

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТОВ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ EUROFER97 И ODS EUROFER, ВОЗНИКАЮЩИХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**Е.В. Гладких, К.С. Кравчук, А.С. Усеинов, А.А. Никитин, С.В. Рогожкин**

Екатерина Владимировна Гладких*

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Россия, 108840

Московский физико-технический институт, Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., Россия, 141701

Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, ул. Большая Черемушкинская, 25, Москва, Россия, 117218

Константин Сергеевич Кравчук, Алексей Серверович Усеинов

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Россия, 108840

Александр Александрович Никитин, Сергей Васильевич Рогожкин

Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, ул. Большая Черемушкинская, 25, Москва, Россия, 117218

E-mail: ekaterina.gladkikh@phystech.edu *

В данной работе методом динамического инструментального инденитирования анализировались механические свойства ферритно-мартенситных сталей марок: Eurofer97 и ODS Eurofer (дисперсно-упрочненной оксидами). Исследовались образцы как в исходном состоянии, так и после облучения ионами Fe^{2+} при температуре 300 °С до флюенса $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Данные, полученные на нанотвердомере НаноСкан-4D, показали наличие эффекта увеличения твердости приповерхностных слоев на образцах, прошедших процедуру облучения, для обоих типов стали. Экспериментально показано, что для образцов конструкционных сталей твердость слоев, подвергшихся облучению тяжелыми ионами, определяется при углублении индентора до 500 нм, что существенно ниже толщины слоя, в который проникают ионы, составляющего около 2 мкм для данного режима облучения образцов. Такое ограничение по глубине возникает вследствие влияния на твердость пластической зоны под индентором, затрагивающей внутренние слои образца. После проведения испытаний по методу инструментального инденитирования металлических образцов возникают пластические валы, искажающие данные о механических характеристиках. С целью коррекции расчетных значений твердости на конфокальном микроскопе Sensofar S Neox сканировалась поверхность образцов. Данные о высоте пластических навалов, возникающих при внедрении алмазной пирамиды в материал, показали, что исходные значения твердости были завышены на 20%. Приняв во внимание специфику процедуры инденитирования (учтя навалы), мы показали, что упрочнение облученного образца Eurofer97 составило $(0,58 \pm 0,06)$ ГПа и оказалось ниже разницы в твердости облученного и внутреннего слоев образца ODS Eurofer, составившей $(0,79 \pm 0,08)$ ГПа.

Ключевые слова: ферритно-мартенситные стали, дисперсно-упрочненные оксидами сплавы, ионное облучение, инструментальное инденитирование, твердость

Для цитирования:

Гладких Е.В., Кравчук К.С., Усеинов А.С., Никитин А.А., Рогожкин С.В. Сравнение эффектов упрочнения сталей Eurofer97 и ODS Eurofer, возникающих под действием ионного облучения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 57–62

For citation:

Gladkikh E.V., Kravchuk K.S., Useinov A.S., Nikitin A.A., Rogozhkin S.V. Comparison of hardening effects of Eurofer97 and ODS Eurofer steels under ion irradiation. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 12. P. 57–62

COMPARISON OF HARDENING EFFECTS OF EUROFER97 AND ODS EUROFER STEELS UNDER ION IRRADIATION

E.V. Gladkikh, K.S. Kravchuk, A.S. Useinov, A.A. Nikitin, S.V. Rogozhkin

Ekaterina V. Gladkikh*

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Centralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy Per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia
Institute for Theoretical and Experimental Physics, A.I. Alikhanova National Research Center "Kurchatov Institute", Bolshaya Cheremushkinskaya st., 25, Moscow, 117218, Russia

Konstantin S. Kravchuk, Aleksey S. Useinov

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Centralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Aleksandr A. Nikitin, Sergey V. Rogozhkin

Institute for Theoretical and Experimental Physics, A.I. Alikhanova National Research Center "Kurchatov Institute", Bolshaya Cheremushkinskaya st., 25, Moscow, 117218, Russia

E-mail: ekaterina.gladkikh@phystech.edu *

In this work, dynamic instrumental indentation was used for the analysis of mechanical properties of ferritic-martensitic steels Eurofer97 and ODS Eurofer (oxide dispersion-strengthened alloy). We investigated the samples both in the initial state and after irradiation with Fe^{2+} ions at a temperature of 300 °C to a fluence of $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. A nanoindentation tester NanoScan-4D allowed to show the hardness increasing effect of the surface layers on the irradiated with ions samples for both types of steel. The experimentally obtained hardness values showed that an indentation depth corresponded to the irradiated layers is up to 500 nm. It is significantly lower than the ions penetration depth, which was about 2 μm for the samples under review. This depth limitation arises due to the influence on the hardness of the plastic zone reaches to inner layers of the sample. The nanoindentation on the metal samples leads to a development of the pile-up of the material, which distort the data on the mechanical characteristics. In order to correct the calculated values of hardness, the surfaces of the samples were scanned on a Sensofar S Neox confocal microscope. The height of pile-ups, arising from the penetration of the diamond pyramid into the material, showed that the initial values of hardness were overestimated by 20%. Taking into account appeared during the indentation pile-ups, calculated hardening of the irradiated Eurofer97 sample was $(0.58 \pm 0.06) \text{ GPa}$. It was turned out to be lower than the difference in hardness of the irradiated and inner layer of the ODS Eurofer sample, which was $(0.79 \pm 0.08) \text{ GPa}$.

Key words: ferritic-martensitic steels, oxide dispersion strengthened alloys, ion irradiation, instrumental indentation, hardness

ВВЕДЕНИЕ

Исследование изменений, возникающих в термически нагруженных материалах внутренних компонентов корпусов ядерных и термоядерных реакторов, является одной из актуальных задач в области материаловедения конструкционных сталей [1, 2]. Преждевременное разрушение деталей, узлов и механизмов, возникающее вследствие охрупчивания в результате взаимодействия с излучением, в том числе радиоактивным, значительно сокращает срок службы установок в целом. Поведение материалов, находящихся в жестких условиях эксплуатации, возможно исследовать

при помощи имитационных экспериментов в специальных реакторах [3-5]. При этом не обязательно достигать разрушения материала непосредственно в реакторе при высоких степенях облучения и длительном воздействии. Во многих случаях может быть достаточно применения сравнительно слабых по энергии потоков излучения, которые приводят лишь к частичному изменению свойств облучаемого материала [6]. Такой подход позволяет предсказать динамику происходящих изменений в структуре материала и, соответственно, возможность использования исследуемого материала в условиях интенсивного облучения [7].

Испытания в реакторе с нейтронами являются крайне дорогостоящими, длительными и значительно усложняют процесс работы с образцами, главным образом, вследствие возникновения наведенной радиоактивности [8]. В связи с этим широко распространены испытания с участием ионов. Однако, и этот способ не лишен недостатков – имеет место неглубокое проникновение бомбардирующих ионов в материал [9].

Применимые к объемным материалам классические способы определения прочности – испытания на разрывных машинах [10] – оказываются неэффективны для исследования с их помощью слоев микронной толщины на поверхности образца. Для измерения механических свойств образцов, облученных ионами, хорошо работает метод инструментального индентирования [11-13]. Наноиндентирование имеет несколько модификаций, одной из которых является динамическое инструментальное индентирование, дающее возможность строить зависимость твердости от глубины внедрения индентора в ходе одного измерения и с малым шагом [14].

Интерпретация экспериментальных зависимостей твердости от глубины внедрения индентора является трудоемкой и наукоемкой задачей, поскольку в измеряемые значения твердости вносятся вклад не только механические свойства самого упрочненного слоя, но и свойства пластической зоны под индентором и неоднородности, находящиеся в зоне индентирования [15].

В настоящее время проводится множество экспериментов по изучению дефектов (наблюдаемых при помощи электронного микроскопа) в ферритно-мартенситных сталях, возникающих в результате облучения тяжелыми ионами [16-19]. Усовершенствуются модели, описывающие механизм упрочнения облученных сталей, и исследуются зависимости этих механизмов от энергии и глубины внедрения бомбардирующих металл ионов [20-22].

В данной работе рассматривается поведение механических свойств перспективных конструкционных материалов для ядерной энергетики – ферритно-мартенситной стали Eurofer97 [23, 24], а также дисперсно-упрочненного оксидами сплава Eurofer ODS [25] – в исходном состоянии и после облучения ионами железа до флюенса $1 \cdot 10^{16}$ см⁻². Изменение твердости после взаимодействия с ионами гелия в сталях такого типа описано в работах [26-28].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Ключевым методом, используемым в данной работе, является разновидность наноиндентирования – динамическое инструментальное индентирование. Этот метод заключается во вдавливании алмазного наконечника, имеющего форму треугольной пирамиды Берковича, в исследуемый материал. В процессе вдавливания помимо поступательного движения наконечник совершает гармонические колебания. Такой способ индентирования позволяет получать почти непрерывную зависимость твердости и модуля упругости от глубины внедрения индентора.

Твердость в методе инструментального индентирования определяется как отношение максимальной прикладываемой нагрузки P_{\max} к площади контакта A индентора с образцом:

$$H = \frac{P_{\max}}{A}. \quad (1)$$

Площадь контакта зависит от формы индентора, определяемой при калибровке, и имеет вид функции от глубины $A = f(h_c)$. Глубина погружения наконечника в образец рассчитывается по следующей формуле:

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon \frac{P_{\max}}{S}, \quad (2)$$

где S – жесткость контакта, определяемая по углу наклона касательной к кривой разгрузки в точке P_{\max} , ε – поправочный коэффициент, зависящий от геометрии наконечника (для индентора Берковича $\varepsilon = 3/4$).

Для описания свойств слоистого образца (в данной работе образцы имеют внутренний слой – «подложку», а также наружный слой, в который проникли ионы при облучении, – «покрытие») необходимо определять, на какой глубине твердость «покрытия» снижается из-за влияния «подложки». Для этого используют предложенную Nix и Gao зависимость твердости от глубины вида [29]:

$$H(h) = H_0 \sqrt{1 + \frac{h^*}{h}}. \quad (3)$$

Данная модель основана на геометрически необходимой дислокации. Эта зависимость позволяет по графику определить точку перегиба – значение глубины, при которой свойства «подложки» начинают влиять на измеряемое значение твердости. Поскольку индентор на самом деле взаимодействует не только с соприкасающимся с ним материалом, но и пластической зоной, то взаимодействие с «подложкой» начинается раньше, чем индентор подходит к границе зоны, подвергшейся облучению.

Исследование твердости образцов проводилось на нанотвердомере “НаноСкан-4D” (ФГБНУ ТИСНУМ, Россия) методом динамического инструментального индентирования. Были выбраны следующие параметры испытаний: глубина индентирования – до 2000 нм, амплитуда колебаний индентора – 10 нм, частота – 10 Гц. На каждом образце была проведена серия из 30-ти измерений.

Использование инструментального индентирования в качестве метода анализа механических свойств конструкционных сталей, подвергшихся облучению тяжелыми ионами, дает возможность проводить испытания за малый промежуток времени, поскольку такие исследования не предполагают трудоемкой пробоподготовки. Кроме того, для этого метода не требуется наличия большого объема материала, как, например, для макроиспытаний на разрывной машине. В случае облученных ионами образцов это принципиальный момент, поскольку толщина слоя, в который проникают ионы, сравнительно невелика – не более одного-двух десятков микрометров.

Одной из особенностей проведения испытаний по вдавливанию алмазного наконечника в металлы является необходимость учета влияния навалов. Из-за возникновения навалов твердость, измеренная нанотвердомером оказывается завышенной. В [30] предлагается использовать формулу:

$$H_{0-p}/H = (1 + h_{p-up}/h_r)^2, \quad (4)$$

где H_{0-p} – твердость, измеренная в ходе инструментального индентирования (метод Оливера-Фарра), h_{p-up} – высота навала (pile-up), h_r – остаточная глубина отпечатка, H – истинная твердость материала. Геометрические размеры отпечатка могут быть вычислены по изображениям, полученным при помощи атомно-силового либо конфокального оптического микроскопа. В данной работе использовался оптический 3D-микроскоп Sensofar S Neox.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После испытаний индентированием на образцах было проведено исследование изменения морфологии поверхности при помощи оптического 3D-микроскопа Sensofar S Neox. Поперечные сечения, проведенные поперек каждой из трех сторон отпечатков, оставленных индентором, дали значения остаточной глубины около 1800 нм, при этом средняя высота навалов составляла около 350 нм. Таким образом, для всех исследованных образцов было получено значение корректирующего коэффициента в формуле (4), равного 1,2,

что означает завышение измеренной твердости в 1,2 раза. Все графики ниже, в которых фигурирует твердость и ее производные, были построены с учетом данного корректирующего коэффициента.

На рис. 1 показаны полученные зависимости твердости для всех исследованных образцов. Начальный участок кривых, соответствующих твердости исходных образцов, практически не отличается от твердости массивного образца. Кривые, соответствующие твердости образцов, имеют перегиб при значении глубины около 500 нм. Для уточнения значения глубины, при которой свойства облученного слоя образца переходят в свойства «подложки», была использована формула (3). Также с ее помощью были построены зависимости, показанные на рис. 1.

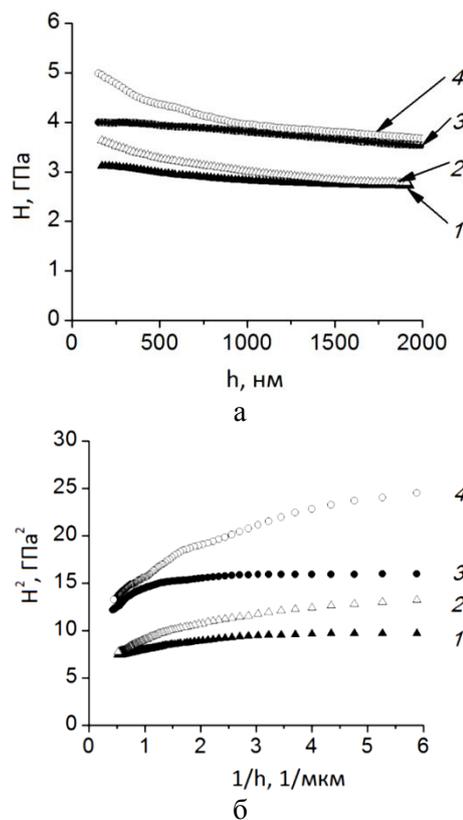


Рис. 1. а) Зависимость твердости исследованных образцов от глубины внедрения индентора. б) Диаграмма Nix-Gao, построенная для образцов. Цифрами обозначены: 1 – Eurofer97 исходный, 2 – Eurofer97 облученный, 3 – Eurofer ODS исходный, 4 – Eurofer ODS облученный

Fig. 1. а) Dependence of the hardness of the studied samples on the penetration depth of the indenter. б) Nix-Gao diagram plotted for samples. The numbers indicate: 1 – Eurofer97 initial, 2 – Eurofer97 irradiated, 3 – Eurofer ODS initial, 4 – Eurofer ODS irradiated

Линейные аппроксимации участков кривых в координатах $H^2(1/h)$, соответствующие от 150 до 490 нм в координатах $H(h)$, дали значения

твердости упрочненного слоя (как корня из свободного члена в уравнении прямой): для образца Eurofer97 – 4,16 ГПа, для образца ODS Eurofer – 3,17 ГПа. Значения твердости из коэффициентов прямых, аппроксимирующих участки глубин от 1 до 2 мкм для тех же образцов составило 3,37 и 2,59 ГПа соответственно. Расчет упрочнения производился вычитанием значений, соответствующих второму интервалу аппроксимации, из значений, соответствующих первому.

ВЫВОДЫ

Экспериментально показано, что для ферритно-мартенситной стали Eurofer97, облученной ионами Fe^{2+} при температуре 300 °С до флюенса $1 \cdot 10^{16}$ см⁻², наблюдается увеличение твердости приповерхностного слоя образца, составляющее (0,58±0,06) ГПа. Облученный в сходных условиях образец дисперсно-упрочненной оксидами ODS Eurofer показал увеличение твердости на (0,79±0,08) ГПа соответственно.

Полученные на конфокальном микроскопе данные о высоте пластических навалов, возникающих при внедрении алмазной пирамиды в материал, позволили скорректировать значения твердости: они оказались меньше на 20% относительно полученных по методу инструментального индентирования.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. You J.H., Visca E., Barrett T., Boeswirth B., Crescenzi F., Dompail F., Fursdon M., Gallay F., Ghidersae B.-E., Greunera H., Li M., Mueller A.V., Reiser J., Richou M., Roccella S., Vorpahl C. European divertor target concepts for DEMO: Design rationales and high heat flux performance. *Nucl. Mater. Energy*. 2018. V. 16. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.nme.2018.05.012.
2. Zinkle S.J., Boutard J.L., Hoelzer D.T., Kimura A., Lindau R., Odette G.R., Rieth M., Tan L., Tanigawa H. Development of next generation tempered and ODS reduced activation ferritic/martensitic steels for fusion energy applications. *Nucl. Fusion*. 2017. V. 57. N 9. P. 1-17. DOI: 10.1088/1741-4326/57/9/092005.
3. Shin C.S., Lee B.-S., Choi S., Yoon J.-H., Kim H.G., Ok J.-W., Park J.Y., Kim S.J., Bahng J., Hong J., Lee S.W., Won M.-S. Nitrogen ion implantation into various materials using 28 GHz electron cyclotron resonance ion source. *Rev. Sci. Instrum.* 2016. V. 87. N 2. DOI: 10.1063/1.4932126.
4. Xu C. Zhang L., Qian W., Mei J., Liu X. The Studies of Irradiation Hardening of Stainless Steel Reactor Internals under Proton and Xenon Irradiation. *Nucl. Eng. Technol.* 2016. V. 48. N 3. P. 758-764. DOI: 10.1016/j.net.2016.01.007.
5. Getto E., Sun, K. Monterrosa A.M., Jiao Z., Hackett M.J., Was G.S. Void swelling and microstructure evolution at very high damage level in self-ion irradiated ferritic-martensitic steels. *J. Nucl. Mater.* 2016. V. 480. P. 159-176. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2016.08.015.
6. Krashennnikov A. V., Nordlund K. Ion and electron irradiation-induced effects in nanostructured materials. *J. Appl. Phys.* 2010. V. 107. N 7. DOI: 10.1063/1.3318261.
7. Zhang X. Hattar K., Chen Y., Shao L., Li J., Sun C., Yu K., Li N., Taheri M.L., Wang H., Wang J., Nastasi M. Radiation damage in nanostructured materials. *Prog. Mater. Sci.* 2018. V. 96. P. 217-321. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2018.03.002.
8. Zinkle S.J.J., Was G.S.S. Materials challenges in nuclear energy. *ACTA Mater.* 2013. V. 61. N 3. P. 735-758. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.11.004.
9. Zinkle S.J., Snead L.L. Opportunities and limitations for ion beams in radiation effects studies: Bridging critical gaps between charged particle and neutron irradiations. *Scr. Mater.* 2018. V. 143. P. 154-160. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.06.041.
10. Pandey C., Mahapatra M.M., Kumar P., Saini N. Effect of strain rate and notch geometry on tensile properties and fracture mechanism of creep strength enhanced ferritic P91 steel. *J. Nucl. Mater.* 2018. V. 498. P. 176-186. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.10.037.
11. Мильман Ю.В., Чугунова С.И., Гончарова И.В., Голубенко А.А. Пластичность материалов, определяемая методом индентирования. *Усп. физ. мет.* 2018. Т. 19. № 3. С. 271-308. DOI: 10.15407/ufm.19.03.271.
12. Milman V.Y., Chugunova I.S., Goncharova V.I., Golubenko A.A. Plasticity of materials determined by the indentation method. *Usp. Fiz. Met.* 2018. V. 19. N 3. P. 271-308 (in Russian). DOI: 10.15407/ufm.19.03.271.
13. Xiao X., Yu L. Nano-indentation of ion-irradiated nuclear structural materials: A review. *Nucl. Mater. Energy*. 2020. V. 22. September 2019. P. 100721. DOI: 10.1016/j.nme.2019.100721.
14. Kasada R., Takayama Y., Yabuuchi K., Kimura A. A new approach to evaluate irradiation hardening of ion-irradiated ferritic alloys by nano-indentation techniques. *Fusion Eng. Des.* 2011. V. 86. N 9-11. P. 2658-2661. DOI: 10.1016/J.FUSENGDES.2011.03.073.
15. Мещеряков В.В., Масленников В.В., Мелекесов Э.В. Динамический метод наноиндентирования. *Изв. мех.* 2017. № 8. С. 15-19. DOI: 10.1007/s11018-017-1269-1.
16. Meshcheryakov, V.V., Maslennikov, V.V., Melekesov, E.V. A Dynamic Method of Nanoindentation. *Meas Tech.* 2017. 60. P. 771-776. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1269-1>
17. Xiao X., Chen Q., Yang H., Duan H., Qu J. A Mechanistic Model for Depth-Dependent Hardness of Ion Irradiated Metals. *J. Nucl. Mater.* 2017. V. 485. P. 80-89. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2016.12.039.
18. Rogozhkin S., Nikitin A., Orlov N. Evolution of microstructure in advanced ferritic-martensitic steels under irradiation: the origin of low temperature radiation embrittlement. *MRS Adv.* 2017. V. 2. N 21-22. P. 1143-1155. DOI: 10.1557/adv.2016.657.

17. **Hernandez-Mayoral M., Heintze C., Onorbe E.** Transmission electron microscopy investigation of the microstructure of Fe-Cr alloys induced by neutron and ion irradiation at 300 degrees C. *J. Nucl. Mater.* 2016. V. 474. P. 88-98. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2016.03.002.
18. **Hirata A., Fujita T., Wen Y.R., Schneibel J.H., Liu C.T., Chen M.W.** Atomic structure of nanoclusters in oxide-dispersion-strengthened steels. *Nat. Mater.* 2011. V. 10. N 12. P. 922-926. DOI: 10.1038/NMAT3150.
19. **Edmondson P.D., London A., Xu A., Armstrong D.E.J., Roberts S.G.** Small-scale characterisation of irradiated nuclear materials: Part I - Microstructure. *J. Nucl. Mater.* 2015. V. 462. P. 369-373. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.11.067.
20. **Saleh M., Zaidi Z., Ionescu M., Hurt C., Short K., Daniels J., Munroe P., Edwards L., Bhattacharyya D.** Relationship between damage and hardness profiles in ion irradiated SS316 using nanoindentation - Experiments and modelling. *Int. J. Plast.* 2016. V. 86. P. 151-169. DOI: 10.1016/j.ijplas.2016.08.006.
21. **Dolph C.K., da Silva D.J., Swenson M.J., Wharry J.P.** Plastic zone size for nanoindentation of irradiated Fe-9%Cr ODS. *J. Nucl. Mater.* 2016. V. 481. P. 33-45. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2016.08.033.
22. **Stoller R.E., Toloczko M.B., Was G.S., Certain A.G., Dwaraknath S., Garner F.A.** On the use of SRIM for computing radiation damage exposure. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect.* 2013. V. 310. P. 75-80. DOI: 10.1016/J.NIMB.2013.05.008.
23. **Гладких Е.В., Кравчук К.С., Усеннов А.С., Никитин А.А., Рогожкин С.В.** Исследование влияния облучения ионами на механические свойства стали Eurofer 97. *Пов. Рентг., синхр. и нейтр. иссл.* 2019. № 1. С. 73-78. DOI: 10.1134/S0207352819010074.
- Гладких Е.В., Кравчук К.С., Useinov A.S., Nikitin A.A., Rogozhkin S.V.** A Study of the Effect of Ion Irradiation on the Mechanical Properties of Eurofer 97 Steel. *J. Surf. Investig.* 2019. V. 13. N 1. P. 48-52. DOI: 10.1134/S1027451019010075.
24. **Tavassoli F.** Eurofer steel, development to full code qualification. *Procedia Eng.* 2013. V. 55. P. 300-308. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.03.258.
25. **Luzginova N.V., Nolles H., Ten P.P., Bakker T., Mutnuru R., Jong M., Blagoeva D.** Irradiation response of ODS Eurofer97 steel. *J. Nucl. Mater.* 2012. V. 428. P. 192-196. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.08.030.
26. **Heintze C., Bergner F., Hernandez-Mayoral M., Koegler R., Mueller G., Ulbricht A.** Irradiation hardening of Fe-9Cr-based alloys and ODS Eurofer: Effect of helium implantation and iron-ion irradiation at 300 degrees C including sequence effects. *J. Nucl. Mater.* 2016. V. 470. P. 258-267. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2015.12.041.
27. **Roldán M., Fernández P., Rams J., Gómez-Herrero A., Malo M.** Cavity formation and hardness change in He implanted EUROFER97 and EU-ODS EUROFER. *Nucl. Mater. Energy.* 2020. V. 22. N November 2019. P. 100717. DOI: 10.1016/j.nme.2019.100717.
28. **Bergner F., Hlawacek G., Heintze C.** Helium-ion microscopy, helium-ion irradiation and nanoindentation of Eurofer 97 and ODS Eurofer. *J. Nucl. Mater.* 2018. V. 505. P. 267-275. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.07.054.
29. **Nix W.D., Gao H.** Indentation size effects in crystalline materials: a law for strain gradient plasticity. *J. Mech. Phys. Solids.* 1998. V. 46, N 3. P. 411-425. DOI: 10.1007/s11947-009-0181-3.
30. **Qian L. Li M., Zhou Z., Yang H., Shi X.** Comparison of nano-indentation hardness to microhardness. *Surf. Coatings Technol.* 2005. V. 195. N 2-3. P. 264-271. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.07.108.

Поступила в редакцию 07.10.2020

Принята к опубликованию 02.11.2020

Received 07.10.2020

Accepted 02.11.2020