

Имитация реакторного облучения материалов высокодозным ионным облучением

Н.Н. Андрианова, А.М. Борисов, М.А. Овчинников

Научная конференция НИИЯФ МГУ по
итогам 2024 года

24.02.2025

УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Преимущества и недостатки облучения различными типами частиц при имитации радиационного воздействия

Преимущества

Недостатки

Электроны

Относительно «простой» источник — ПЭМ	Энергия ограничена 1 МэВ
Использует стандартный образец ПЭМ	Никаких каскадов
Высокая мощность дозы — короткое время облучения	Очень высокий ток пучка (высокая скорость СНА), приводящий к большому сдвигу температуры относительно нейтронов
	Плохой контроль температуры образца
	Сильная «гауссовская» форма (неравномерный профиль интенсивности) для пучка
	Без трансмутации

Тяжелые ионы

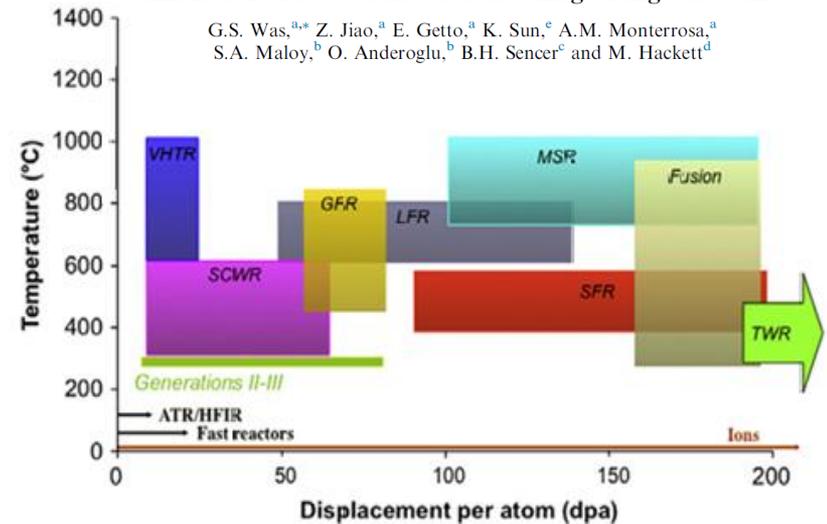
Высокая мощность дозы — короткое время облучения	Очень ограниченная глубина проникновения
Высокая T_{cp}	Сильно заостренный профиль повреждений
Каскады смещений	Очень высокий ток пучка (высокая скорость СНА), приводящий к большому сдвигу температуры относительно нейтронов
	Без трансмутации
	Возможность изменения состава при высокой дозе за счет имплантированного иона.

Протоны

Ускоренная мощность дозы — умеренное время облучения	Малые включения в образец
Умеренное ΔT	Меньшие, далеко отстоящие друг от друга каскады
Хорошая глубина проникновения	Без трансмутации
Ровный профиль радиационных нарушений на глубине до единиц мкм	Коэффициент повреждения ограничен отводом тепла

Emulation of reactor irradiation damage using ion beams

G.S. Was,^{a,*} Z. Jiao,^a E. Getto,^a K. Sun,^c A.M. Monterrosa,^a S.A. Maloy,^b O. Anderoglu,^b B.H. Sencer^c and M. Hackett^d

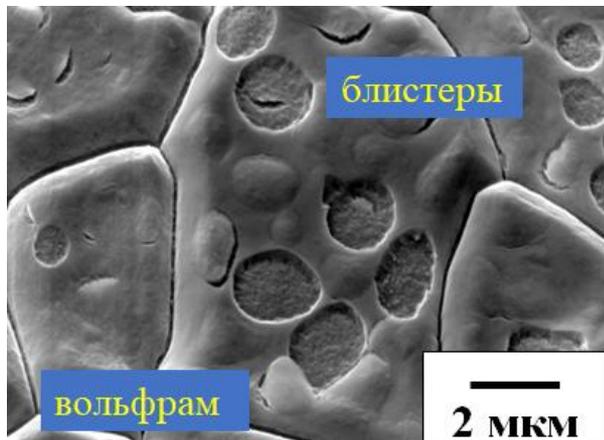
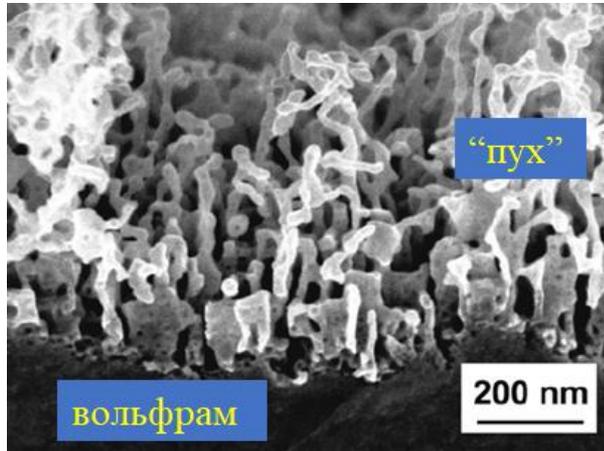


G. Was, et al. // Scripta Materialia 88 (2014) 33–36

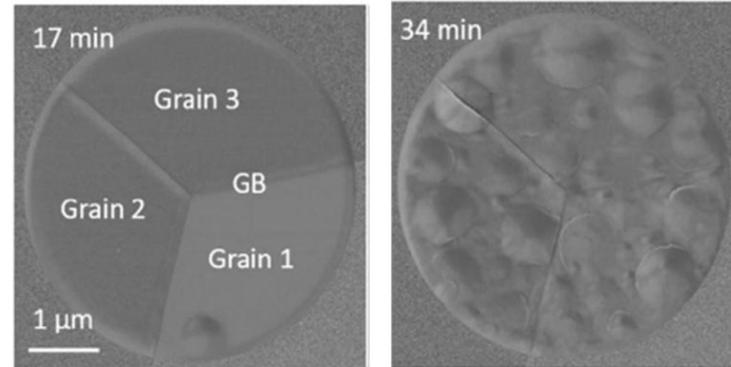
Обзор рабочих температур и доз радиационных нарушений в СНА для конструкционных материалов в существующих (поколение II) и предлагаемых будущих (поколение IV) энергетических системах ядерного деления и синтеза. Шесть систем деления IV поколения - это очень высокотемпературный реактор (VHTR), сверхкритический водяной реактор (SCWR), свинцовый быстрый реактор (LFR), газовый быстрый реактор (GFR), натриевый быстрый реактор (SFR) и реактор на расплавах солей (MSR).

МОТИВАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

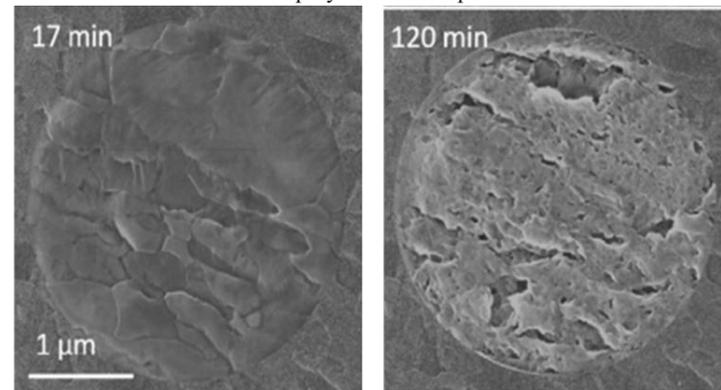
Вольфрам – перспективный материал для внутренних стенок в термоядерном реакторе
Актуальная проблема стойкости вольфрама к ионному облучению (He^+ , D^+)



**Влияние размера зерна на стойкость вольфрама к ионному облучению?
Приводит ли уменьшение размера зерна к изменению коэффициента распыления?**



He^+ → крупнозернистый W, $E=30$ кэВ,
 $\Phi \sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$
Образуются блистеры



He^+ → наноструктурный W, $E=30$ кэВ,
 $\Phi \sim 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$
Блистеры отсутствуют

Chen Z., Niu L-L., Wang Z., Tian L., Kecskes L, Zhu K., Wei Q. // *Acta Mater.* 2018. V.147. P. 100-112.

При облучении D^+ , $\text{He}^+ \rightarrow \text{W}$ на поверхности образуется "пух", блистеры [Ю.В. Мартыненко, С.Д. Федорович, В.П. Будаев, S. Kajita и др.]

МОТИВАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ДЛЯ ГРАФИТОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Размерные изменения: усадка, разбухание

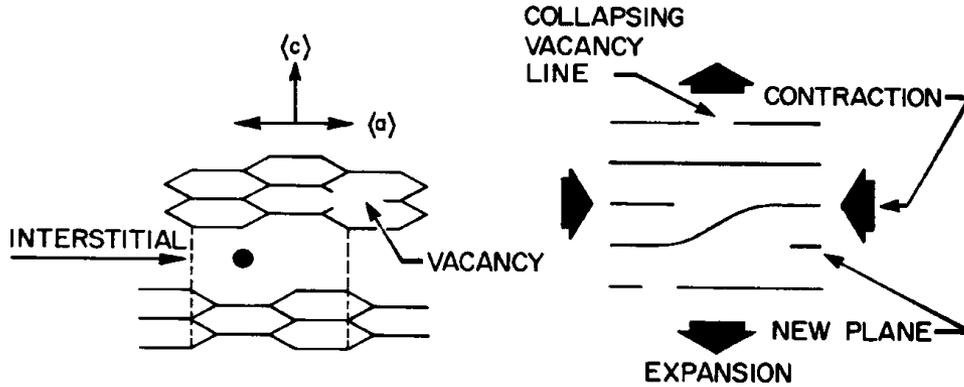
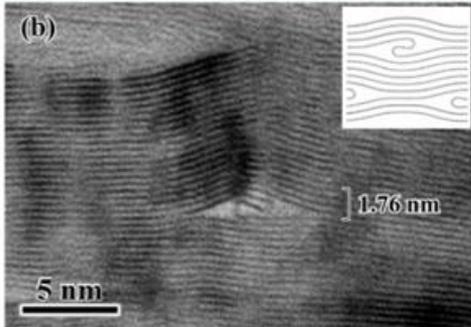
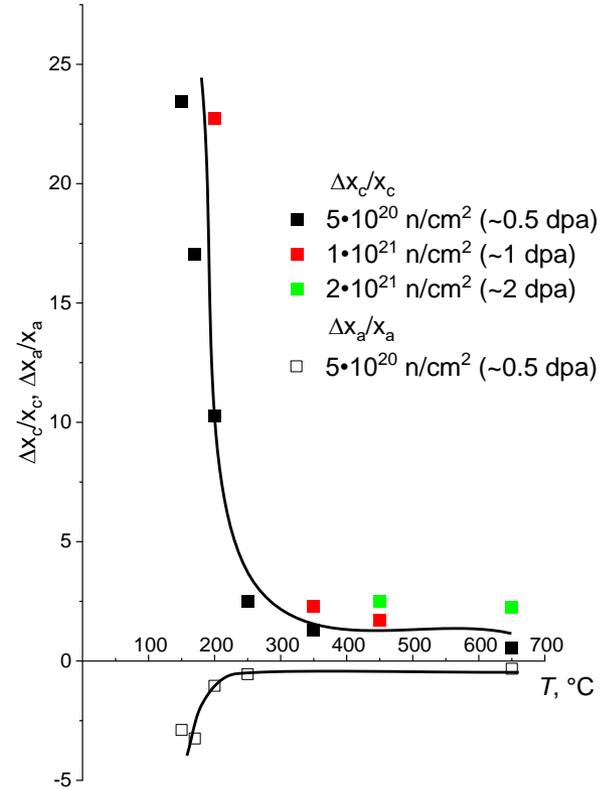


Figure 4. Radiation damage in graphite, showing the induced crystal dimensional changes.

Burchell T.D. // MRS Bulletin. 1997. V.22(4). P.29.



Нейтроны ~3.5 dpa, T=817°C



Letter to the editor

Experimental evidence for 'buckle, ruck and tuck' in neutron irradiated graphite

Steve Johns, Lingfeng He, Joshua J. Kane, William E. Windes, Rick Ulic, Chinnathambi Karthik

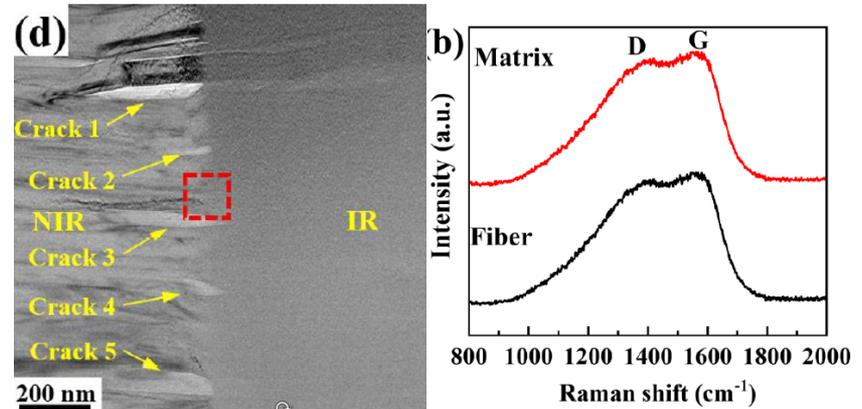
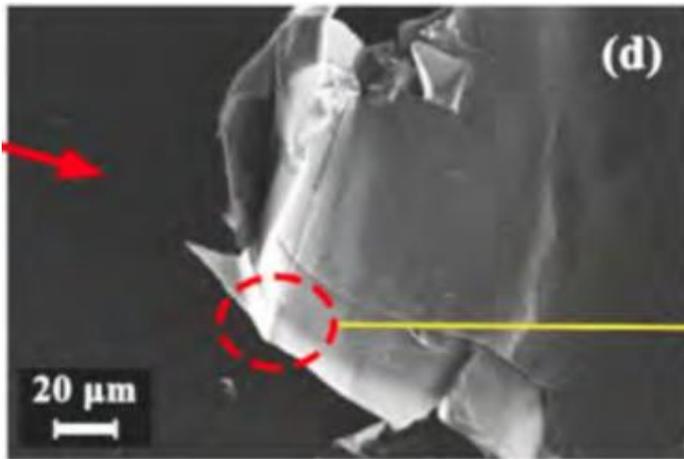
Относительное изменение размеров (в процентах) пиролитического графита вдоль кристаллографических осей *a* и *c*.

[B. Marsden. Irradiation damage in graphite. IAEA, 2000]

МОТИВАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

ИМИТАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1.8 MeV Ar⁺ $\Phi \sim 10^{16}$ см⁻²



X. Xie, et al. // *Applied Surface Science*. 682 (2025) 161677

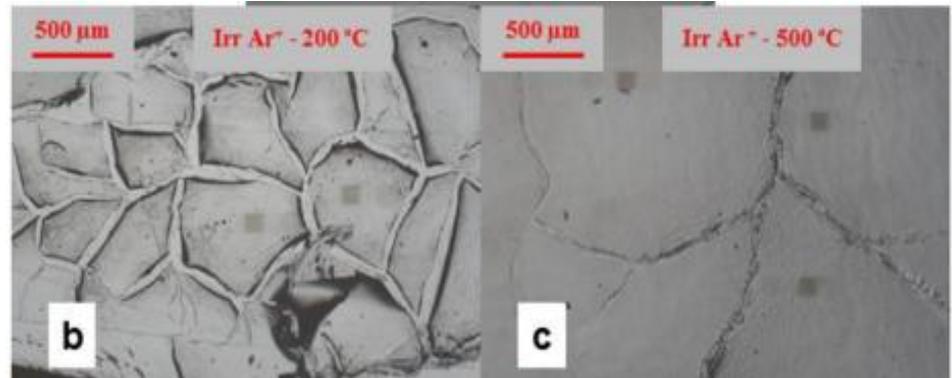
Имитационное исследование углеродного композита для реактора на расплавах солей облучением ионами Ar⁺ с энергией 1.8 МэВ (10 dpa).

На ВОПГ в зависимости от температуры (RT-700°C) и дозы (~0.5-4 dpa) облучения наблюдалась прожилковая структура и вертикальная чешуйчатая структура.

Y. Zhao, S. Lv, J. Gao et al. // *Journal of Nuclear Materials* 577 (2023) 154308

На ВОПГ при облучении ионами 150 кэВ C⁺ (1 dpa) и 800 кэВ Ar⁺ (4 dpa) наблюдалось образование чешуйчатой структуры в зависимости от температуры облучения.

N. Galy et al. // *Journal of Nuclear Materials* 502 (2018) 20-29



МОТИВАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки радиационных нарушений при высоких дозах облучения, соответствующих ожидаемой величине до 200 смещений на атом (СНА) в проектируемых реакторах нового поколения, перспективными являются имитационные исследования. Приведенные далее результаты работ затрагивают следующие проблемы взаимодействия частиц с материалами:

Для материалов термоядерных установок:

- **Влияние размера зерна на распыление материала**
- **Влияние ионно-индуцированного рельефа на распыление**

Для в термоядерных и ядерных реакторах:

- **Имитация радиационного формоизменения графитоподобных материалов при высоких СНА**
- **Эффекты внедрения гелия при имитации взаимодействия продуктов термоядерного синтеза с графитовыми материалами**

ЭКСПЕРИМЕНТ

ИОННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ

Масс-монохроматор НИИЯФ МГУ

Ионы: H_2^+ , He^+ , Ne^+ , Ar^+ , N^+ , N_2^+ , C^+ , O^+ , O_2^+

Энергия: 6-30 кэВ

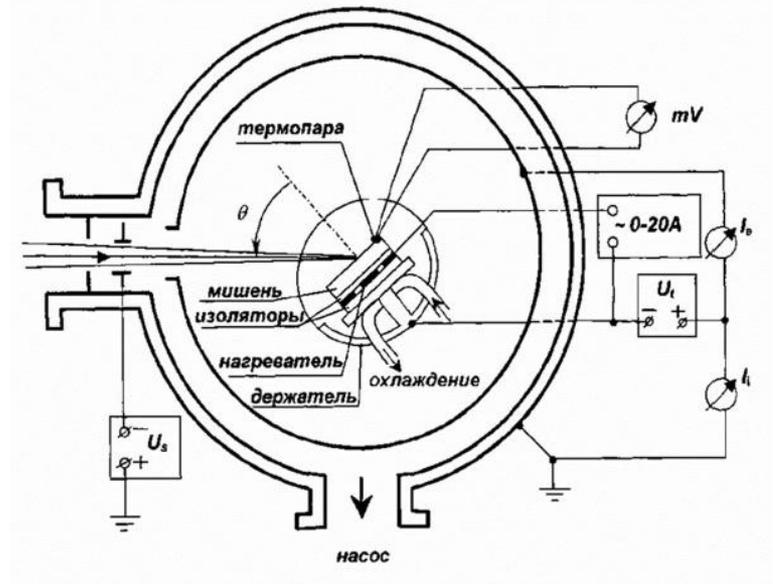
Нормальное падение

Флюенсы: $\varphi t \sim 10^{18}-10^{19}$ ион/см²

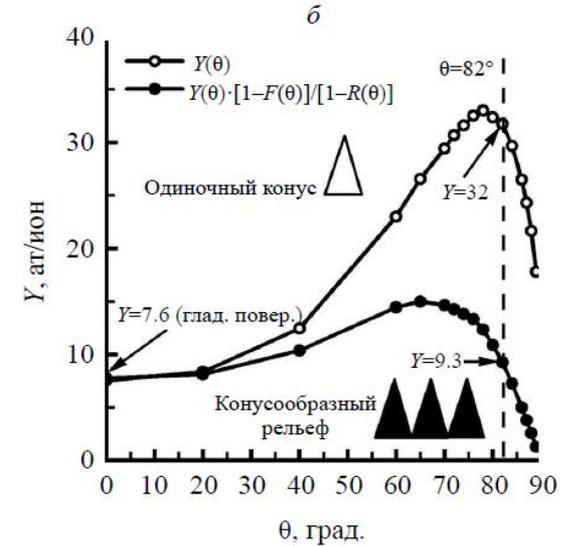
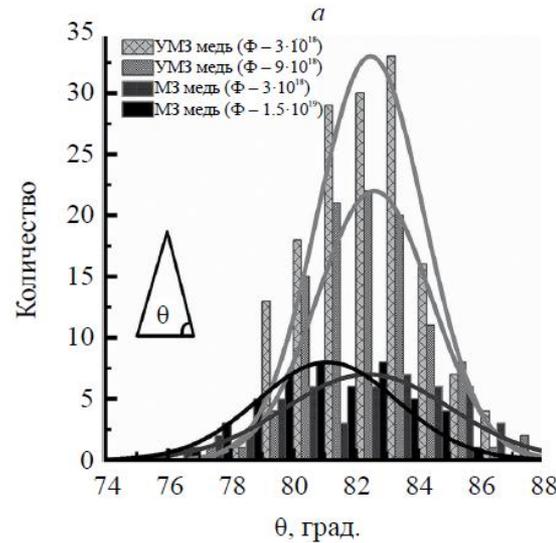
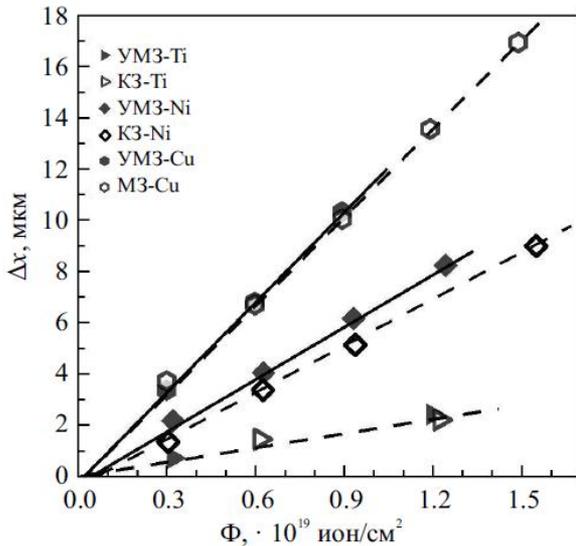
Плотность тока $\sim 0.2-0.3$ мА/см²

Сечение пучка ~ 0.3 см²

Температура облучения 50-700°C



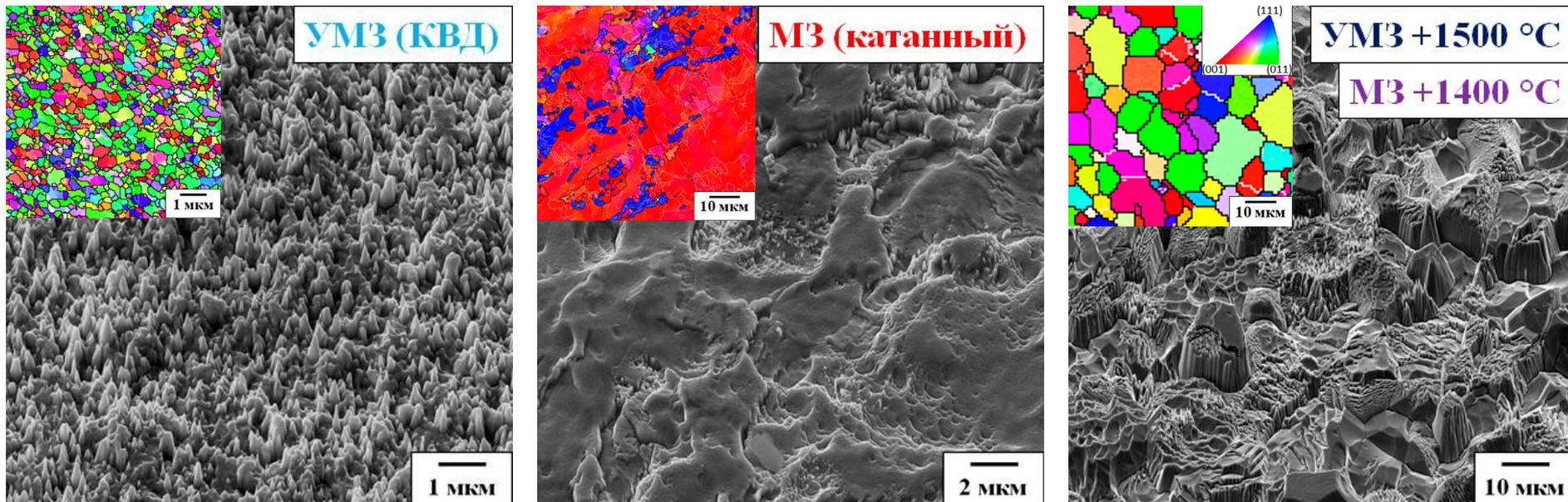
РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ МЕДИ, ТИТАНА И ВОЛЬФРАМА



Деформационное наноструктурирование меди, никеля и титана, приводит при высокодозном облучении ионами Ar⁺ с энергией 30 кэВ к конусообразному рельефу с поверхностной концентрацией конусов выше 10^8 см⁻². Концентрация и высота конусов на поверхности определяются размером зерен в объеме металла. Чем меньше размер зерен, тем выше концентрация и меньше высота конусов.

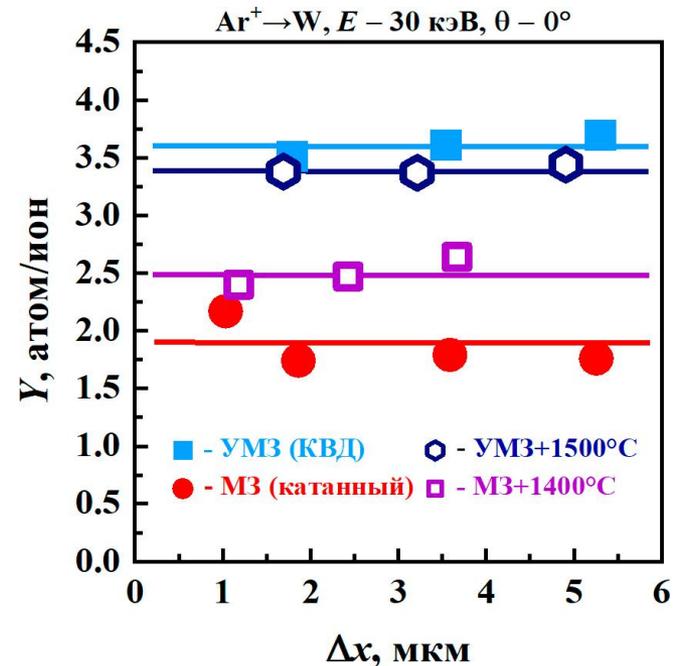
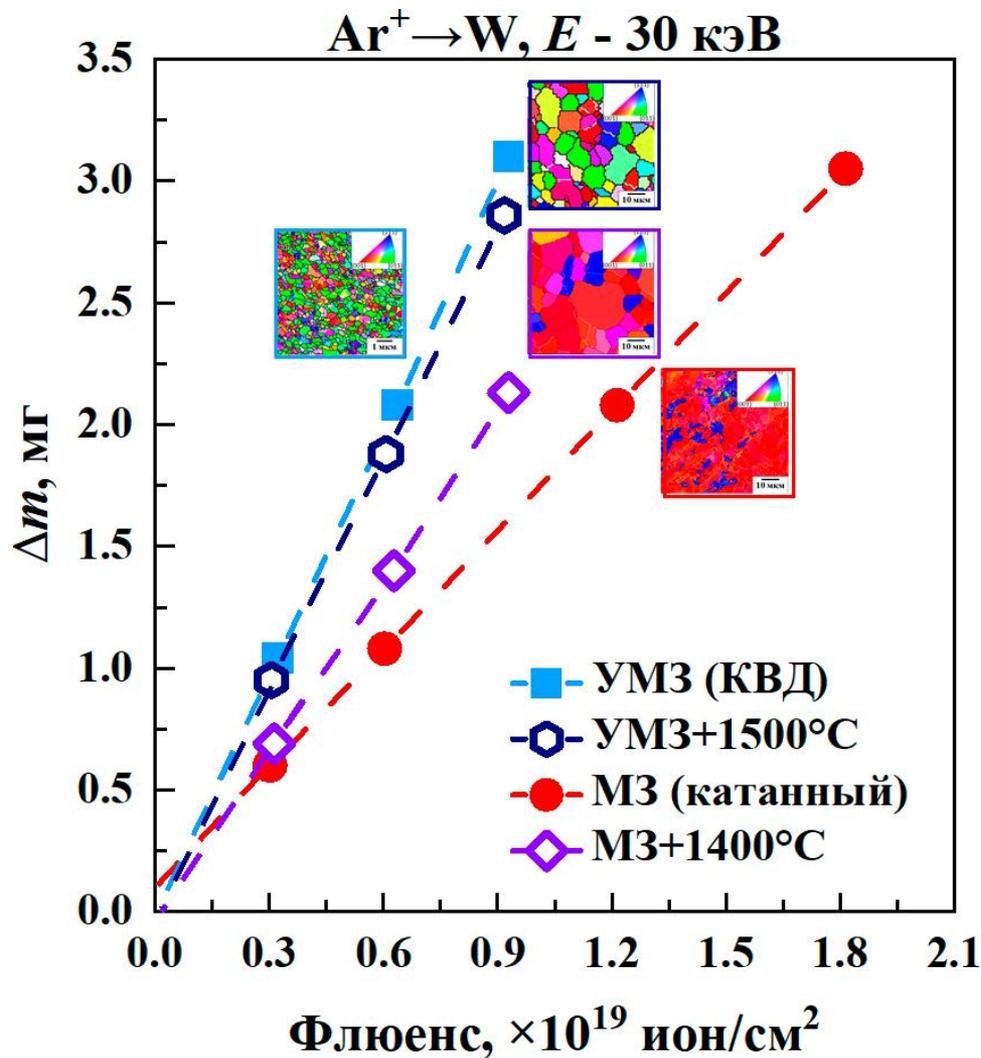
Коэффициент распыления не зависит от размера зерна

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ ВОЛЬФРАМА



- На поверхности **УМЗ** (размер зерен $d \sim 300$ нм) при облучении с $\Phi \geq 3 \cdot 10^{18}$ ион/см² образуется квазистационарный конусообразный рельеф с концентрацией конусов 10^9 см⁻². Концентрация и высота конических элементов сопоставимы с концентрацией зерен на поверхности и их размером d .
- На **МЗ (катанный)** (размер зерен $d \sim 1.7$ мкм) при облучении с $\Phi \approx 1 \cdot 10^{19}$ ион/см² – рельеф с перепадом высот между зернами, с конусами на наиболее протравленных зернах [ориентация (111)]. [На зернах с (001) – конусы не замечены].
- На **УМЗ+1500°C** ($d \sim 7$ мкм) и **МЗ+1400°C** ($d \sim 5$ мкм) при облучении с $\Phi \approx 1 \cdot 10^{19}$ ион/см² – рельеф с перепадом высот между зернами, с террасами, ямками травления и конусами на поверхности зерен.

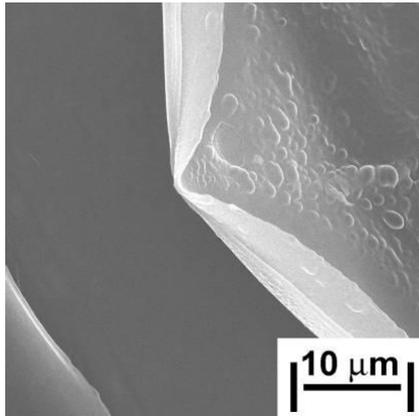
РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ ВОЛЬФРАМА



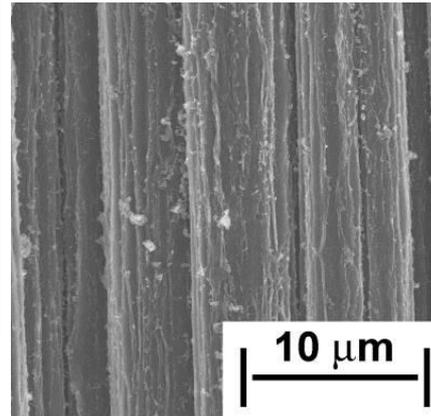
Стационарный конусообразный рельеф на поверхности W образуется при флуенсах, достаточных для распыления слоя толщиной, сопоставимой со средним размером зерна. **Размер зерен слабо влияет на Y (менее 10%), в то время как текстура может оказывать существенное (почти двукратное) влияние на Y .**

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

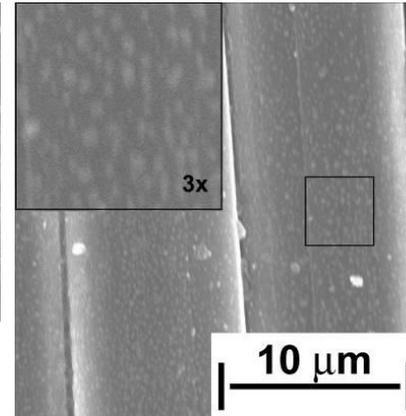
УПВ-1Т. T = 50°C
Флюенс $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$



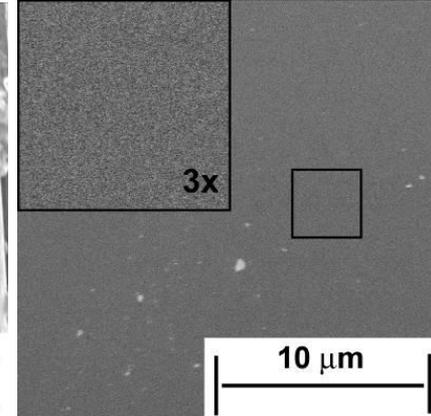
ВМН-4. T = 200°C
Флюенс $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$



ТГН-2МК. T = 200°C
Флюенс $3 \cdot 10^{18}$

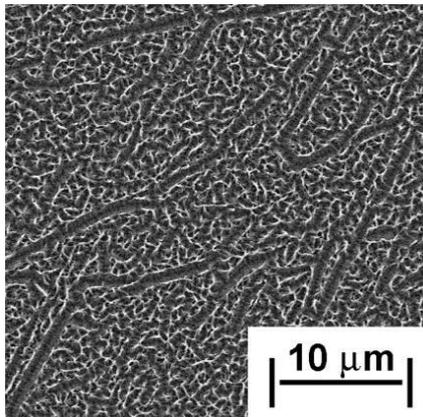


СУ 2000. T = 400°C
Флюенс $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$

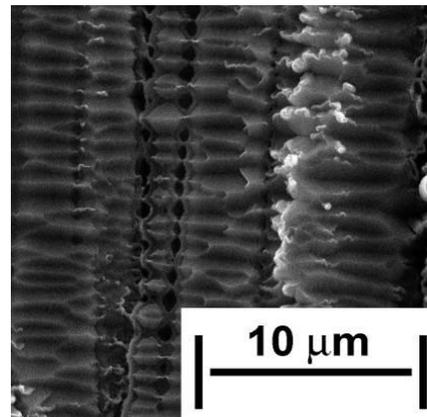


30 кэВ
He⁺

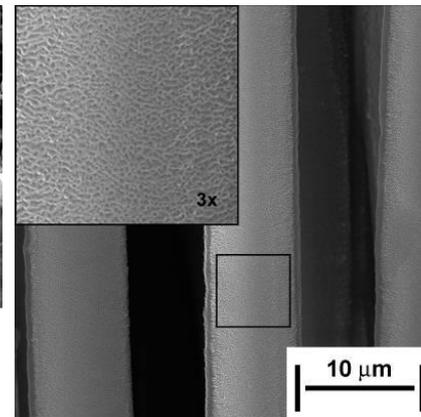
УПВ-1Т. T = 150°C
Флюенс $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$



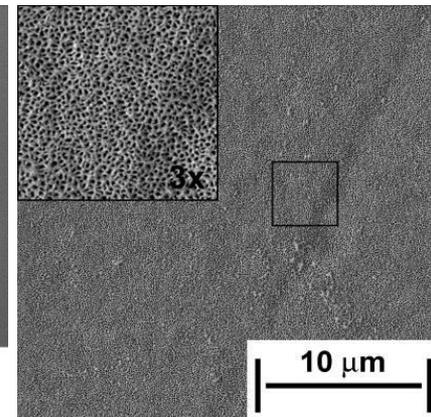
ВМН-4. T = 200°C
Флюенс $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$



ТГН-2МК. T = 200°C
Флюенс $3 \cdot 10^{18}$



СУ 2500. T = 500°C
Флюенс $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$



30 кэВ
Ar⁺

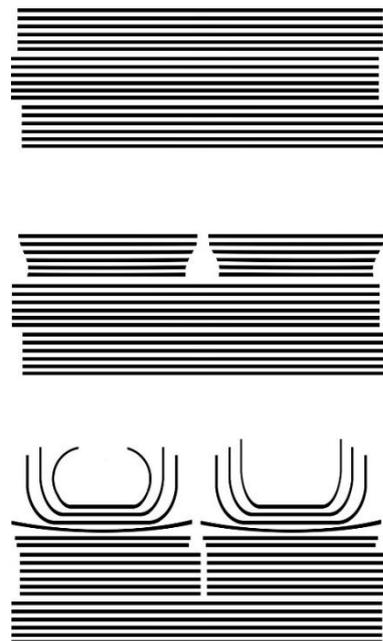
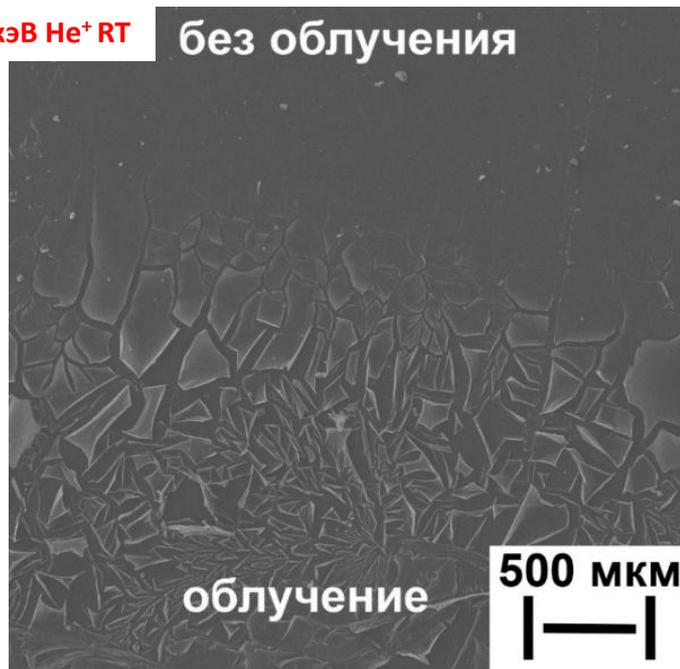
Ионно-индуцированная морфология поверхности сильно зависит как от вида углеродного материала, так и от сорта бомбардирующих ионов. Облучение более упорядоченных графитоподобных материалов приводит к более выраженным изменениям морфологии поверхности.

Эффекты микроструктуры углеродных материалов при ионно-лучевой модификации поверхности / Н. Н. Андрианова, А. М. Борисов, Е. А. Воробьева и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2024. Т. 88, № 4. С. 577–583

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ КВАЗИМОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГРАФИТА

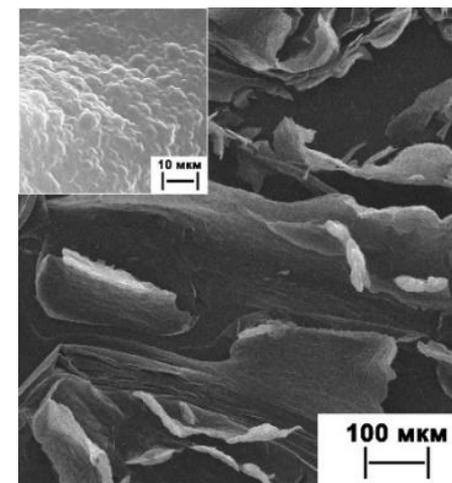
30 кэВ He⁺ RT

без облучения



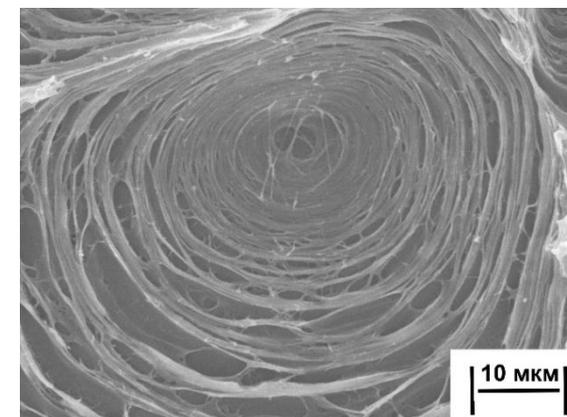
30 кэВ He⁺ ВОПГ УПВ-1Т
T = 250°C

25 и 70 dpa



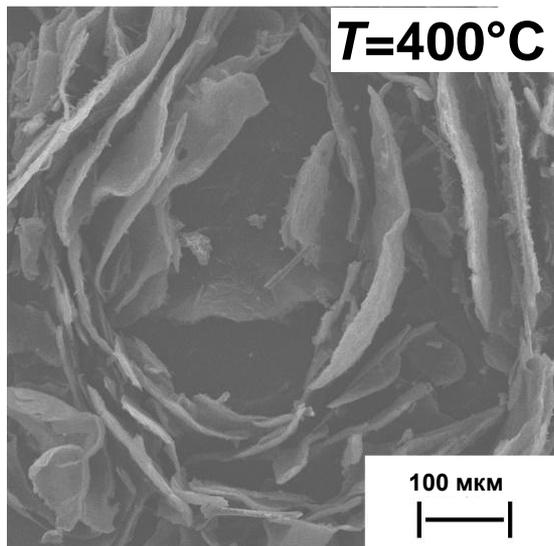
70 dpa

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 концентрическим стеночным структурам.

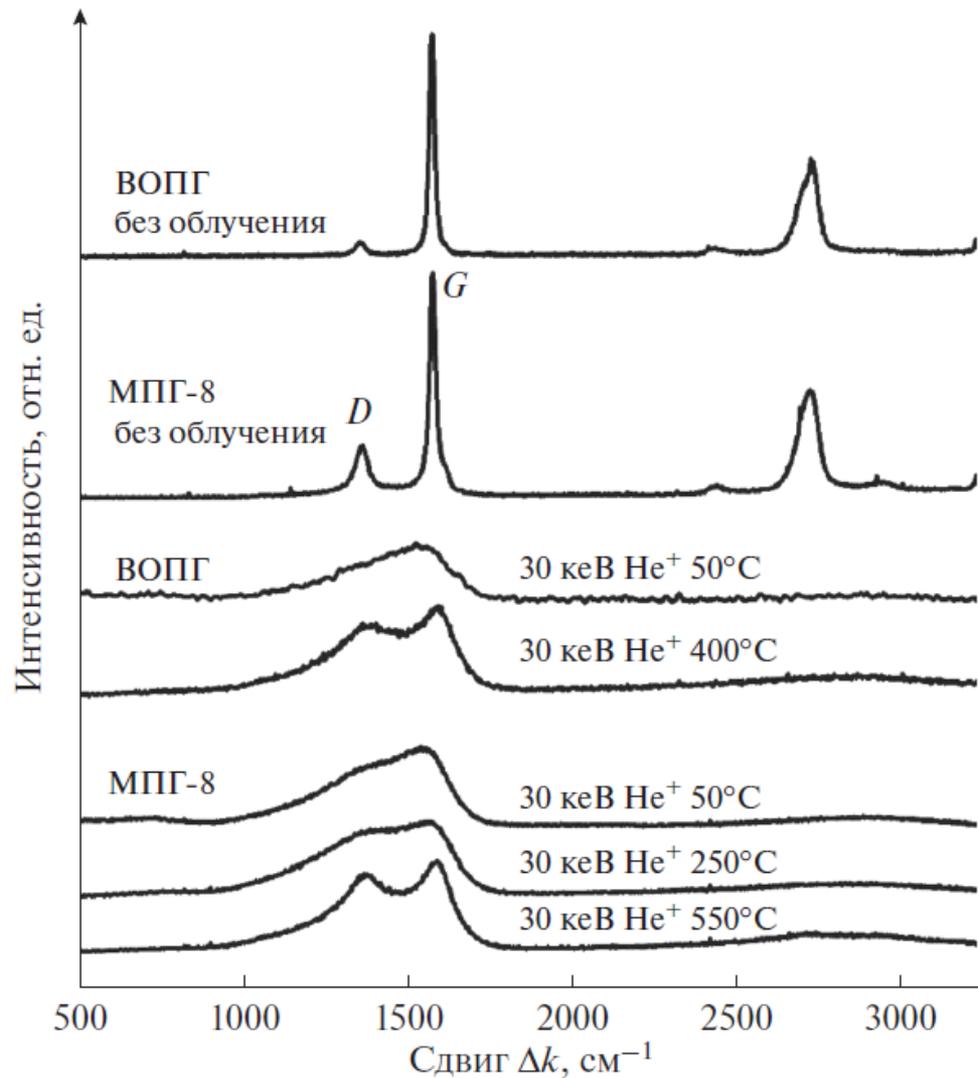
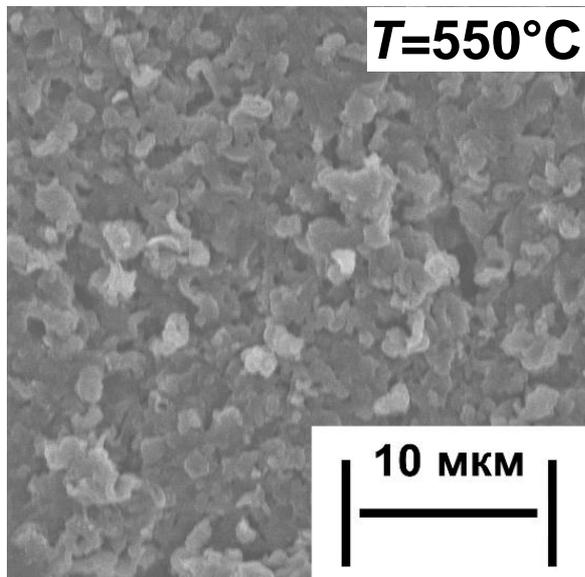


РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ КВАЗИМОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГРАФИТА

ВОПГ УПВ-1Т



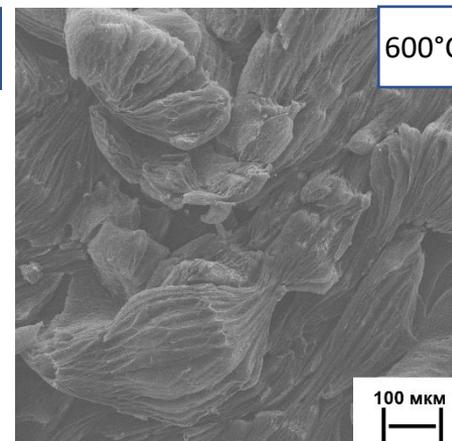
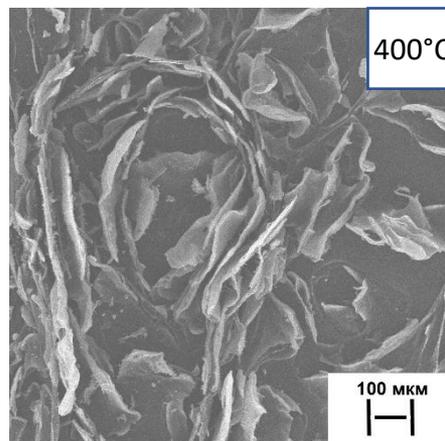
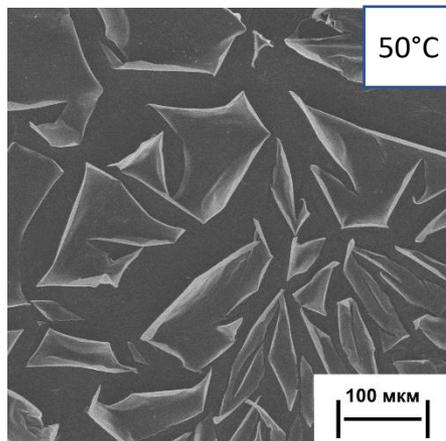
Мелкозернистый графит МПГ-8



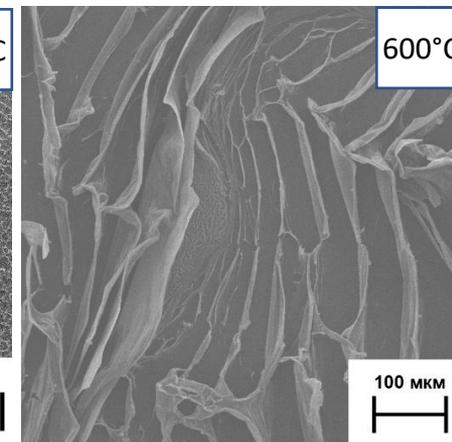
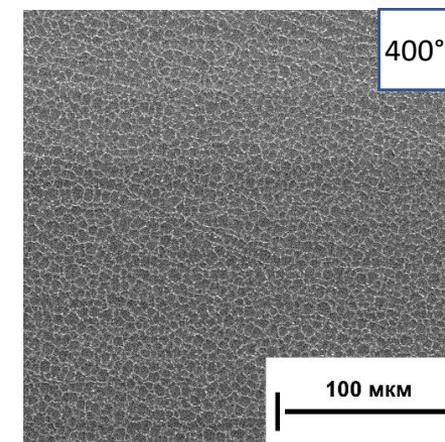
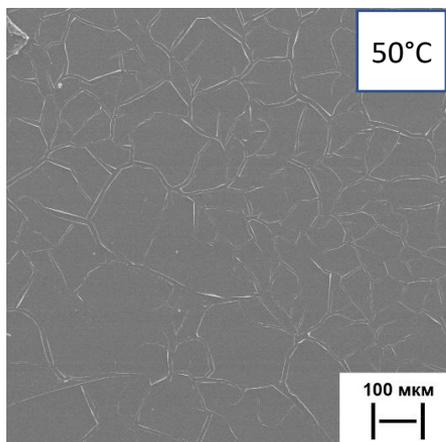
Спектры комбинационного рассеяния лазерного излучения с длиной волны 473 нм

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ КВАЗИМОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГРАФИТА

**ВОПГ УПВ-1Т,
30 кэВ
 $\Phi=1 \cdot 10^{18} \text{He}^+/\text{см}^2$**



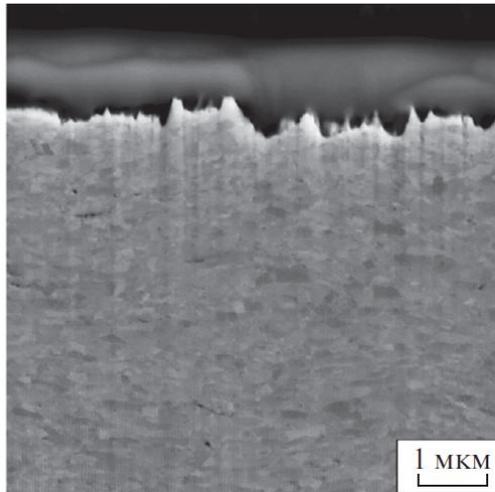
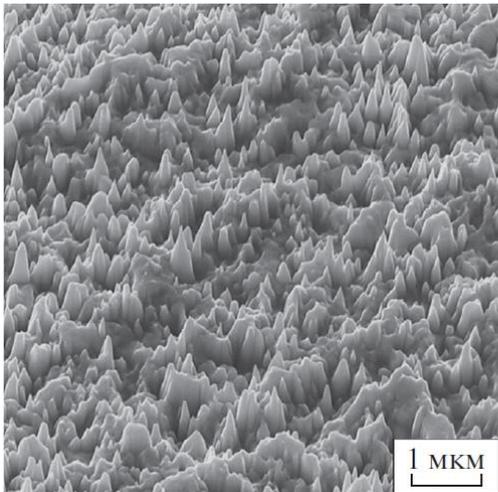
**ВОПГ УПВ-1Т,
30 кэВ
 $\Phi=1 \cdot 10^{18} \text{C}^+/\text{см}^2$**



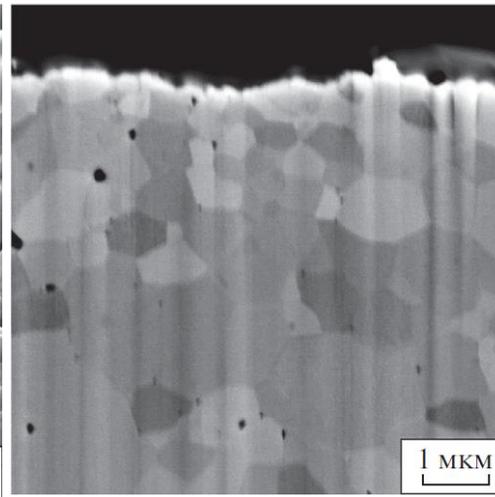
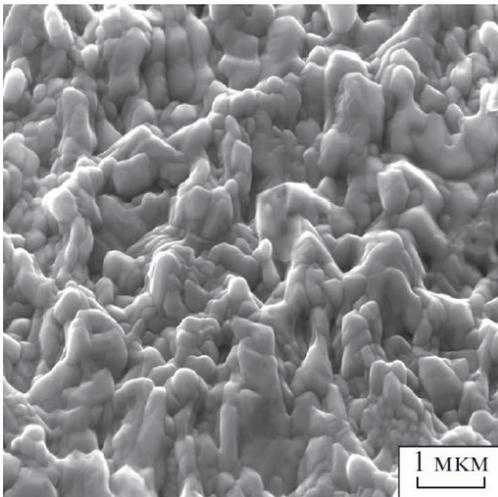
Высокодозная имплантация ионов гелия приводит как к эффектам радиационных нарушений решетки графита, так и к эффектам внедрения гелия при имитации взаимодействия продуктов термоядерного синтеза с графитовыми материалами. При этом надо учитывать значительные побочные эффекты модификации графита, если для имитации облучения нейтронами в атомных реакторах используется облучение ионами гелия.

Спасибо за внимание!

РЕЗУЛЬТАТЫ

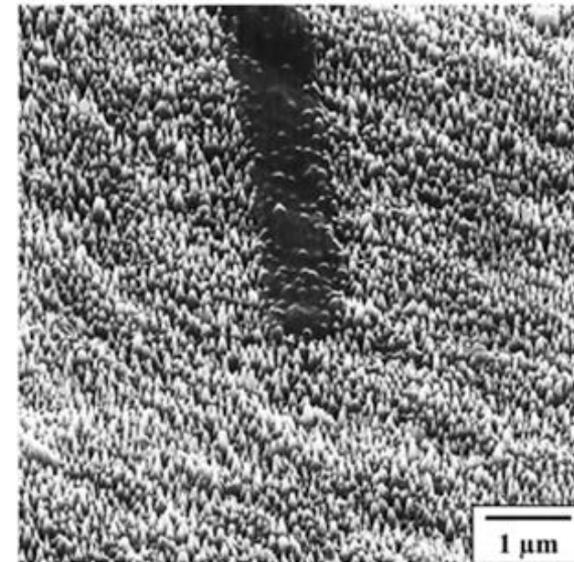
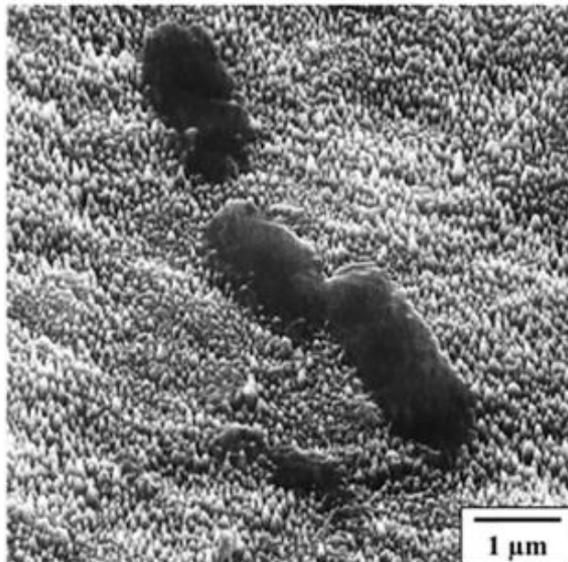
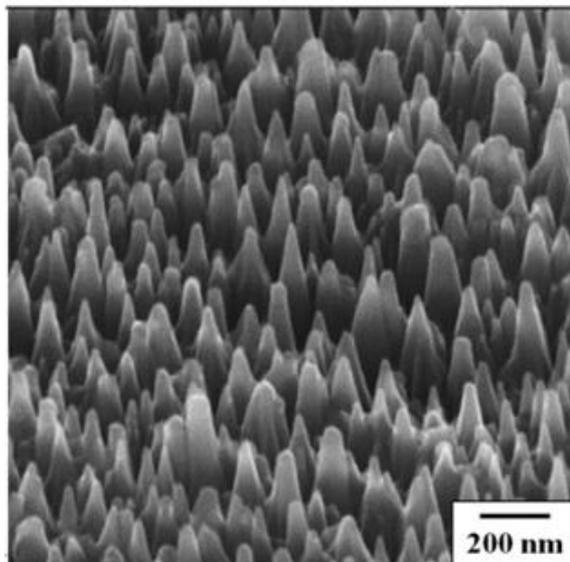


Формирование ультрамелкозернистой структуры в объеме вольфрама со средним размером зерен 300 нм путем деформационного наноструктурирования и последующее облучение ионами аргона с энергией 30 кэВ с флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² позволяет получить на его поверхности однородный конусообразный рельеф с поверхностной концентрацией конусов 10^8 – 10^9 см⁻² и высотой до 300 нм.



Конусообразный рельеф на поверхности ультрамелкозернистого вольфрама термически стабилен до температуры не менее, чем 1000°C, что составляет $0.34T_{пл}$. На стабильность конусообразного рельефа на поверхности не оказывает значительный рост зерен в объеме образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ



Показано получение антибактериальных поверхностей с помощью деформационного объемного наноструктурирования с последующим ионным облучением. Наношпы высотой 200 нм были равномерно распределены на расстоянии 100 нм. Повреждая клеточную стенку бактерий, наношпы проникают в кишечную палочку, в результате чего кишечная палочка теряет цитозольное содержимое.

Mulyukov R.R., Khisamov R.Kh., Baimova J.A., Borisov A.M., Baymiev A.K., Musabirov I.I., Ovchinnikov M.A., Safarov I.M., Timiryayev R.R. Novel approach to obtain antibacterial nanospike surface by titanium bulk nanostructuring followed by ion irradiation // Materials Letters 377 (2024) 137455 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137455>