

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 539.2/.6:539/.04
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-5-373-379>

Поступило в редакцию 31.08.2023
Received 31.08.2023

В. В. Пилько (мл.), академик Ф. Ф. Комаров, В. В. Пилько

*Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь*

**УСТОЙЧИВОСТЬ РЯДА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО SiC К БЛИСТЕРИНГУ И ФЛЕКИНГУ
ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ ГЕЛИЯ И ОТЖИГЕ**

Аннотация. Изложены результаты исследования устойчивости ряда конструкционных материалов (сплав Д16Т, Zr, стали ЭИ-847, 12Х18Н9Т) и поликристаллического SiC к блистерингу и флекингу при облучении ионами гелия с энергией 500 КэВ в диапазоне доз от 10^{16} до $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² и постимплантационном отжиге. Образцы нержавеющей стали, циркония, сплава Д16Т и карбида кремния облучены ионами гелия. Методом оптической микроскопии изучена структура поверхностных слоев облученных материалов непосредственно после облучения и после термического отжига при температурах от 300 до 750 °С. Определены дозовые и температурные диапазоны устойчивости к блистерингу и флекингу для всех изученных материалов. Рассмотрены основные виды нарушений структуры материалов.

Ключевые слова: имплантация, ионы гелия, отжиг, блистеринг, флекинг, радиационная стойкость

Для цитирования. Пилько, В. В. Устойчивость ряда конструкционных материалов и поликристаллического SiC к блистерингу и флекингу при имплантации ионов гелия и отжиге / В. В. Пилько, Ф. Ф. Комаров, В. В. Пилько // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 5. – С. 373–379. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-5-373-379>

Vladimir V. Pilko (jr.), Academician Fadei F. Komarov, Vladimir V. Pilko

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

**TOLERANCE OF SEVERAL CONSTRUCTION MATERIALS AND POLYCRYSTALLINE SiC
TO BLISTERING AND FLECKING DUE TO ION IMPLANTATION AND ANNEALING**

Abstract. The results on the tolerance of several construction materials (D16T alloy, Zr, ЭИ-847, 12Х18Н9Т steels) and polycrystalline SiC to blistering and flecking after irradiation with 500 keV He⁺ ions and following annealing have been highlighted. Samples of stainless steels, zirconium, D16T alloy and silicon carbide were irradiated with helium ions in the range from 10^{16} to $3 \cdot 10^{18}$ ion/cm². Immediately after irradiation and annealing under temperatures from 300 to 750 °C, the optical microscopy was used to study the structure of surface layers. Temperature and fluence ranges of tolerance to blistering and flecking were determined for all examined materials. Primary types of material structure distortions were reviewed.

Keywords: implantation, helium ions, annealing, blistering, flecking, radiation resistance

For citation. Pilko V. V., jr., Komarov F. F., Pilko V. V. Tolerance of several construction materials and polycrystalline SiC to blistering and flecking due to ion implantation and annealing. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 5, pp. 373–379 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-5-373-379>

Введение. В ядерном материаловедении проблемы радиационной стойкости, прежде всего, актуальны для конструкционных материалов ядерных реакторов атомных электростанций [1; 2]. Особенно важным является вопрос обеспечения стабильности линейных размеров тепловыделяющих элементов в течение всего периода их эксплуатации. Оболочки тепловыделяющих элементов подвергаются широкому спектру воздействий в условиях штатных режимов эксплуатации ядер-

ных реакторов: высокие температуры, коррозионные нагрузки, облучение нейтронами, гамма излучением. К основным факторам, меняющим свойства конструкционных материалов атомных реакторов, относятся введение атомов легких примесей и дефектообразование. Существенную роль в процессе изменения свойств конструкционных материалов ядерных реакторов играют продукты ядерных реакций трансмутации (гелий и водород) [3–5]. Атомы этих газов, образовавшиеся в результате реакций, влияют на процессы формирования и эволюции радиационных дефектов. Это влечет за собой изменения макроскопических свойств облучаемого материала (потерю пластичности, набухание, охрупчивание, блистеринг и флекинг). Высокоэнергетичная имплантация легких ионов позволяет экспериментально, с достаточно высокой степенью приближения, воспроизводить процессы введения легких примесей и дефектообразования в слоях материала, значительно удаленных от поверхностного стока, не прибегая к долговременным процессам облучения материала в реакторе [6; 7].

Целью настоящих исследований является получение данных о температурно-дозовых областях устойчивости образцов нержавеющей стали, циркония, сплава Д16Т и карбида кремния при имплантации ионов гелия и о закономерностях эволюции структуры облучаемых материалов в зависимости от дозы облучения и температуры отжига.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

подготовлены лабораторные образцы сплава Д16Т, Zr, сталей 12Х18Н9Т и ЭИ-847, поликристаллического SiC;

осуществлены расчеты параметров облучения, проведена высокоэнергетичная имплантация ионов гелия в объекты исследования в дозовом диапазоне от 10^{16} до $3 \cdot 10^{18}$ ион/см²;

выполнен постимплантационный отжиг образцов в температурном диапазоне от 300 до 750 °С, проведено исследование эволюции структуры образцов методами оптической микроскопии.

Материалы и методы исследования. Для осуществления имплантации ускоритель ионов AN-2500 дополнительно оснащен многофункциональным имплантационно-исследовательским модулем [8], позволяющим исследовать кристаллическую структуру, элементный состав и пространственное распределение компонент материала, производить имплантацию ионов H^+ , H_2^+ , He^+ , N_2^+ , N^+ в диапазоне энергий 400–1500 кэВ при скоростях набора дозы от $6 \cdot 10^{11}$ до $8 \cdot 10^{14}$ ион/с·см² при рабочем вакууме не хуже $2 \cdot 10^{-3}$ Па.

Для уточнения граничных температур отжига и концентраций примеси, приводящих к визуализации дефектов, были использованы образцы с градиентом дозы облучения.

Визуализация дефектов структуры материалов осуществлялась с помощью метода оптической микроскопии на приборе Olympus BX53M.

Для более точного планирования экспериментов по ионной имплантации было проведено моделирование процесса имплантации ионов гелия в железо с помощью программы SRIM. Расчеты показали, что формы концентрационных профилей распределения по глубине мишеней имплантированных атомов и генерированных вакансий можно хорошо аппроксимировать методами Пирсона [9]. Максимумы кривых распределения концентрации вакансий и внедренных атомов заглублены от поверхности более чем на 1 мкм уже при энергиях ионов 500 КэВ, в то время как различие положений концентрационных максимумов по глубине незначительно (на уровне 0,1 мкм). Результаты моделирования представлены на рис. 1.

Это позволяет предположить, что область вакансионных максимумов может послужить эффективным стоком для имплантированных атомов.

Результаты и их обсуждение. На основании результатов расчетов можно привести некоторые оценки эффективности воздействия ионной имплантации в сравнении с реальным реакторным облучением материалов. При дозе имплантации на уровне $3 \cdot 10^{17}$ атом/см² концентрация примеси в области максимума распределения близка к $1 \cdot 10^{22}$ атом/см³. Табулированное в [10] значение плотности для Fe составляет $8,5 \cdot 10^{22}$ атом/см³. Таким образом, максимальная концентрация примеси составляет 9,5 ат. %. Это значение превышает величину равновесного предела растворимости более чем на 2 порядка [11].

Концентрация атомов – продуктов реакций трансмутации в реакторных материалах измеряется в единицах appm (atom part per million), т. е. в количестве атомов трансмутанта в расчете

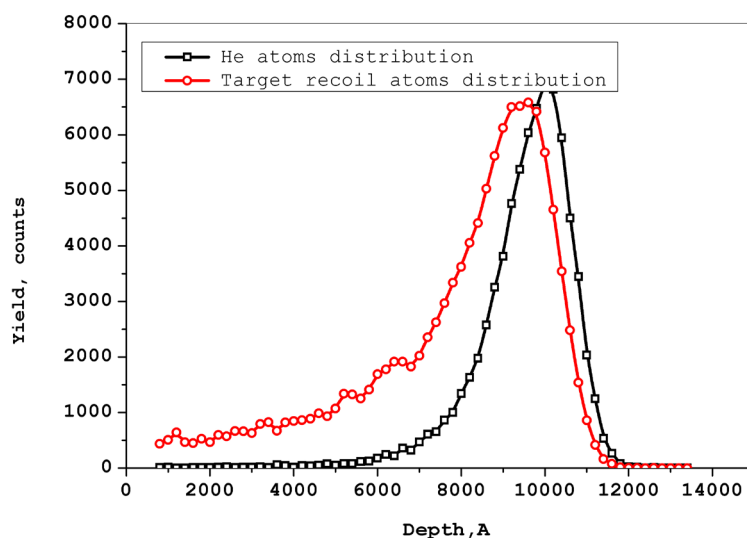


Рис. 1. Профили кривых распределения вакансий и внедренных атомов, полученные в результате моделирования процесса имплантации ионов гелия в железо с помощью программы SRIM

Fig. 1. Profile of vacancy distribution and implanted atoms curves derived by SRIM software modeling of helium ions implantation in iron

на один миллион атомов исходного материала. Поступление He в материал активной зоны реактора (например сплав E-635) ВВЭР-1000 составляет 2400–3000 appm He/10 лет [12]. Таким образом, по критерию количества внедренных в материал атомов, имплантация доз выше $1 \cdot 10^{16}$ атом/см² превосходит реальное поступление примесей в реакторные материалы за весь период эксплуатации. При расчетной дозе имплантации количество генерированных вакансий в области максимума их распределения равно $3 \cdot 10^{24}$ см⁻³. Для количества атомарных смещений это дает в условиях расчетов значение 35,3 смещений на атом (с.н.а. – dpa). Численно с.н.а. рассчитывается по формуле [13]

$$dpa = \frac{0,8}{E_d} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{nuclear}} \frac{D}{\rho},$$

где E_d – пороговая энергия смещения атома из узла кристаллической решетки; $\frac{dE}{dx}$ – средние ядерные потери энергии на длину пути; D – доза облучения; ρ – плотность материала.

Интенсивность генерации радиационных дефектов в радиационном материаловедении принято характеризовать количеством смещений на атом в единицу времени (с.н.а./время). Для большинства современных реакторов (ВВЭР, PWR, BWR) эта величина лежит в диапазоне от 0,05 до 0,1 с.н.а. за 40 лет эксплуатации. Для активных элементов, реакторов на быстрых нейтронах и перспективных моделей реакторов эта величина может достигать 100–200 с.н.а./год. Таким образом, по критерию количества смещенных атомов имплантация доз выше $1 \cdot 10^{16}$ атом/см² превосходит реальное значение для современных реакторов и сравнимо с жесткими условиями эксплуатации.

Суммируя изложенное выше, можно сделать заключение, что имплантация доз, превышающих $1 \cdot 10^{16}$ атом/см², эффективно моделирует процесс эксплуатации конструкционных реакторных материалов. Наиболее адекватное воссоздание температурных условий работы реактора достижимо при «горячей имплантации», однако первым приближением таких условий может служить постимплантационный отжиг.

Ввиду того, что основной интерес для практических конструктивных приложений механики представляют макроструктурные трансформации, дефекты материала визуализировали методами оптической микроскопии.

Предшествующими работами [14] показано, что для хрупких материалов с направленными ковалентными связями при имплантации легких ионов может быть введено понятие пороговой дозы блистеринга, визуализируемое методами оптической микроскопии. Возможность распространения разработанного подхода на случай облученных легкими ионами металлов продемон-

стрирована в [15]. Исследованию подверглись как материалы, близкие к модельным (Zr), так и широко распространенные конструкционные стали и сплавы (12X18H9T, ЭИ-847, Д16Т) и карбид кремния [16]. Для определения пороговой дозы блистеринга имплантация ионов гелия произведена с шагом наращивания дозы 10^{16} атом/см², а отжиг – с шагом 40 °С. Результаты обобщены на диаграмме, представленной на рис. 2.

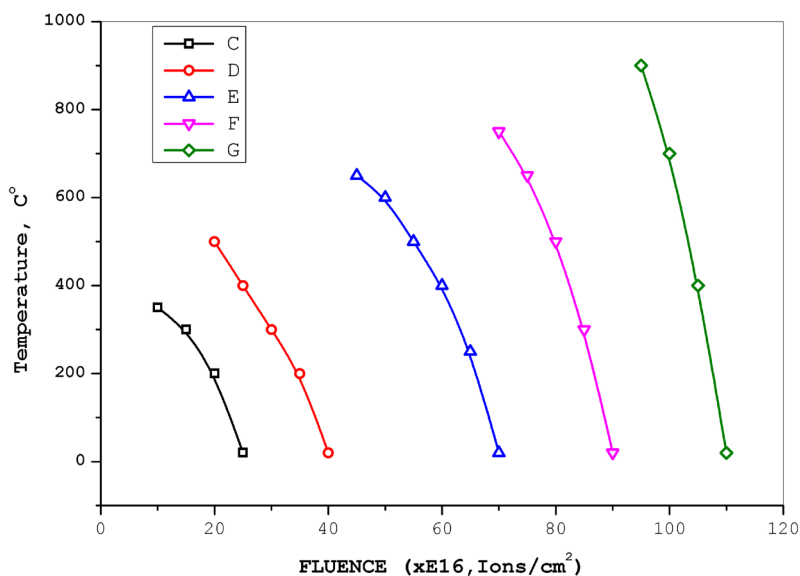


Рис. 2. Границы областей устойчивости объектов исследования к образованию блистеров и флекингу в зависимости от дозы имплантации и температуры отжига при унифицированных параметрах имплантации ионами He⁺ с энергией 500 КэВ: С – сплав Д16Т, D – Zr, E – сталь 12X18H9T, F – сталь ЭИ-847, G – поликристаллический SiC

Fig. 2. Objects of study borders of tolerance areas for blistering and flecking versus implantation fluence and annealing temperature under uniform 500 keV He⁺ ions implantation: C – D16T alloy, D – Zr, E – 12X18H9T steel, F – ЭИ-847 steel, G – polycrystalline SiC

На рис. 3 представлены основные примитивные виды изменений структуры образцов, возникающие при имплантации и отжиге и регистрируемые методом оптической микроскопии.

На рис. 3, *a* отображена типичная граница раздела облученной и необлученной областей сплава Д16Т. Заметно, что в данном материале со сниженной пластичностью преобладает хрупкое разрушение по границам зерен. Линейный размер элементов контраста тождественен размеру зерна.

Типичные структуры, представленные на рис. 3, *b*, *c*, свидетельствуют о приближении формы блистеров к полусферической либо округлой в случаях пластичного материала. Для твердых материалов с микродисперсным резко оgranенным зерном форма блистеров и областей флекинга на стадии зарождения повторяет форму кристаллитов исходного материала.

На рис. 3, *b*, полученном с неоднородно легированного участка, можно одновременно наблюдать начальные стадии зарождения, роста и сегрегации макродефектов в облученной и отожженной стали ЭИ-847 при имплантации дозой, находящейся на границе областей устойчивости материала. Можно отметить, что оптическая микроскопия позволяет уверенно регистрировать наличие блистеров с размером на уровне десятка микрон. При этом заметно, что процесс блистеринга ускорен в пре-деформированных областях образца. Обнаруженный эффект является крайне существенным для технологии реакторостроения, однако выходит за рамки настоящей работы и станет предметом последующих исследований. Основные результаты настоящей работы базируются на исследовании объектов с минимальной остаточной деформацией.

Например, на рис. 3, *c* представлена оптическая микрофотография одного крупного распавшегося блистера в имплантированной гелием нержавеющей стали после отжига при 550 °С в течение 5 мин. Фотография иллюстрирует процесс выделения внедренного гелия на глубокозалегающих вакансионных комплексах, созданных ионным облучением. Очевидно, что в данном случае поверхность материала не является эффективным стоком дефектов.

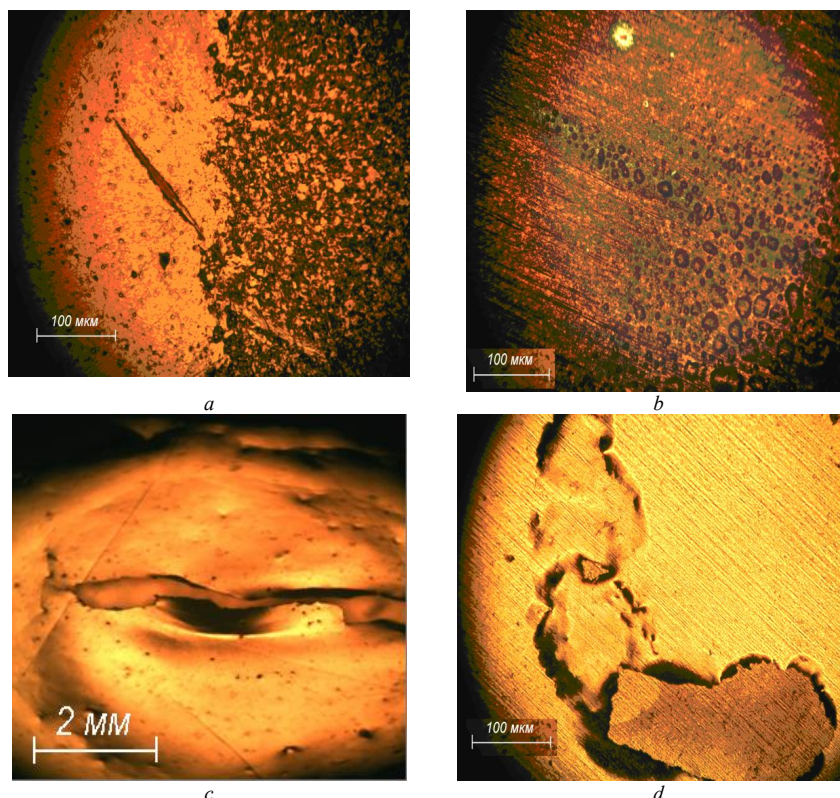


Рис. 3. Характерные виды изменений структуры образцов, возникающие при имплантации и отжиге: *a* – оптическая микрофотография границы раздела необлученного (слева) и облученного ионами He_2^+ дозой $2 \cdot 10^{16}$ ион/см² с энергией 500 кэВ и отожженного при 350 °С образца сплава Д16Т; *b* – оптическая микрофотография облученного ионами He^+ дозой $(3-5)10^{17}$ ион/см² с энергией 500 кэВ и отожженного при 750 °С образца стали ЭИ-847; *c* – оптическая микрофотография крупного распавшегося блистера в имплантированной гелием стали 12Х18Н9Т после отжига 550 °С; *d* – оптическая микрофотография облученного ионами He^+ дозой $1,5 \cdot 10^{18}$ ион/см² с энергией 500 кэВ образца стали 12Х18Н9Т

Fig. 3. Samples distinctive structure evolution types, emerging after ion implantation and annealing: *a* – optical microphotography of the border between not implanted (left) and irradiated (right) by 500 keV He^+ ions with fluence $2 \cdot 10^{16}$ at/cm² and annealed under 350 °C sample of Д16Т alloy; *b* – optical microphotography of ЭИ-847 steel surface irradiated by 500 keV He^+ ions with fluence $(3-5)10^{17}$ at/cm² and annealed under 750 °C; *c* – optical microphotography of large disintegrated blister in 12Х18Н9Т steel after helium implantation and 550 °C annealing; *d* – optical microphotography of 12Х18Н9Т steel sample irradiated by 500 keV He^+ ions with fluence $1,5 \cdot 10^{17}$ at/cm²

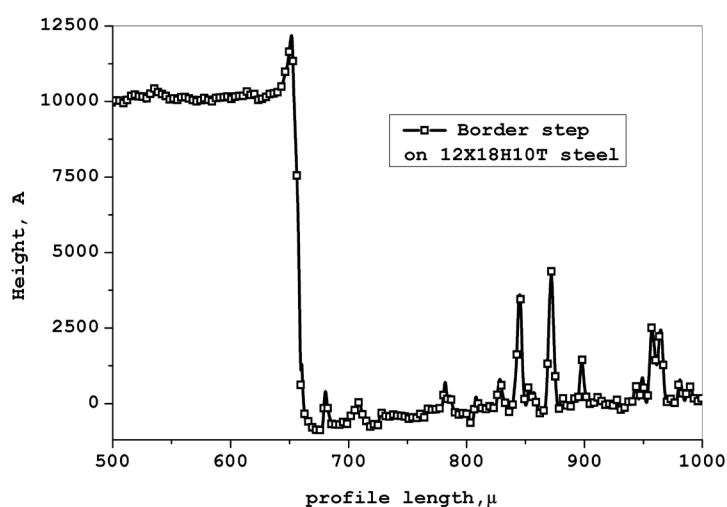


Рис. 4. Профилограмма облученного ионами He^+ дозой $1,5 \cdot 10^{18}$ ион/см² с энергией 500 кэВ образца стали 12Х18Н9Т

Fig. 4. Surface profile of 12Х18Н9Т steel sample irradiated by 500 keV He^+ ions with fluence $1,5 \cdot 10^{18}$ at/cm²

Краткий обзор примитивов, регистрируемых оптическим методом, можно завершить примером возникновения «Smart Cut» – областей при сверхвысоких дозах имплантации, представленных на рис. 3, *d*. Профилометрические измерения толщины срезаемого слоя, представленные на рис. 4, хорошо согласуются с расчетными величинами проективного пробега ионов гелия и глубиной залегания максимума распределения дефектов.

Это подтверждает сделанное ранее предположение об эффективности формируемых захороненных комплексов дефектов как стока внедренной примеси. Поверхностный сток в данном случае малоэффективен.

Суммируя изложенное, можно утверждать, что процессы зарождения и развития блистеров можно уверенно фиксировать оптическим методом.

Заключение. Результаты расчета распределений ионов гелия при облучении образцов стали-3, нержавеющей стали, сплава Д16Т и карбида кремния ионами гелия с энергией 500 КэВ в диапазоне доз от 10^{16} до $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² хорошо согласуются с данными оптической интерферометрии. Метод оптической микроскопии в сочетании с интерференцией позволяет определить температурно-дозовые диапазоны устойчивости материалов к блистерингу и флехингу при облучении ионами гелия и после дополнительного термического отжига при температурах от 300 до 750 °С. На основании исследований можно сделать вывод о возможности и целесообразности экспрессной сравнительной оценки стойкости различных материалов к облучению методом высокоэнергетической имплантации легких ионов, отжига и последующей оптической микроскопии.

Список использованных источников

1. Terrani, K. A. Accident tolerant fuel cladding development: Promise, status, and challenges / K. A. Terrani // J. Nuclear Materials. – 2018. – Vol. 501. – P. 13–30. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.12.043>
2. Zinkle, S. J. Designing radiation resistance in materials for fusion energy / S. J. Zinkle, L. L. Snead // Annu. Rev. Mater. Res. – 2014. – Vol. 44, N 1. – P. 241–267. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113627>
3. Post, R. F. Fusion reactors as future energy sources / R. F. Post, F. L. Ribe // Science. – 1974. – Vol. 186, N 4162. – P. 397–407. <https://doi.org/10.1126/science.186.4162.397>
4. Zinkle, S. J. Materials challenges in nuclear energy / S. J. Zinkle, G. S. Was // Acta Mater. – 2013. – Vol. 61, N 3. – P. 735–758. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.004>
5. Chu, S. Opportunities and challenges for a sustainable energy future / S. Chu, A. Majumdar // Nature. – 2012. – Vol. 488, N 7411. – P. 294–303. <https://doi.org/10.1038/nature11475>
6. Kozlovskiy, A. Investigation of the effect of ionizing radiation on the structural and conductive characteristics of Ni nanostructures / A. Kozlovskiy, D. Shlimas, M. Zdorovets // Vacuum. – 2019. – Vol. 163. – P. 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.02.015>
7. Trinkaus, H. Ion beam induced amorphization of crystalline solids: mechanisms and modeling / H. Trinkaus // Mater. Sci. Forum. – 1997. – Vol. 248–249. – P. 3–12. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.248-249.3>
8. Комплекс для локальной ионной имплантации и элементного микроанализа с выводом ионного пучка в атмосферу / Ф. Ф. Комаров [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2016. – Т. 60, № 5. – С. 71–75.
9. Радиационная стойкость конструкционных материалов атомных реакторов при облучении высокоэнергетичными ионами водорода и гелия / Ф. Ф. Комаров [и др.] // Инж.-физ. журн. – 2013. – Т. 86, № 6. – С. 1393–1396.
10. Chu, W. K. Backscattering spectrometry / W. K. Chu, J. W. Mayer, M. A. Nicolet. – New York; San Francisco; London, 1978. – 344 p.
11. Study of the dissolution performance of ferrum and calcium compounds in residue hydrogenation reaction samples / X. Y. Wang [et al.] // J. Fuel Chemistry and Technology. – 2021. – Vol. 49, N 6. – P. 771–779. [https://doi.org/10.1016/s1872-5813\(21\)60053-1](https://doi.org/10.1016/s1872-5813(21)60053-1)
12. Dimensional Stability of the Structural Parts of VVER-1000 FA Made of E-635 Zirconium Alloy / A. V. Nikulina [et al.] // Atomic Energy. – 2018. – Vol. 123, N 4. – P. 235–243. <https://doi.org/10.1007/s10512-018-0332-6>
13. Lee, E. H. Ion-beam modification of polymeric materials – fundamental principles and applications / E. H. Lee // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 1999. – Vol. 151, N 1–4. – P. 29–41. [https://doi.org/10.1016/s0168-583x\(99\)00129-9](https://doi.org/10.1016/s0168-583x(99)00129-9)
14. Fracture mechanics analysis of the effects of temperature and material mismatch on the Smart-Cut technology / Bin Gu [et al.] // Engineering Fracture Mechanics. – 2008. – Vol. 75, N 17. – P. 4996–5006. <https://doi.org/10.1016/j.engfrac-mech.2008.06.026>
15. Экспрессный метод определения радиационной стойкости конструкционных материалов атомных реакторов с использованием имплантации высокоэнергетичных ионов водорода и гелия / Ф. Ф. Комаров [и др.] // Материалы 10й Междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом», 24–27 авг. 2013 г. – Минск, 2013. – Т. 1. – С. 50–52.
16. Pilko, V. V. Structure and hardness evolution of silicon carbide epitaxial layers irradiated with He⁺ ions / V. V. Pilko, F. F. Komarov, P. Budzynski // Acta Physica Polonica A. – 2019. – Vol. 136, N 2. – P. 351–355. <https://doi.org/10.12693/aphys-pola.136.351>

References

1. Terrani K. A. Accident tolerant fuel cladding development: Promise, status, and challenges. *Journal of Nuclear Materials*, 2018, vol. 501, pp. 13–30. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.12.043>
2. Zinkle S. J., Snead L. L. Designing radiation resistance in materials for fusion energy. *Annual Review of Materials Research*, 2014, vol. 44, no. 1, pp. 241–267. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113627>
3. Post R. F., Ribe F. L. Fusion reactors as future energy sources. *Science*, 1974, vol. 186, no. 4162, pp. 397–407. <https://doi.org/10.1126/science.186.4162.397>
4. Zinkle S. J., Was G. S. Materials challenges in nuclear energy. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, no. 3, pp. 735–758. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.004>
5. Chu S., Majumdar A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 2012, vol. 488, no. 7411, pp. 294–303. <https://doi.org/10.1038/nature11475>
6. Kozlovskiy A., Shlimas D., Zdorovets M. Investigation of the effect of ionizing radiation on the structural and conductive characteristics of Ni nanostructures. *Vacuum*, 2019, vol. 163, pp. 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.02.015>
7. Trinkaus H. Ion beam induced amorphization of crystalline solids: mechanisms and modeling. *Materials Science Forum*, 1997, vol. 248–249, pp. 3–12. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.248-249.3>
8. Komarov F. F., Kamyshan A. S., Pilko V. V., Shekunov A. A., Romanovskaya O. F., Urjev G. A. In-air ion beam extraction set-up for the external micro-pixe analysis and local implantation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2016, vol. 60, no. 5, pp. 71–75 (in Russian).
9. Komarov F. F., Komarov A. F., Pil'ko V. V., Pil'ko V. V. Radiation resistance of structural materials of nuclear reactors on irradiation with high-energy hydrogen and helium ions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 6, pp. 1481–1484. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0976-y>
10. Chu W. K., Mayer J. W., Nicolet M. A. *Backscattering spectrometry*. New York, San Francisco, London, 1978. 344 p.
11. Wang X. Y., Zhang T., Zhang L., Zhao Y., Bian Y., Yang C. Study of the dissolution performance of ferrum and calcium compounds in residue hydrogenation reaction samples. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2021, vol. 49, no. 6, pp. 771–779. [https://doi.org/10.1016/s1872-5813\(21\)60053-1](https://doi.org/10.1016/s1872-5813(21)60053-1)
12. Nikulina A. V., Perehud M. M., Vorob'ev E. E., Khokhlova T. N. Dimensional Stability of the Structural Parts of VVER-1000 FA Made of E-635 Zirconium Alloy. *Atomic Energy*, 2018, vol. 123, no. 4, pp. 235–243. <https://doi.org/10.1007/s10512-018-0332-6>
13. Lee E. H. Ion-beam modification of polymeric materials – fundamental principles and applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1999, vol. 151, no. 1–4, pp. 29–41. [https://doi.org/10.1016/s0168-583x\(99\)00129-9](https://doi.org/10.1016/s0168-583x(99)00129-9)
14. Bin Gu, Hong-Yuan Liu, Yiu-Wing Mai, Xi-Qiao Feng, Shou-Wen Yu. Fracture mechanics analysis of the effects of temperature and material mismatch on the Smart-Cut technology. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, vol. 75, no. 17, pp. 4996–5006. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.06.026>
15. Pil'ko V. V., Pil'ko V. V., Komarov F. F., Komarov A. F. Express method to determine radiation resistance of construction materials of atomic reactors by means of high energy hydrogen and helium ions implantation. *Materialy 10i Mezhdunarodnoi konferentsii "Vzaimodeistvie izlucheniya s tverdyim telom", 24–27 avgusta 2013 g. T. 1* [Proceedings of the 10th International Conference "Interaction of Radiation with Solids," August 24–27, 2013. Vol. 1]. Minsk, 2013, pp. 50–52 (in Russian).
16. Pilko V. V., Komarov F. F., Budzynski P. Structure and hardness evolution of silicon carbide epitaxial layers irradiated with He⁺ ions. *Acta Physica Polonica A*, 2019, vol. 136, no. 2, pp. 351–355. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.136.351>

Информация об авторах

Пилько Владимир Владимирович – ст. науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pilkowladimir@gmail.com.

Комаров Фадей Фадеевич – академик, д-р физ.-мат. наук, профессор. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: komarovf@bsu.by.

Пилько Владимир Владимирович – канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pilkow@mail.ru.

Information about the authors

Pilko Vladimir V. – Senior Researcher. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pilkowladimir@gmail.com.

Komarov Fadei F. – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: komarovf@bsu.by.

Pilko Vladimir V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pilkow@mail.ru.