от глубины имплантации ионов приведены на рис. 1. Видно, что число смещений увеличивается более чем в пять раз с увеличением глубины и достигает максимума на глубине пробега ионов. Величина максимума числа смещений обычно используется как мера дозы ионного облучения в числе СНА (см., например, [11, 16]). При выбранных в эксперименте флюенсах облучения $1 \cdot 10^{18}$ и $3 \cdot 10^{18}$ см⁻² число смещений составляет 25 и 70 СНА соответственно.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ионно-индуцированное изменение морфологии ВОПГ

На рис. 2. приведено обзорное РЭМ-изображение образца ВОПГ УПВ-1Т после облучения ионами He^+ с флюенсом $1 \cdot 10^{18}$ см⁻². На глубине пробега ионов происходит значительная усадка кристаллитов в базисной плоскости, поверхность ВОПГ покрывается хаотичными трещинами. Исходная зеркальная поверхность ВОПГ фрагментируется на чешуйки, в которых имеются отслоившиеся от поверхности части и не отслоившиеся

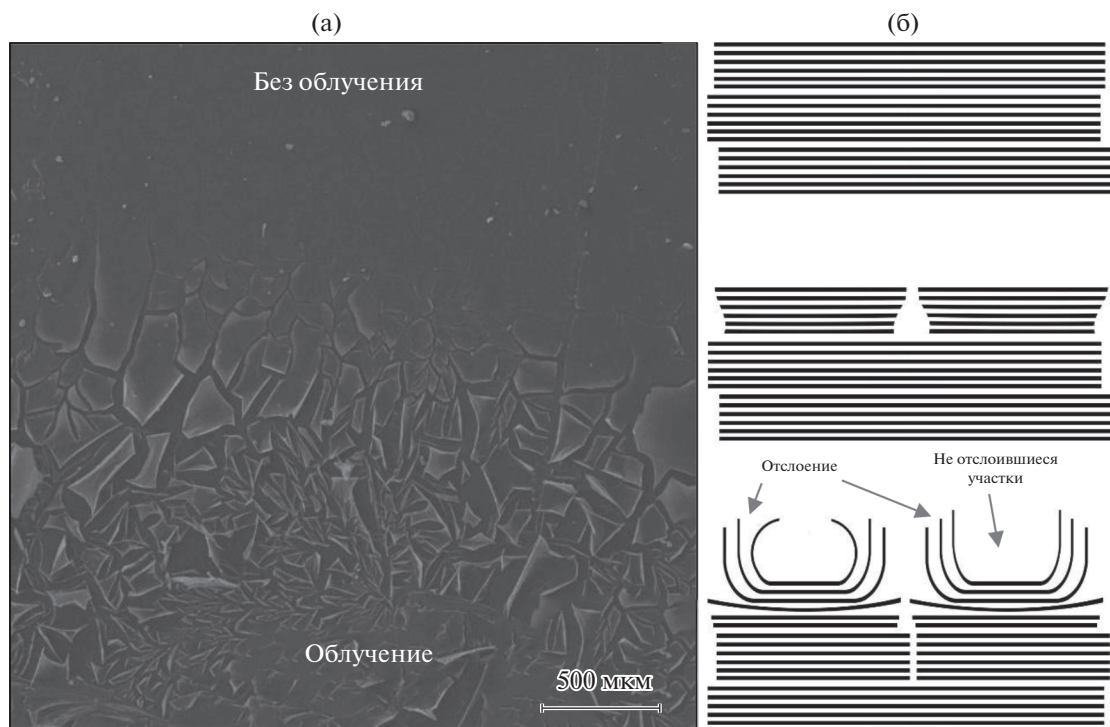


Рис. 2. РЭМ-изображение субмиллиметровой фрагментации поверхностного слоя УПВ-1Т при облучении ионами He^+ с энергией 30 кэВ при комнатной температуре с флюенсом $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (а) и схема отслоений на поверхности ВОПГ (б).

участки, как схематически показано на рис. 2б. Ионное облучение приводит к изгибу отслоенных краев чешуек вплоть до скручивания (рис. 2а).

Детальный анализ ионно-индуцированных структур показывает следующее. При увеличении температуры возрастает поперечный размер чешуек от 100 мкм для облучения при комнатной температуре, до 1 мм для облучения при температуре 250°C. Температура облучения оказывает также влияние на геометрию отслоений. Их толщина для облучения при комнатной температуре составляет 200–500 нм. Облучение при температуре 250°C привело к увеличению толщины отслоенных стенок до единиц микрометров. Сравнение отслоений при комнатной температуре и температуре 250°C показывает также, что при 250°C чешуйки меньше подвержены изгибу. На гранях чешуек как при комнатной температуре, так и при температуре 250°C наблюдается образование блистеров и сетки из гребневидных структур (рис. 3д, 3е).

Увеличение флюенса облучения до $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ как при комнатной температуре, так и при температуре 250°C дополнительно фрагментирует поверхность. Размеры чешуек при повышенных температурах облучения становятся сопоставимыми с размерами (~100 мкм) для облучения при комнатной температуре (ср. рис. 3а, 3б и рис. 4а, 4б). На гранях отслоений появляется субмикронный вис-

кероподобный рельеф (рис. 4д, 4е). При повышенных флюенсах облучения на поверхности отслоений исчезает блистеринг. Вместо него наблюдается субмикронная пористость (рис. 4в) при комнатной температуре облучения и субмикронное расслоение при температуре 250°C (рис. 4г). Увеличение флюенса облучения до $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ приводит также к образованию на не отслоившихся участках поверхности овальных кратеров с расслоенными концентрическими стенками (рис. 4ж, 4з). Размер таких кратеров составляет около 50 мкм при температуре 250°C и 5 мкм при комнатной температуре.

Ионно-индуцированное изменение морфологии мелкозернистого графита

На рис. 5 приведены РЭМ-изображения поверхности мелкозернистого поликристаллического графита МПГ-8 до и после облучения. Исходная поверхность МПГ-8 испещрена порами, их размер достигает сотни микрометров. На увеличенном изображении проявляются чешуйки кристаллитов размером в единицы микрометров и трещины до ~100 нм вдоль базисных плоскостей кристаллитов. Облучение ионами гелия с энергией 30 кэВ при комнатной температуре и флюенсе $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ приводит к формированию дополнительной субмикронной пористости (рис. 6в).

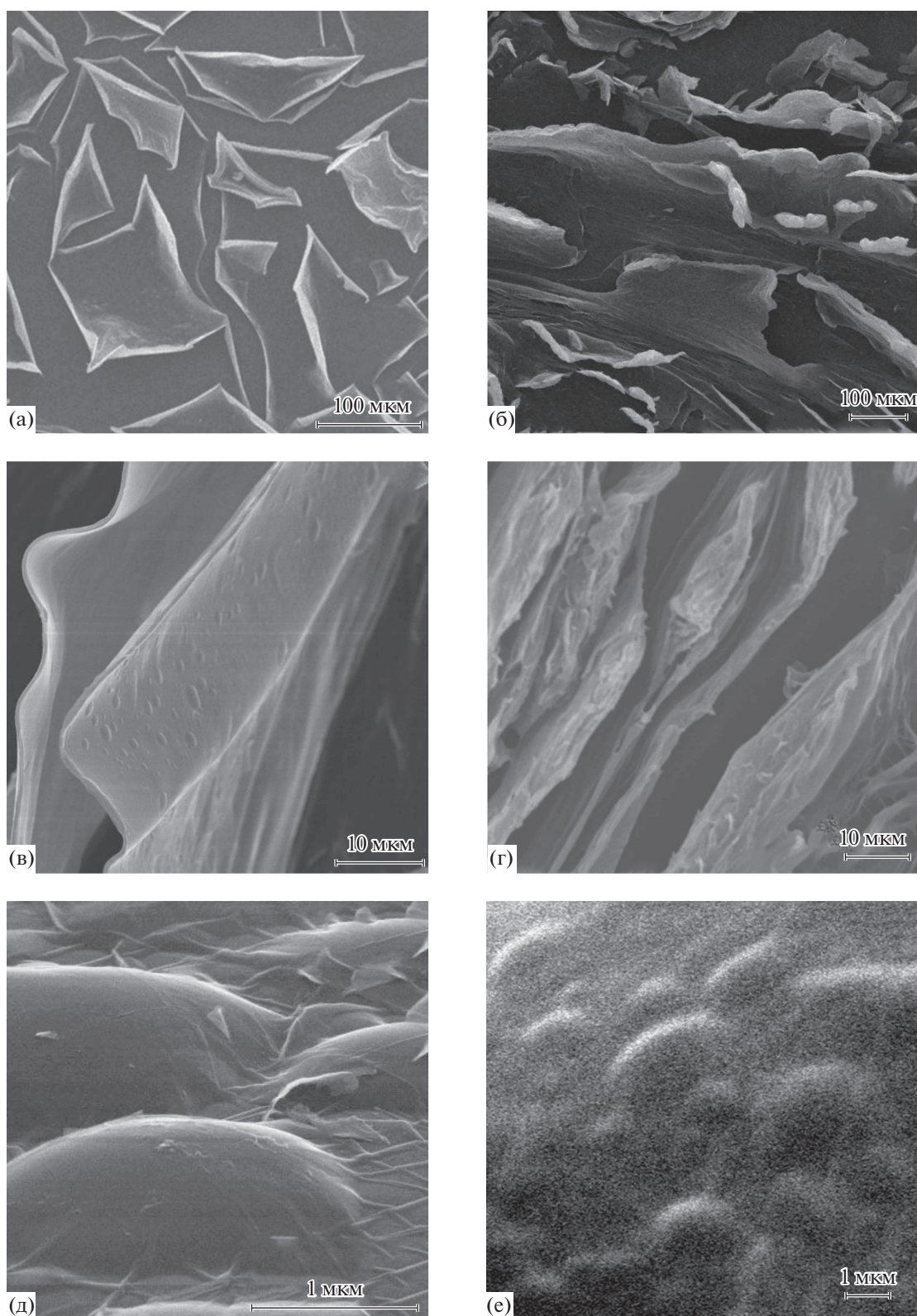


Рис. 3 РЭМ-изображения поверхности ВОПГ УПВ-1Т после облучения ионами 30 кэВ He⁺ с флюенсом $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре (а, в, д) и при температуре 250°C (б, г, е).

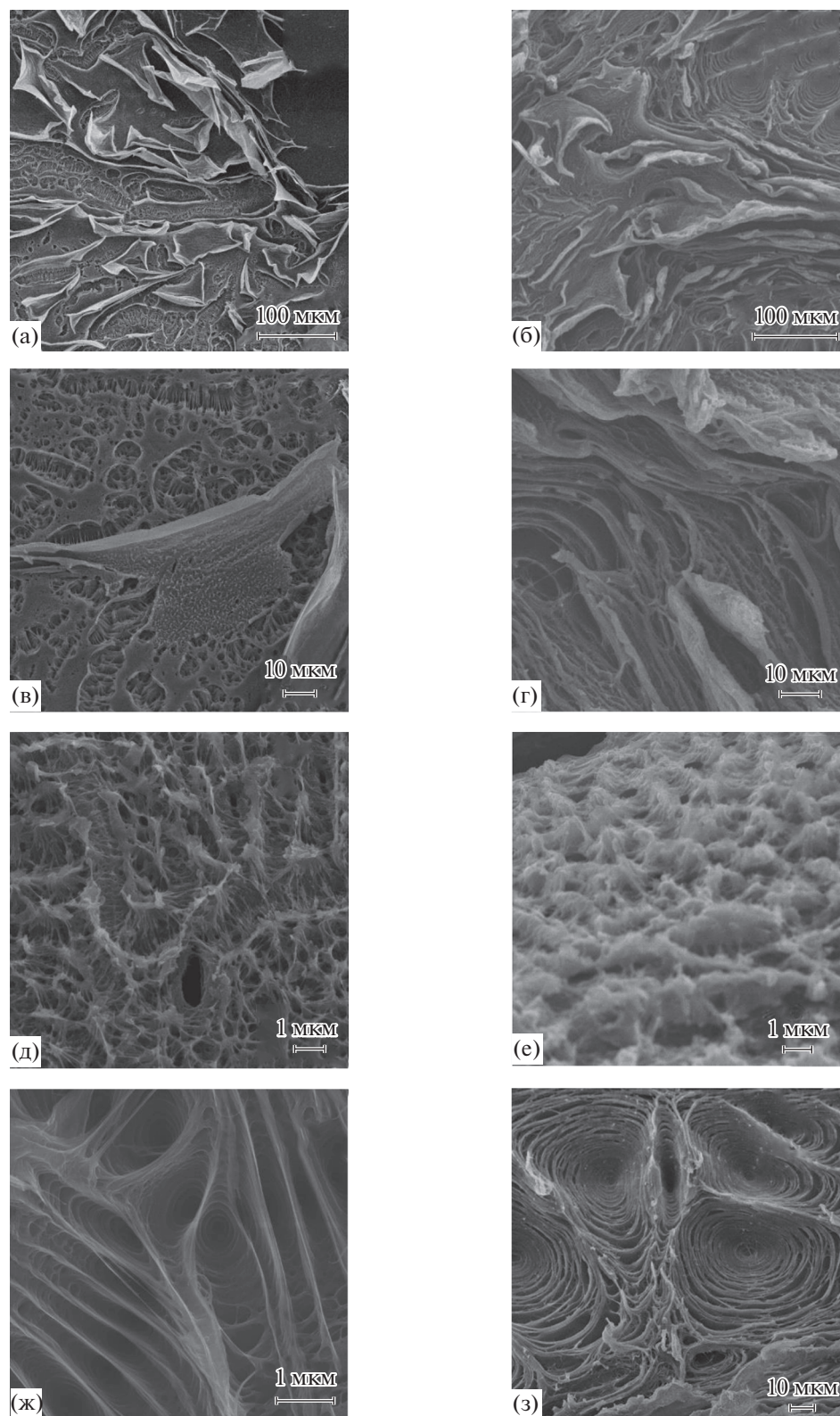


Рис. 4. РЭМ-изображения поверхности ВОПГ УПВ-1Т после облучения ионами 30 кэВ He⁺ с флюенсом $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре (а, в, д, ж) и при температуре 250°C (б, г, е, з).

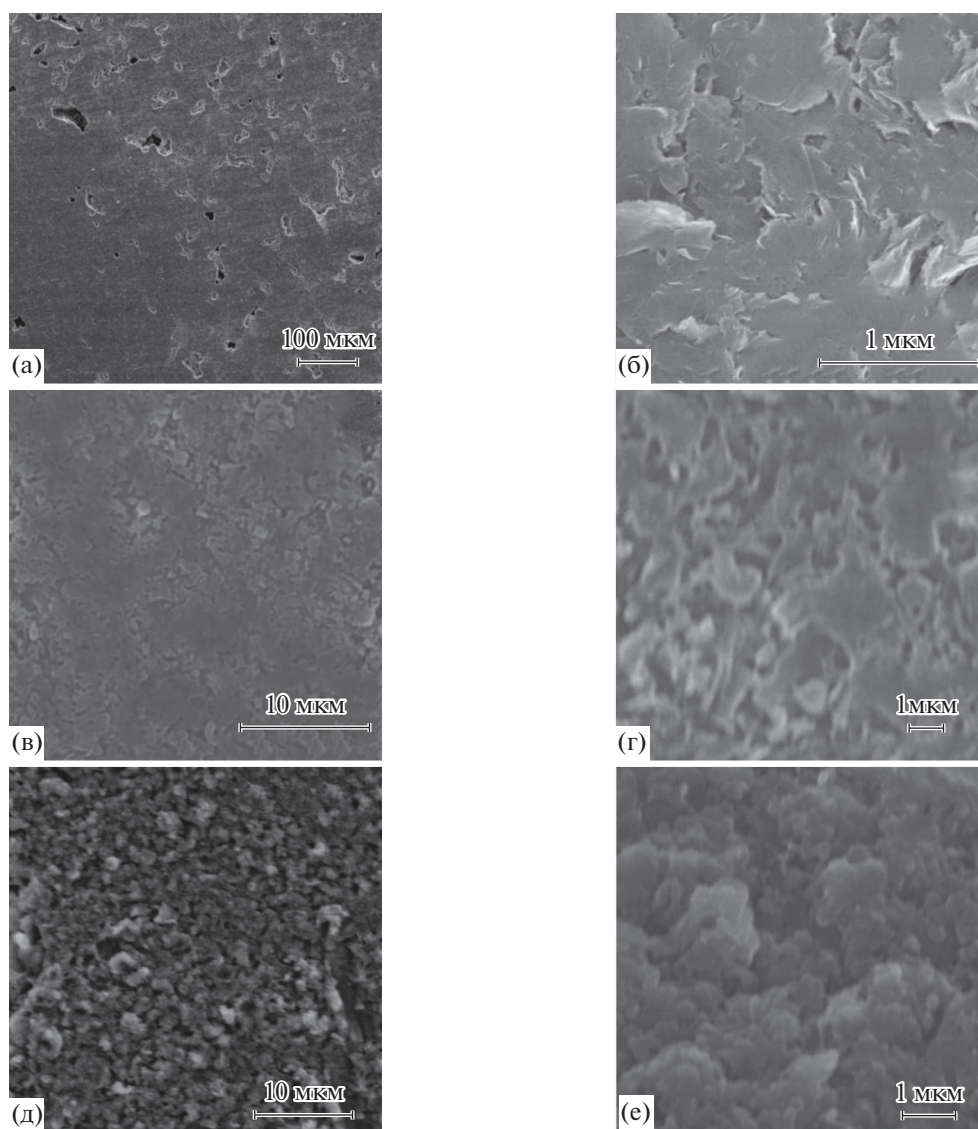


Рис. 5. РЭМ-изображения поверхности мелкозернистого графита МПГ-8 до (а, б) и после облучения ионами 30 кэВ He^+ с флюенсом $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре (в, г) и при температуре 250°C (д, е).

Острые края чешуек притупляются (рис. 6г). Увеличение температуры облучения до 250°C приводит к образованию на поверхности висцероподобных структур размером $\leq 1 \text{ мкм}$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные показывают, что воздействие облучения ионами гелия с энергией 30 кэВ с флюенсом $\geq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ на поверхность ВОПГ имеет как различия, так и сходство с обнаруженным ранее разнообразием модификации поверхности при меньших флюенсах [8, 11, 13, 19, 20, 22]. После облучения ВОПГ с флюенсом $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ также наблюдаются блистеры, гребневидные структуры и протяженные поры (см. рис. 2д, 2е). Вместе с ни-

ми происходит образование новых структур в виде отслоений. При флюенсе $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ блистеры и гребневидные структуры исчезают. Вместо них наблюдается субмикронное расслоение в виде овальных кратеров с расслоенными концентрическими стенками поверхности, субмикронная пористость и образование висцероподобных структур (см. рис. 4д–4з).

Выявленное влияние температуры и флюенса облучения на морфологию поверхности очевидно связано как с релаксацией возникающих в материале напряжений, так и с изменениями кристаллической структуры. Значительное влияние температуры облучения на кристаллическую структуру показывают спектры КРС. На рис. 6 приведены спектры комбинационного рассеяния света до и

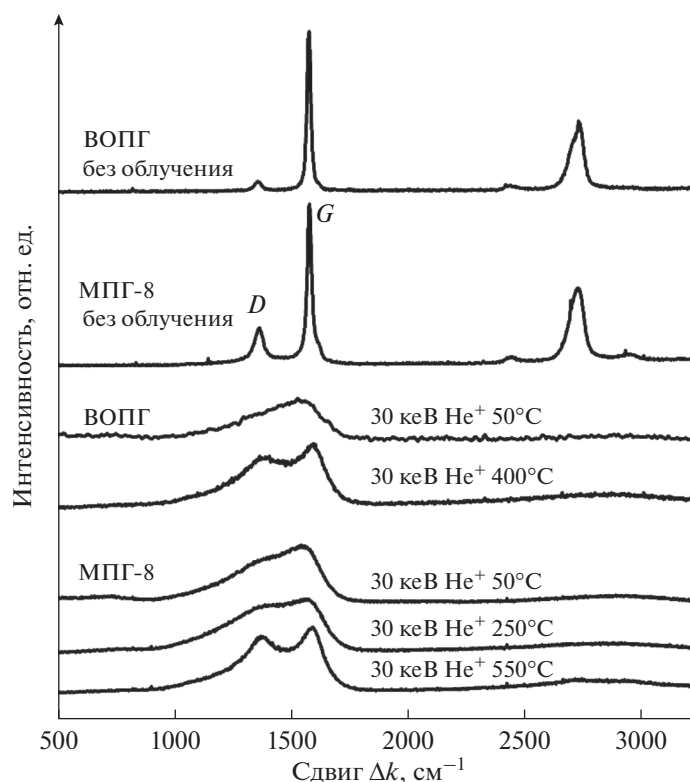


Рис. 6. Спектры КРС высокоориентированного пиролитического графита УПВ-1Т и мелкозернистого графита МПГ-8 до и после облучения.

после облучения ионами 30 кэВ He^+ УПВ-1Т и МПГ-8 с флюенсом $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ в интервале температур от комнатной до 600°C. Спектры КРС содержат два основных пика первого порядка: пик *G* (графитовый пик) при сдвиге частоты $\Delta k \sim 1580 \text{ см}^{-1}$ и пик *D*, обусловленный несовершенством кристаллической структуры при $\Delta k \sim 1350 \text{ см}^{-1}$, а также соответствующие им пики второго порядка: 2*D* пик (обертон *D* пика) и др. [22, 23]. Аморфизация поверхностного слоя при температурах близких к комнатной приводит в спектрах КРС к широкому куполу вместо разделенных *G* и *D* пиков. С увеличением температуры облучения происходит динамический отжиг радиационных нарушений, что видно по уширенным *G* и *D* пикам. Анализ спектров КРС как для ВОПГ, так и для мелкозернистого графита показывает аморфизованное состояние материала после облучения при комнатной температуре и графитоподобную структуру для облучения при повышенных температурах. Такая трансформация спектров КРС при ионном облучении является характерной для графитов и связывается со значительной концентрацией радиационных дефектов в облученном слое [24, 25], при этом сам слой остается графитоподобным.

Аморфизация ВОПГ при комнатной температуре облучения приводит к деградации его слоистой структуры. При этом релаксация возникаю-

щих напряжений происходит во всей чешуйке целиком, приводя к ее изгибу и скручиванию (рис. 7а). Появление и исчезновение блистеринга (рис. 3д) и пористости (рис. 7б) в зависимости от флюенса облучения могут дополнительно влиять на релаксацию напряжений в чешуйке. Причиной скручивания чешуек при комнатной температуре облучения может являться также большая, чем при повышенных температурах, скорость радиационно-индуцированных размерных изменений в графитах [26]. Подавление аморфизации при увеличении температуры облучения приводит к тому, что в чешуйках сохраняется слоистая структура графита. В результате индуцированных ионами гелия напряжений чешуйки продолжают расслаиваться. Это проявляется в увеличении толщины чешуек, а также при достаточном флюенсе в виде овальных кратеров с расслоенными концентрическими стенками (рис. 4г, 4з). Субмикронное расслоение на участках поверхности, сохранявшихся не расслоенными при меньшем флюенсе, говорит о частичной деградации ламеллярной структуры ВОПГ даже при повышенных температурах облучения.

Отметим, что образование отслоенных чешуек недавно обнаружено для пиролитических графитов при импульсном воздействии ионами дейтерия с энергией 7 кэВ/ат. с флюенсом за один им-

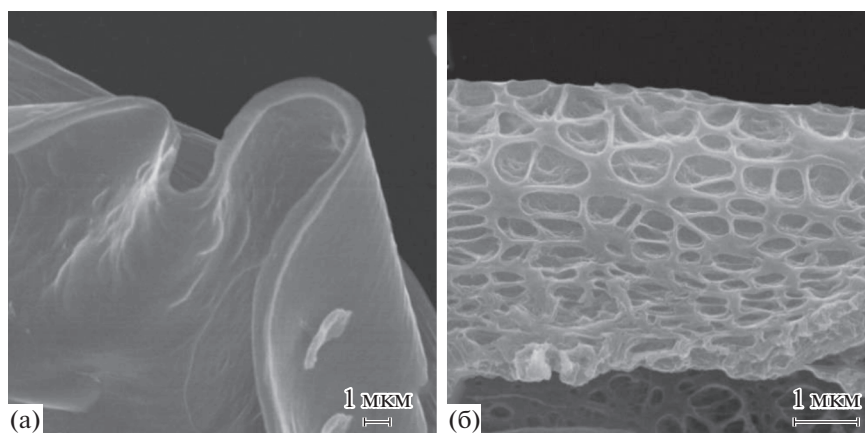


Рис. 7. РЭМ-изображения изгиба отслоения (флюенс $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$) (а) и открытой пористости на отслоении (флюенс $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$) (б) после облучения ионами 30 кэВ He^+ при комнатной температуре.

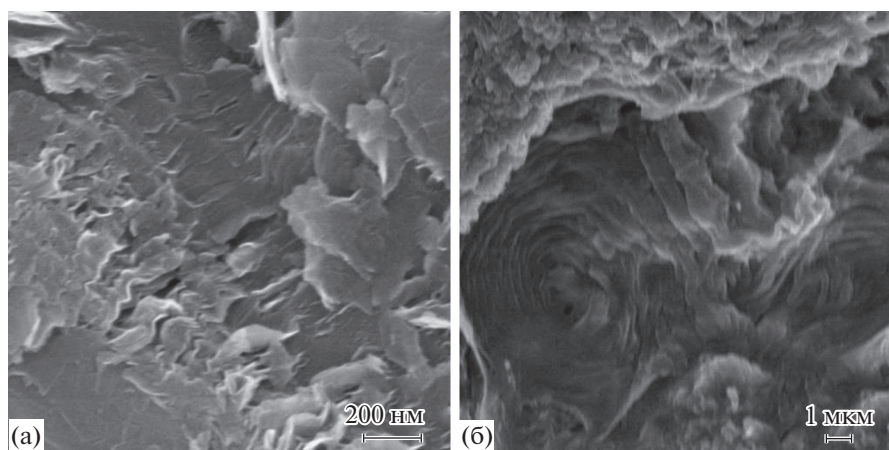


Рис. 8. РЭМ-изображения микроструктуры зерен МПГ-8 до (а) и после облучения (б) ионами 30 кэВ He^+ при температуре облучения 250°C с флюенсом $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

пульс $\sim 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при нагреве образца от пучка до 2330°C [27]. Уже после однократного импульса поверхность пиролитического графита расслаивалась подобно поверхности ВОПГ в настоящей работе. Увеличение числа импульсов приводило к агломерации чешуек и их скручиванию. Облучение десятками импульсов приводило к формированию на их месте холмов, склонами которых являлись поднятые отслоенные чешуйки. На вершине холмов наблюдали рост нитевидных вискроподобных кристаллов.

Что касается мелкозернистого графита МПГ-8, то облучение ионами He^+ с флюенсами до $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ не приводит к кардинальным изменениям его микроструктуры по сравнению с ВОПГ. Вместе с тем, некоторые ионно-индуцированные морфологические элементы характерные для ВОПГ наблюдаются и для мелкозернистого графита. Так, например, РЭМ-изображение на рис. 8 демонстрирует образование кристаллитов в виде кон-

центрических слоев. Из-за субмикронного размера ионно-индуцированных элементов они в меньшей степени изменяют микроструктуру мелкозернистого графита по сравнению с ВОПГ.

ВЫВОДЫ

Проведено сравнительное исследование влияния высокодозного облучения ионами гелия с энергией 30 кэВ при температурах от комнатной до 600°C с флюенсом $1 \cdot 10^{18}$ и $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ на морфологию поверхности и структуру высокоориентированного пиролитического графита УПВ-1Т и мелкозернистого поликристаллического графита МПГ-8.

Выявлены новые ионно-индуцированные морфологические элементы, дополняющие ранее установленные при меньших флюенсах облучения. Наряду с усадочными трещинами, блистерами, гребневидными структурами и протяженными

порами облучение ВОПГ при высоких флюенсах приводит к отслоениям в виде изогнутых вплоть до скручивания графитовых чешуек и к висцеро-подобным структурам.

Значительные различия в геометрии отслоений на поверхности ВОПГ при комнатной и повышенной температурах облучения связаны по данным спектроскопии комбинационного рассеяния света с аморфизацией графита при комнатной температуре.

Ионное облучение мелкозернистого графита МПГ-8 не приводит к кардинальным изменениям его микроструктуры по сравнению с ВОПГ, что связано с ограниченным числом и субмикронным размером ионно-индуцированных морфологических элементов в нем по сравнению с ВОПГ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30058). В работе использовано оборудование Центра коллективного пользования МГТУ “СТАНКИН” и “Ускорительного комплекса МГУ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Virgil'ev Yu.S., Kalyagina I.P. // Inorg. Mater. 2004. V. 40. P. S33–S49.
2. Burchell T.D. // MRS Bull. 1997. V. 22. P. 29–35.
3. Burchell T.D., Snead L.L. // J. Nucl. Mater. 2007. V. 371. P. 18–27.
4. Telling R.H., Heggie M.I. // Philos. Mag. 2007. V. 87. P. 4797–4846.
5. Mrozowski S. // Phys. Rev. 1952. V. 85 (4). P. 609–620.
6. Brocklehurst J.E., Kelly B.T. // Carbon. 1993. V. 31. P. 179–183.
7. Arregui-Mena J.-D., Worth R.N., Tunes M.A., Edmondson P.D. // Mater. Des. 2021. V. 204. P. 109673.
8. Tanabe T. // Phys. Scr. 1996. V. 1996. No. T64. P. 7–16.
9. Muto S., Tanabe T. // Philos. Mag. A. 1997. V. 76. P. 679–690.
10. Elman B.S., Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., et al. // Phys. Rev. B 1981. V. 24. P. 1027–1034.
11. Niwase K. // Mater. Sci. Eng. A. 2005. V. 400–401. P. 101–104.
12. Heggie M.I., Suarez-Martinez I., Davidson C., Haffenden G. // J. Nucl. Mater. 2011. V. 413. P. 150–155.
13. Johns S., He L., Kane J.J. et al. // Carbon. 2020. V. 159. P. 119–121.
14. Barsoum M.W., Zhao X., Shanazarov S. // Phys. Rev. Mat. 2019. V. 3. P. 013602.
15. Rooney A.P., Li Z., Zhao W., et al. // Nat. Commun. 2018. V. 9. P. 3597.
16. Liu Z., Zheng Q.S., Liu J.Z. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 201909.
17. Kuzumaki T., Hayashi T., Ichinose H., et al. // Philos. Mag. A. 1998. V. 77 (6). P. 1461–1469.
18. Hinks J.A., Haigh S.J., Greaves G., et al. // Carbon. 2014. V. 68. P. 273–284.
19. Annis B.K., Pedraza D.F., Withrow S.P. // J. Mater. Res. 1993. V. 8. P. 2587–2599.
20. Liu D., Cherns D., Johns S. et al // Carbon. 2021. V. 173. P. 215–231.
21. Mashkova E.S., Molchanov V.A. Medium-Energy Ion Reflection from Solids. 1985. Amsterdam: North-Holland.
22. Zhao Y., Lv S., Gao J., et al. // J. Nucl. Mater. 2023. V. 577. P. 154308.
23. Ferrari A.C., Robertson J. // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. P. 14095.
24. Pimenta M.A., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S., et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2007. V. 9 (11). P. 1276.
25. Niwase K. // Int. J. Spect. 2012. V. 2012. P. 197609.
26. Платонов П.А., Штромбах Я.И., Карпунин В.И., Виргульев Ю.С., Чугунов О.К., Трофимчук Е.И. Действие излучения на графит высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. Атомноводородная энергетика и технология: Сб. статей. 1984. Москва: Энергоатомиздат. Вып. 6. С. 77.
27. Беграмбеков Л.Б., Пунтаков Н.А., Грунин А.В. Тр. XXVI Междунар. конф. “Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП-2023)”. 21–25 авг. 2023, Ярославль. 2023. Москва: НИЯУ МИФИ. Т. 1.

Effects of the Layered Graphite Structure at High Fluences of 30-keV Helium Ion Irradiation

N. N. Andrianova^{1, 2}, A. M. Borisov^{1, 2, 3}, E. A. Vorobyeva¹,
M. A. Ovchinnikov^{1, *}, V. V. Sleptsov², and R. A. Tsyrov²

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

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

³ Moscow State Technological University STANKIN, Moscow, 127994 Russia

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

Received April 23, 2024; revised April 23, 2024; accepted April 30, 2024

Abstract—The effect of high-fluence 30 keV helium ion irradiation with the fluence from 10^{18} to $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in the temperature range from room temperature to 600°C on the morphology and surface structure of highly

oriented pyrolytic graphite UPV-1T and fine-grained polycrystalline graphite MPG-8 has been studied experimentally. Ion-induced morphological elements complementing those previously established at low irradiation fluences ($\sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$) have been identified. Irradiation of highly oriented pyrolytic graphite at high fluences results in delaminations, which manifest themselves as graphite flakes that are bent, twisted, and have whisker-like structures. Irradiation of fine-grained graphite does not significantly change its microstructure compared to highly oriented pyrolytic graphite.

Keywords: fine-grained dense graphite, highly-oriented pyrolytic graphite, ion irradiation, He^+ ions, radiation damage, surface morphology, graphite delamination, electron microscopy, Raman spectroscopy