Получено: 05.10.2022 г. | Принято: 07.10.2022 г. | DOI: https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.336.343
Научная статья

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЦЕССА ИНДЕНТИРОВАНИЯ СТАЛИ EUROFER97 ПОСЛЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Е.В.Гладких[1], мл. науч. сотр., *ORCID: 0000-0001-8273-3934*
К.С.Кравчук[1], к.ф.-м.н., науч. сотр., *ORCID: 0000-0002-9956-9939*
В.Н.Решетов[1], вед. науч. сотр., *ORCID: 0000-0002-8426-5991*
А.А.Русаков[1], мл. науч. сотр., *ORCID: 0000-0001-5702-1353*
А.С.Усеинов[1], к.ф.-м.н., зам. директора, *ORCID: 0000-0002-9937-0954* / ***useinov@mail.ru***

Аннотация. Сочетание ионного облучения и наноиндентирования является обширной областью исследований, которая включает в себя не только эксперименты, но и моделирование, способное выявить особенности деформационного поведения материалов на микро- и наномасштабе. Проведенное в работе моделирование позволило оценить соответствие между параметрами прочности, измеряемыми в ходе испытаний на растяжение макрообразцов, облученных нейтронами, и результатами динамического инструментального индентирования образцов, участвовавших в эксперименте по облучению ионами. Рассчитанный в ходе моделирования прирост твердости оказался сопоставим с полученным экспериментально, что говорит о работоспособности методики. Пластическое поведение, свойственное образцам в эксперименте, проявляющееся в снижении высоты валов при увеличении дозы облучения, подтвердилось и в моделировании.

Ключевые слова: метод конечных элементов, индентирование, сталь Eurofer97, твердость, облучение ионами, упруго-пластическая деформация

Для цитирования: Е.В. Гладких, К.С. Кравчук, В.Н. Решетов, А.А. Русаков, А.С. Усеинов. Моделирование методом конечных элементов процесса индентирования стали eurofer97 после ионного облучения. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 6. С. 336–343. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.336.343

Received: 05.09.2022 | Accepted: 07.10.2022 | DOI: https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.336.343
Original paper

SIMULATION OF THE INDENTATION OF EUROFER97 STEEL AFTER ION RADIATION BY THE FINITE ELEMENT METHOD

E.V.Gladkikh[1], Junior Researcher, *ORCID: 0000-0001-8273-3934*
K.S.Kravchuk[1], Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Researcher, *ORCID: 0000-0002-9956-9939*
V.N.Reshetov[1], Leading Researcher, *ORCID: 0000-0002-8426-5991*
A.A.Rusakov[1], Junior Researcher, *ORCID: 0000-0001-5702-1353*
A.S.Useinov[1], Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Deputy Director, *ORCID: 0000-0002-9937-0954* / ***useinov@mail.ru***

Abstract. The combination of ion irradiation and nanoindentation presents a vast field of research which includes not only experiments but also modeling that can reveal the features of the deformation behavior of

[1] Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов", Москва, Россия / Federal State Budgetary Scientific Institution Technological Institute for Superhard and New Carbon Materials, Moscow, Russia

materials at the micro- and nanoscale. The modeling carried out in the work made it possible to evaluate the correspondence between the strength parameters measured in the course of tensile tests of macrosamples irradiated with neutrons and the results of dynamic instrumental indentation of the samples that were used in the experiment on ion irradiation. The increase in hardness calculated during the simulation turned out to be comparable with that obtained experimentally, which indicates efficiency of the technique. The plastic behavior inherent in the samples subject to the experiment which manifests itself in a decrease in the height of the rolls with an increase in the irradiation dose was also confirmed in the simulation.

Keywords: finite element method, indentation, Eurofer97 steel, hardness, ion irradiation, elastic-plastic deformation

For citation: E.V. Gladkikh, K.S. Kravchuk, V.N. Reshetov, A.A. Rusakov, A.S. Useinov. Simulation of the indentation of Eurofer97 steel after ion radiation by the finite element method. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 6. PP. 336–343. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.336.343

ВВЕДЕНИЕ

Аттестация материалов, планируемых для применения в качестве конструкционных в ядерных и термоядерных реакторах нового поколения, включает в себя изучение их механических характеристик после нахождения в условиях, приближенных к эксплуатационным [1]. Эксперименты по нейтронному облучению занимают продолжительное время, поэтому гораздо чаще используется облучение пучками ионов. Материалы, подвергшиеся облучению ионами, имеют упрочненный слой, толщина которого составляет единицы микрометров, из-за неглубокого проникновения тяжелых частиц [2].

Для образцов, имеющих представляющий интерес для исследования приповерхностного слоя толщиной в 1–2 мкм, для получения зависимости твердости от глубины, требуется проводить либо серии испытаний с малыми нагрузками [3], либо применять метод динамического инструментального индентирования [4]. Первый метод задействует большую площадь образца, второй – дает возможность получить зависимость твердости от глубины внедрения индентора в единичной области.

Одним из методов анализа напряженного состояния, возникающего при локальном давлении, является моделирование методом конечных элементов. Геометрические недеформируемые объекты, сходные по форме с реальными инденторами, при их внедрении в тестируемый материал могут спровоцировать упругопластические деформации образца, свойственные наблюдаемым экспериментально. Важным вопросом остается соответствие свойств исследуемого на опыте образца характеристикам модельных объектов. В случае, если интерес представляет получение значений твердости, то в качестве базовых характеристик моделируемых

INTRODUCTION

The validation of materials planned for use as structural members in the new generation of nuclear and fusion reactors involves a study of their mechanical properties after being exposed to the conditions close to the operational conditions [1]. Neutron irradiation experiments take a long time and, therefore, the ion beam irradiation is applied much more frequently. The materials subjected to ion irradiation have a hardened layer of few micrometres thick due to shallow penetration of heavy particles [2].

For specimens with 1–2 μm thick near-surface layer, that are of interest for our study, in order to obtain the hardness-depth relation either a series of low-load tests [3] or the dynamic tool indentation method [4] is required. The first method involves a large area of a sample while the second method allows of obtaining dependence of hardness versus the indentation depth in a single area.

One of the methods for analysing the stress state arising from local pressure is a finite element modelling. Geometric non-deformable objects similar in shape to real indenters, can induce elastoplastic deformations of the experimentally observed sample when embedded into the material under test. An important question is whether the properties of the test specimen correspond to characteristics of the model objects. If the aim is to obtain hardness values, tensile data of experimental specimens can be taken as the basic characteristics of the simulated materials [5]. In this way the dependence between strength properties and tool hardness can be found.

In this paper a finite element modelling of the Berkovich type tip indentation test with the hardness values calculation was carried out samples of Eurofer97 steel irradiated to a dose of 10 displacements per atom. In describing the constructed

Таблица 1. Параметры образцов, задававшие свойства Eurofer97 в программном пакете Abaqus
Table 1. Sample parameters that set the properties of Eurofer97 in the Abaqus software package

Режим облучения Radiation mode	Предел текучести, МПа Yield strength, MPa	Предел прочности, МПа Tensile strength, MPa	Относительное удлинение, % Relative elongation, %
Исходный Initial	570	780	14
2 сна (dpa), 300 °C	740	800	6
7.7 сна (dpa), 175 °C	700	990	3
10.9 сна (dpa), 295 °C	740	1060	9

материалов могут быть взяты данные о растяжении образцов, полученные в эксперименте [5]. Таким образом, может быть найдена взаимосвязь между прочностными характеристиками и инструментальной твердостью.

В данной работе произведено моделирование методом конечных элементов испытания по методу вдавливания наконечника типа Берковича с расчетом значений твердости, на примере стали Eurofer97, облученной до дозы 10 смещений на атом. При описании построенной модели задавались упругопластические свойства, характерные для стали, прошедшей облучение нейтронами. Таким образом, были сопоставлены имеющиеся экспериментальные данные [6] и результаты моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделирование методом конечных элементов проводилось в программном пакете Abaqus [7]. Был использован стандартный модуль.

Поскольку индентор типа Берковича обладает симметрией оси третьего порядка, то для снижения вычислительных затрат моделирование проводилось с циклическими граничными условиями. Другими словами, задача ставилась через построение двух геометрических объектов: 1/3 части трехгранной пирамиды и 1/3 части цилиндрического образца.

Установленные при задании образцов значения упругопластических характеристик были взяты из литературы [9]. Модуль упругости стали Eurofer97 был принят равным 225 ГПа, коэффициент Пуассона: 0,3. Предел текучести различался у разных слоев. Были заданы слои: 1 – прошедший облучение до дозы 2 смещения на атом (сна), 2 – облучение до дозы 8 сна, 3 – до 11 сна. В табл.1 приведены использованные

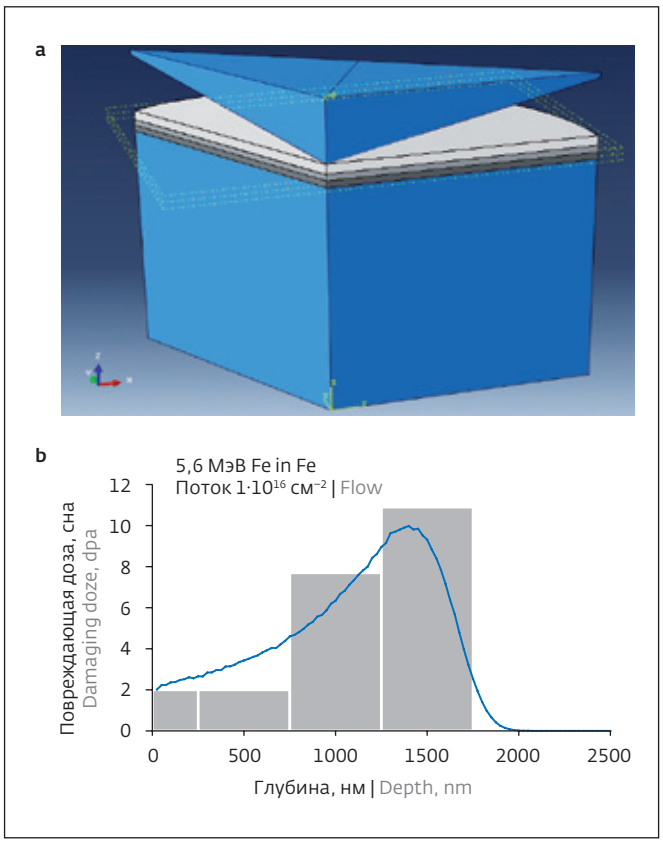

Рис.1. a – геометрия модели, построенной в программном пакете Abaqus; b – гистограмма соответствия расположения слоев моделируемого образца Eurofer97 и повреждающей дозы. Линией показан график зависимости повреждающей дозы от глубины. Оттенками серого показаны слои, соответствовавшие дозам повреждений на рис.1a
Fig.1. a – the geometry of the model constructed in the Abaqus software package; b – correspondence histogram showing location of the layers of the simulated Eurofer97 sample and the damaging dose. The line shows the plot of the damaging dose versus depth. Shades of gray show the layers corresponding to the doses of damage in Fig.1a

для моделирования значения предела текучести, предела прочности и максимальной деформации образцов, полученные на исходном и облученных образцах. Указаны доза и температура облучения образцов. Температура, при которой проводились испытания на растяжение, составляла 25 °C.

На рис.1 показана схема системы "образец + индентор", использованная в качестве модели в данной работе. Для стали Eurofer97 в литературе содержится достаточное количество данных о механических свойствах облученных образцов (см. табл.1), чтобы смоделировать облученный слой как совокупность 3-х подслоев (рис.1a), близких к профилю повреждающей дозы (рис.1b), рассчитанному в пакете SRIM, для внедрения в железо ионов железа с энергией 5,6 МэВ и потоком $1 \cdot 10^{16}$ ион/см^2.

Образец был разбит на два основных сектора: центральную часть, в которой для увеличения точности моделирования зоны контакта индентора с образцом задавалась мелкая сетка разбиения на конечные элементы (рис.2), и периферийная часть с более крупным размером конечных элементов, в которую распространялось и затухало остаточное механическое напряжение. Этот важный подготовительный шаг позволил, с одной стороны, не снижать существенно точность получаемых результатов, а с другой – сократить затраты расчетного времени. Причем плотная сетка должна присутствовать и на образце, и на инденторе, в противном случае возникают артефакты на графике зависимости силы в виде случайных небольших отклонений от монотонной зависимости, что ведет к большому разбросу в расчетных значениях твердости на малых глубинах.

Расчет значений твердости осуществлялся по стандартной формуле, справедливой для идеальной пирамиды типа Берковича [8]:

$$H = \frac{P}{24.5 \cdot h^2} .$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.3a показаны поля упругопластических напряжений фон Мизеса (a), возникающие в образце Eurofer97, имеющем облученные слои, под индентором в результате приложения максимальной силы (258 мН), а также соответствующие деформации (b).

Наибольшие напряжения под индентором возникают в области, соответствующей облученному материалу. При одинаковой величине углубления индентора, составляющей 1 мкм,

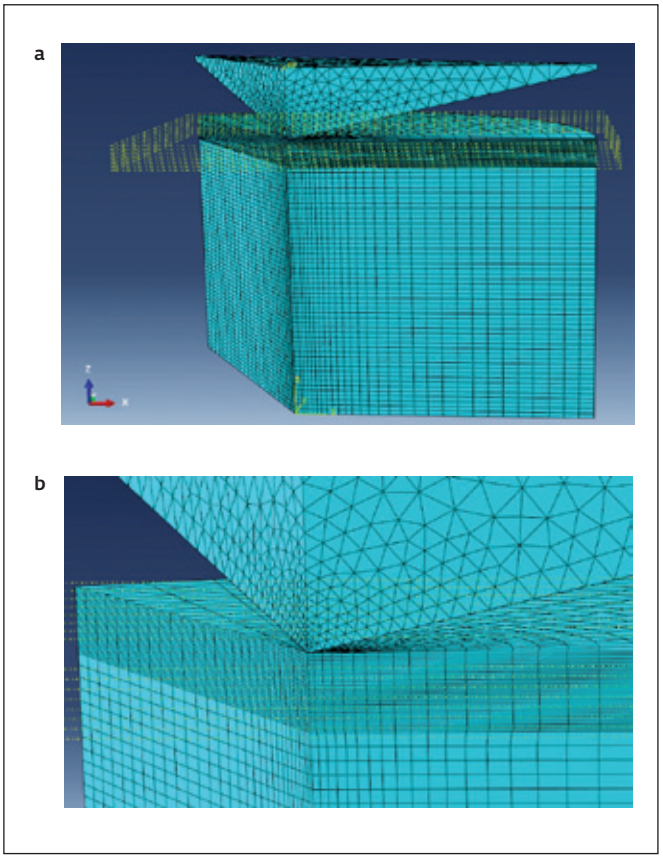

Рис.2. a – модель "индентор + образец", созданная в программе Abaqus; b – увеличенное изображение зоны контакта индентора с образцом, на котором показана более плотная сетка конечных элементов

Fig.2. a – model "indenter + sample" developed in the Abaqus program; b – enlarged view of the indenter-sample contact area showing a denser finite element mesh

model, the elastoplastic properties typical of neutron irradiated steel were specified. In such a way the available experimental data [6] and the simulation results were compared.

RESEARCH METHODS AND MATERIALS

The finite element modelling was carried out with the Abaqus software package [7]. A standard module was used.

Since a Berkovich-type indenter has third-order axis symmetry, our simulation was performed with cyclic boundary conditions to reduce computational costs. In other words, the problem was set by constructing two geometric objects: 1/3 part of a trihedral pyramid and 1/3 part of a cylindrical sample. The values of elastic-plastic properties established for the specimens were taken from the literature [9]. The modulus of elasticity of Eurofer97 steel was taken as 225 GPa and Poisson's

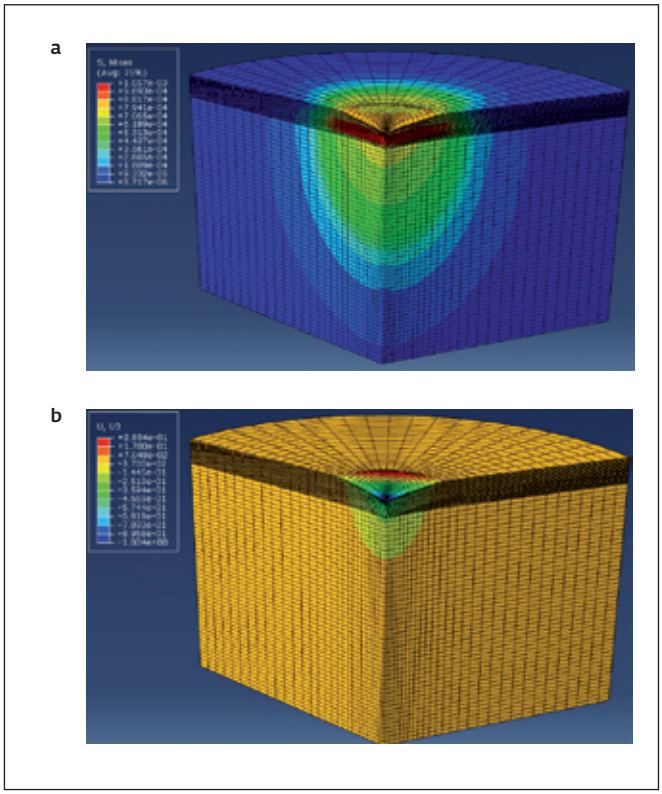

Рис.3. a – поле напряжений, возникшее в образце Eurofer97 с упрочненным поверхностным слоем, при моделировании внедрения недеформируемого индентора до глубины 1 мкм; b – соответствующее распределение деформаций вдоль направления внедрения индентора

Fig.3. a – the stress field that arose in the Eurofer97 sample with a hardened surface layer when simulating penetration of a non-deformable indenter to a depth of 1 μm; b – the corresponding strain distribution along the direction of penetration of the indenter

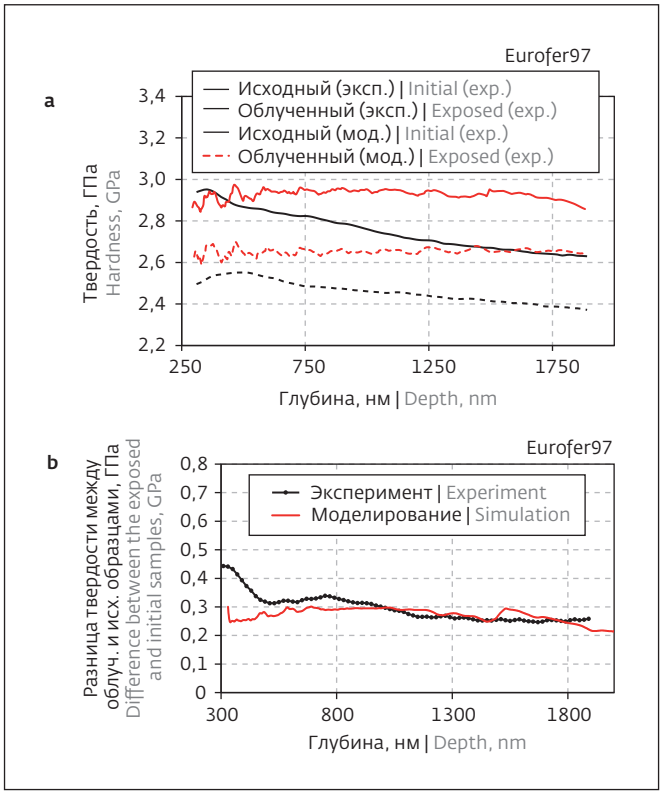

Рис.4. a – зависимости твердости от глубины внедрения индентора, полученные в эксперименте и моделировании, для облученных и исходных образцов Eurofer97; b – зависимости разницы в твердости между облученным и исходным образцами Eurofer97 от глубины внедрения индентора, полученные в эксперименте (доза 10 сна) и при моделировании (доза 10,9 сна)

Fig.4. a – dependences of hardness on the penetration depth of the indenter obtained in the experiment and simulation for irradiated and initial samples of Eurofer97; b – dependences of the difference in hardness between the irradiated and initial samples of Eurofer97 on the depth of penetration of the indenter obtained in the experiment (dose of 10 dpa) and in the simulation (dose 10.9 dpa)

зона напряжений превышает радиус распространения деформаций больше, чем в пять раз.

На рис.4 показаны зависимости твердости от глубины внедрения индентора, полученные в эксперименте и моделировании для образцов Eurofer97: исходного и облученного до дозы 10 сна (в эксперименте) и 10,9 сна (в моделировании).

Экспериментальные зависимости были опубликованы в [10].

На рис.4а зависимости твердости от глубины внедрения индентора, полученные в эксперименте, имеют вид спадающих кривых, в то время как графики для результатов моделирования практически постоянны. Данное обстоятельство объясняется тем фактом, что в ходе моделирования не возникает размерный эффект индентирования, устойчиво наблюдаемый в эксперименте. Размерный эффект выражается

ratio: 0.3. The yield strength was different for the different layers. The following layers were defined: 1 – irradiated to a dose of 2 displacement per atom (dpa), 2 – irradiated to a dose of 8 dpa, 3 – to 11 dpa. Table 1 shows the values of yield strength, tensile strength and maximum deformation of the samples used in the simulation, obtained from the original and irradiated samples. The dose and temperature of irradiated samples are indicated. The temperature at which the tensile test was carried out was 25 °C.

Figure 1 shows a schematic representation of the sample + indentation system used as a model in this work. For Eurofer97 steel, the sufficient

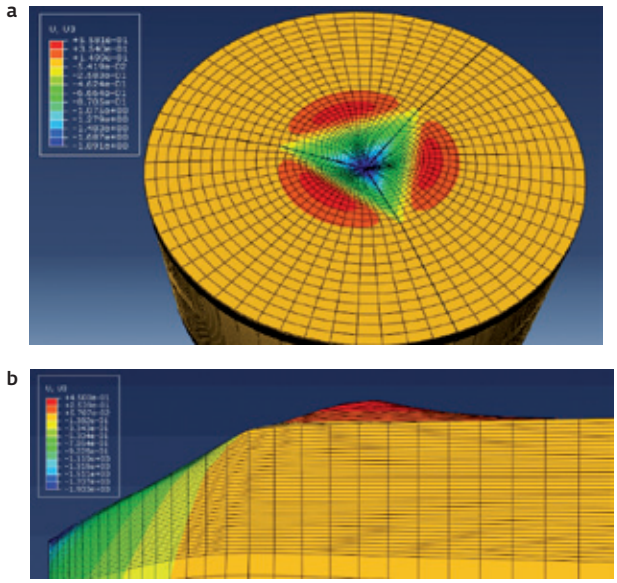

Рис.5. Пластические валы по краям отпечатка после индентирования

Fig.5. Pile-ups along the edges of the imprint after indentation

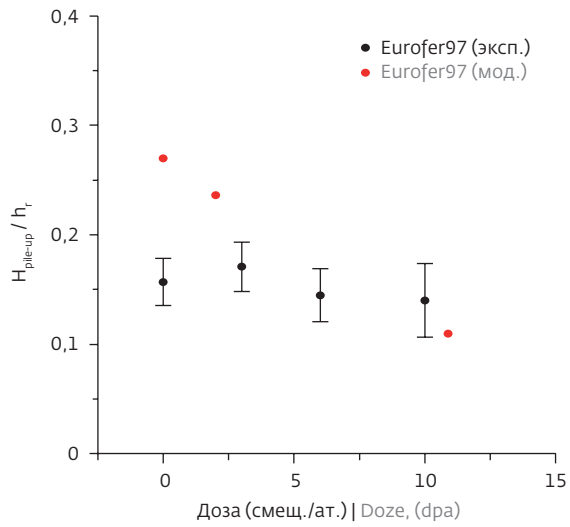

Рис.6. Отношение высоты пластических валов к глубине остаточного отпечатка

Fig.6. The ratio of the height of pile-ups to the depth of the residual imprint

в росте твердости с уменьшением глубины индентирования, то есть связан с величиной области образца, вступающей в контакт с индентором, и не проявляется при глубинах, больших некоторой характеристической глубины.

Тем не менее, приведенные на рис.4b графики демонстрируют удовлетворительное соответствие разниц величин твердости между облученным и необлученным образцами, полученных в эксперименте и в моделировании, что говорит о возможности применения моделирования в качестве первичной оценки твердости новых разрабатываемых сплавов.

Помимо получения зависимостей твердости от глубины внедрения индентора, были измерены величины пластических валов, возникающих по периметру отпечатка. Измерение высоты валов проводилось при помощи встроенной функции Get coordinates как расстояние между узлом сетки, соответствующим максимальной глубине индентирования, и узлом, соответствующим максимальному поднятию рельефа вокруг отпечатка.

На рис.6 показаны результаты вычисления отношения высоты пластических валов к глубине остаточных отпечатков, полученные в эксперименте и при моделировании.

Из рис.6 видно, что величины пластических валов, образующихся по краям отпечатков при

data on mechanical properties of irradiated samples are available in the literature (see Table 1) to simulate the irradiated layer as a set of three sublayers (Fig.1a), close to the damage dose profile (Fig.1b) calculated in the SRIM package, for iron ion introduction with energy 5.6 MeV and flux of $1 \cdot 10^{16}$ ions/cm^2.

The sample was divided into two main sectors: the central part in which a fine grid of finite elements was set to increase modelling accuracy of the indentor-sample contact zone (Fig.2), and the peripheral part with a larger size of finite elements wherein the residual mechanical stress was propagated and damped. This important preparatory step made it possible, on the one hand, not to reduce essentially the obtained results accuracy and, on the other hand, to reduce calculation time. The dense grid must be present both on the samples and on the indenter. Otherwise, artifacts in the force diagram appear in the form of random small deviations from the monotone dependence, which leads to a large scatter in the calculated hardness values at small depths.

The hardness values were calculated using the standard formula valid for an ideal pyramid of the Berkowitz type [8]:

$$H = \frac{P}{24.5 \cdot h^2} .$$

внедрении индентора, коррелируют с режимами облучения образцов как в моделировании, так и в эксперименте, что говорит о возможности применения моделирования в качестве инструмента предварительной оценки твердости материала.

ВЫВОДЫ

Изучение деформационного поведения образцов, имеющих гетерогенную структуру, при локальном давлении может проводиться с помощью моделирования методом конечных элементов.

Моделирование методом конечных элементов процесса инструментального индентирования продемонстрировало удовлетворительное согласие теоретически предсказываемых значений твердости с экспериментальными результатами.

Также, как и в эксперименте, в моделировании были получены зависимости твердости от глубины внедрения индентора. И эксперимент, и моделирование демонстрируют различие свойств образцов до и после облучения. Поскольку в моделировании образец задавался как однородный внутри подслоев с резкими границами, а в эксперименте в структуре встречаются дефекты, неоднородности и градиент свойств на границе интерфейсов, то и значения твердости различаются между собой. Тем не менее, если сравнивать разницу в значениях твердости между облученным и исходным образцами Eurofer97, полученную при моделировании и в эксперименте, то данные хорошо согласуются между собой, а полученные значения можно считать статистически значимыми.

Как и в эксперименте, так и в моделировании в результате внедрения индентора возникали пластические валы. Наблюдаемый с ростом дозы облучения спад пластичности, проявляющийся в снижении величины валов, виден как в эксперименте, так и в моделировании.

В перспективе численное моделирование может быть использовано для выяснения макросвойств материла, что является отдельной задачей, требующей на данном этапе большого объема экспериментальных данных по реакторному облучению. Данная же работа показывает, что измерения твердости можно считать верифицированной методикой по экспресс-анализу влияния облучения на механические свойства, что подтверждается проведенным моделированием.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой

RESULTS AND DISCUSSIONS

Figure 3a shows the von Mises elastoplastic stress fields (a) arising in the Eurofer97 sample with irradiated layers under the indenter as a result of the maximum force application (258 mN) and the corresponding deformation (b).

The highest stresses under the indenter occur in the area corresponding to the irradiated material. With the same indenter depth of 1 μm, the stress area is more than 5 times the deformation propagation radius.

Fig.4 shows the dependences of hardness on indenter depth obtained in the experiment and simulation for Eurofer97 samples: initial and irradiated to dose 10 dpa (in experiment) and 10.9 dpa (in simulation).

The experimental dependencies were published in [10].

In Fig.4a, the dependences of hardness versus indentation depth, obtained in the experiment, have the form of falling curves, while the plots for the simulation results are practically constant. This can be explained by the fact that the dimensional indentation effect stably observed in the experiment does not appear in the course of simulation. The dimensional effect is expressed in growth of hardness with decreasing indentation depth, i.e., it is related to the area size of the sample that comes into contact with the indenter and does not appear at depths greater than a certain characteristic depth.

Nevertheless, the graphs in Fig.4b show satisfactory agreement between a difference in hardness values between irradiated and unirradiated samples obtained in the experiment and in the simulation, which suggests possibility of using simulation as an initial estimate of hardness of the newly developed alloys.

In addition to obtaining the dependencies of hardness versus indentation depth, the values of plastic rolls-on occurring around the perimeter of indentation were measured. The rolls-on heights were measured using the built-in "Get coordinates" function as the distance between the grid node corresponding to the maximum indentation depth and the node corresponding to the maximum raised relief around the indentation.

Fig.6 shows the calculation results of ratio of plastic rolls-on height to the depth of the residual imprints, obtained in the experiment and in simulation.

It can be seen from Fig.6 that the values of plastic rolls-on formed at the edges of indentations during indentation correlate with the irradiation modes of samples in both simulation and

работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. *Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.*

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Zinkle S.J.J., Was G.S.S.** Materials challenges in nuclear energy // ACTA Mater. THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND: PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, 2013. Vol. 61, no. 3. PP. 735–758.
2. **Was G.S., Averback R.S.** Radiation Damage Using Ion Beams / ed. Konings R.J.M.B.T.-C.N.M. Oxford: Elsevier, 2012. PP. 195–221.
3. **Усеинов А.С., Кравчук К.С., Масленников И.И.** Получение томограммы механических свойств методами наноиндентирования // НАНОИНДУСТРИЯ. 2014. № 1. С. 34–39.
4. **Li X., Bhushan B.** A review of nanoindentation continuous stiffness measurement technique and its applications 10.1016/S1044-5803(02)00192-4 : Materials Characterization | ScienceDirect.com. 2002. Vol. 48. PP. 11–36.
5. **Леонтьева-Смирнова М.В.** et al. Микроструктура и механические свойства малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (Rusfer-EK-181) // Перспективные материалы. 2006. Т. 6. С. 40–52.
6. **Gladkikh E.V.** et al. A Study of the Effect of Ion Irradiation on the Mechanical Properties of Eurofer 97 Steel // J. Surf. Investig. PLEIADES PUBLISHING INC, MOSCOW, 00000, RUSSIA: PLEIADES PUBLISHING INC, 2019. Vol. 13, no. 1. PP. 48–52.
7. **Oh H.J.** *et al.* Finite element analysis of thermal nanoindentation process and its experimental verification // Int. J. Mod. Phys. B. 2008. Vol. 22, no. 31–32. PP. 5949–5954.
8. **Oliver W.C., Pharr G.M.** An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic-Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments // J. Mater. Res. 1992. Vol. 7, no. 6. PP. 1564–1583.
9. **Luzginova N.V.** Irradiation response of ODS Eurofer97 steel // J. Nucl. Mater. 2012. Vol. 428. PP. 192–196.
10. **Gladkikh E.V.** *et al.* Comparison of Hardening Effects of Eurofer97 and Ods Eurofer Steels Under Ion Irradiation // Izv. Vyss. Uchebnykh Zaved. Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya. 2020. Vol. 63, no. 12. PP. 57–62.

experiment, which indicates possibility of using simulation as a tool for preliminary assessment of material hardness.

CONCLUSIONS

The deformation behaviour of heterogeneous specimens under local pressure can be studied by means of finite element modelling.

Finite element modelling of the tool indentation process has shown satisfactory agreement between the theoretically predicted hardness values and the experimental results.

Both in the experiment and in the simulation the dependences of hardness versus the penetration depth of the indentor were also obtained. Both the experiment and the simulation show differences in the samples properties before and after irradiation. Since in simulation the sample is specified as homogeneous within sublays and with sharp boundaries, while in the experiment the defects, non-homogeneities and a property gradient at the interface occur in the structure, the hardness values differ from each other. Nevertheless, if we compare the difference in hardness values between the irradiated and the original Eurofer97 samples obtained in the simulation and in the experiment, the data are in good agreement with each other and the values obtained can be considered as statistically significant.

Both in the experiment and in simulation, plastic rolls-on appeared as a result of indenter penetration. The decrease in plasticity observed with increasing irradiation dose, manifested by a decrease in the size of the rolls-on, is evident both in the experiment and in the simulation.

In the long term, numerical simulation can be used to elucidate the macro properties of the material, which is a separate task requiring at this stage a large amount of experimental data on reactor irradiation. The present work, however, shows that hardness measurements can be considered as a verified technique for the express analysis of the irradiation effect on mechanical properties, which is confirmed by the simulation described above.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. *The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.*