

УДК 539.2

ИЗМЕНЕНИЯ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СТАЛИ, ОБРАБОТАННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Н. И. ПОЛЯК¹⁾, В. М. АНИЩИК¹⁾, В. В. ХОДАСЕВИЧ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Исследовано влияние облучения импульсным электронным пучком с энергией $E = 300$ кэВ, количеством импульсов $N = 100$, длительностью импульса $\tau = 50$ нс и плотностью тока $J = 3$ А/см² на морфологию поверхности и физико-механические свойства приповерхностного слоя закаленной стали марки 65. Обнаружено, что обработка образцов электронным пучком приводит к формированию более развитого рельефа поверхности (с конусовидными образованиями различных размеров) в результате радиационной эрозии, а также к перераспределению атомов углерода в приповерхностном слое, обусловленному сверхбыстрым нагревом и резким охлаждением и появлением вследствие этого высокой концентрации вакансий и полей напряжений, оказывающих влияние на синтез оксикаридов сложного состава. Выявлено изменение физико-механических свойств (микротвердости по Виккерсу (HV_{μ}), твердости по Мартенсу (HM), твердости (H_{IT}), модуля Юнга (E_{IT}), ползучести (C_{IT}), работы упругой деформации (W_{el}), полной работы, совершенной при индентировании (W_{total}), упругой составляющей работы (η_{IT}) и упругого восстановления (R)) модифицированного слоя стали. Показано, что изменение параметров тонкой структуры (периода кристаллической решетки, величины микронапряжений, размера блоков мозаики), определенных с помощью рентгеноструктурного анализа, коррелирует с изменением ее физико-механических свойств.

Ключевые слова: импульсный электронный пучок; сталь; морфология поверхности; фазовый состав; структура; твердость; модуль Юнга.

Образец цитирования:

Поляк НИ, Анищик ВМ, Ходасевич ВВ. Изменения в приповерхностном слое стали, обработанной импульсным электронным пучком. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2024;2:84–92.
EDN: FCYGKT

For citation:

Poliak NI, Anishchik VM, Khodasevich VV. Changes in the near-surface layer of steel processed by a pulsed electron beam. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2024;2: 84–92. Russian.
EDN: FCYGKT

Авторы:

Наталья Ипполитовна Поляк – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета.

Виктор Михайлович Анищик – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета.

Валерий Васильевич Ходасевич – кандидат физико-математических наук, доцент; ведущий специалист по учебному оборудованию кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета.

Authors:

Natallia I. Poliak, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.

n.poliak@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9560-9617>

Victor M. Anishchik, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.

anishchik@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-3294-2484>

Valery V. Khodasevich, PhD (physics and mathematics), docent; leading specialist in educational equipment at the department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.
khodasevich@bsu.by

CHANGES IN THE NEAR-SURFACE LAYER OF STEEL PROCESSED BY A PULSED ELECTRON BEAM

N. I. POLIAK^a, V. M. ANISHCHIK^a, V. V. KHODASEVICH^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: N. I. Poliak (n.poliak@mail.ru)

Abstract. The effect of irradiation by a pulsed electron beam with an energy of $E = 300$ keV, number of pulses of $N = 100$, pulse duration of $\tau = 50$ ns and current density of $J = 3$ A/cm² on the surface morphology and physico-mechanical properties of near-surface layer of hardened steel grade 65 has been studied. It was found that the treatment of samples with an electron beam leads to the formation of a more developed surface relief (with cone-shaped formations of various sizes) as a result of radiation erosion, the redistribution of carbon atoms in the near-surface layer due to ultrafast heating and abrupt cooling, the resulting appearance of a high concentration of vacancies and stress fields affecting the formation oxycarbides of complex composition. A change in the physical and mechanical properties (Vickers microhardness (HV_{μ}), Martens hardness (HM), indentation hardness (H_{IT}), Young's modulus (E_{IT}), indentation creep (C_{IT}), elastic reverse deformation work of indentation (W_{el}), total mechanical work of indentation (W_{total}), elastic component of work (η_{IT}) and indentation relaxation (R)) of the modified steel layer was revealed. It is shown that the change in the parameters of the fine structure (the period of the crystal lattice, the value of the microstresses and the size of the mosaic blocks) obtained by X-ray diffraction analysis correlates with a change in its physical and mechanical properties.

Keywords: pulsed electron beam; steel; surface morphology; phase composition; structure; hardness; Young's modulus.

Введение

В последнее время вызывает интерес обработка поверхности металлов импульсными электронными и ионными пучками с плотностью мощности 10^6 – 10^9 Вт/см². В зависимости от плотности мощности импульсные электронные пучки (ЭП) способны реализовывать различные режимы обработки мишени (разогрев, плавление, высокоскоростную закалку, рекристаллизацию), которые могут приводить к существенному изменению состояния поверхности и физико-механических свойств приповерхностного слоя [1–5].

В связи с этим целью настоящей работы являлось изучение влияния облучения импульсным ЭП на морфологию поверхности и физико-механические свойства приповерхностного слоя стали.

Материалы и методы исследования

В работе исследовались закаленные образцы стали марки 65 (табл. 1) размером $10 \times 10 \times 2$ мм. Образцы выдерживались при температуре 830 °С в течение 30 мин, после чего охлаждались в воду, шлифовались и полировались. Облучение импульсным ЭП проводилось в вакууме ($\approx 1 \cdot 10^{-3}$ Па) на ускорителе «Астра-М» (Томский политехнический университет, Россия) [6] в следующем режиме: энергия $E = 300$ кэВ, количество импульсов $N = 100$, длительность импульса $\tau = 50$ нс, плотность тока $J = 3$ А/см².

Таблица 1

Химический состав стали, мас. %

Table 1

Chemical composition of steel, wt. %

Fe	C	Mn	Si	Cr	S	P
Основа	0,62–0,70	0,50–0,80	0,17–0,37	<0,25	<0,035	<0,035

Морфология поверхности образцов исследовалась на растровом электронном микроскопе (РЭМ) LEO-1455VP (*Carl Zeiss*, Германия). Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) проводился с помощью энергодисперсионного спектрометра Aztec Energy Advanced X-Max 80 (*Oxford Instruments*, Великобритания). Топография поверхности образцов изучалась на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47-PRO (ООО «НТ-МДТ», Россия). Рентгенографические исследования осуществлялись на дифрактометре Ultima IV (*Rigaku*, Япония) в излучении CuK_{α} ($\lambda = 0,15418$ нм) с использованием геометрии скользящего пучка (угол скольжения 1° , шаг $0,05^{\circ}$). Параметр решетки (a) определялся по угловому положению дифракционной линии (211) α -Fe, размер областей когерентного рассеяния (блоков мозаики (L)) и величина микронапряжений (ϵ) оценивались по уширению дифракционных линий (110) и (211) α -Fe соответственно.

Микротвердость по Виккерсу (HV_{μ}) образцов измерялась на микротвердомере DHV-1000 (*Jinan Victory Instrument*, Китай) по ГОСТ 9450-76¹. В целях исключения масштабного фактора измерения проводились при различных нагрузках на индентор (0,098; 0,245 и 0,490 Н), время выдержки под нагрузкой составляло 10 с. Значение HV_{μ} рассчитывалось по 10 отпечаткам при каждой нагрузке, погрешность измерений не превышала 5 %. Твердость по Мартенсу (HM), твердость (H_{IT}), модуль Юнга (E_{IT}), ползучесть (C_{IT}), работа упругой деформации (W_{el}), полная работа, совершенная при индентировании (W_{total}), упругая составляющая работы (η_{IT}) и упругое восстановление (R) образцов изучались методом инструментального индентирования (*indentation test*, IT) на приборе DUN-202 (*Shimadzu*, Япония) по ГОСТ Р 8.748-2011 (ISO 14577-1:2015)². Нагрузка на пирамиду Берковича составляла 0,294 Н, скорость нагружения – 0,070 Н/с. В режиме мононагружения ($n = 1$ цикл) время выдержки под нагрузкой равнялось 10 с, в режиме мультинагружения ($n = 10$ циклов) – 5 с для каждого цикла.

Результаты и их обсуждение

Морфология поверхности исходного и обработанного ЭП образцов стали представлена на рис. 1 и 2 соответственно. РЭМ-снимки получены с использованием режима вторичных электронов (*secondary electron*, SE), что позволяет наблюдать рельеф поверхности, и режима обратнорассеянных электронов (*backscattered electron detector*, BSD), когда на изображении поверхности образца можно видеть фазовый контраст, создаваемый благодаря различиям в его химическом составе. Так, на поверхности исходного образца присутствуют царапины, образовавшиеся в результате ее предварительной подготовки (см. рис. 1).

На поверхности обработанного ЭП образца можно видеть локально расположенные на светлом фоне темные участки. Они имеют сложную форму и отличаются меньшей плотностью по сравнению с матрицей сплава.

Как следует из данных РСМА (рис. 3 и 4), темные участки являются углеродсодержащими и характеризуются повышенным содержанием кислорода. Можно предположить, что такие изменения могут быть связаны с синтезом в приповерхностном слое стали, обработанной импульсным ЭП, оксикарбидов сложного состава.

В связи с разным масштабным уровнем рельефа исследования методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) проводились на участках, свободных от оксикарбидов (рис. 5), при этом значения шероховатости поверхности усреднялись по 5 различным участкам образца с одинаковой выборочной площадью. В результате облучения ЭП средняя шероховатость (Ra) и среднеквадратичное отклонение (Rq) уменьшаются от 32 до 28 нм и от 39 до 36 нм соответственно. Наличие царапин на поверхности стали после обработки ЭП свидетельствует о том, что приповерхностный слой не расплавляется.

Следует отметить, что на поверхности наблюдаются конусовидные образования высотой до 20 нм, также встречаются единичные образования, высота которых достигает 40 нм (см. рис. 5, з). Представляет интерес и форма отдельных конусов: некоторые из них полые внутри (рис. 6). Такое изменение рельефа поверхности и параметров шероховатости может быть связано с радиационной эрозией поверхности мишени. Согласно предложенной в статье [4] модели эрозии поверхности мишени под воздействием мощных импульсных пучков заряженных частиц при сходных с нашим случаем параметрах ЭП имеет место поверхностное испарение.

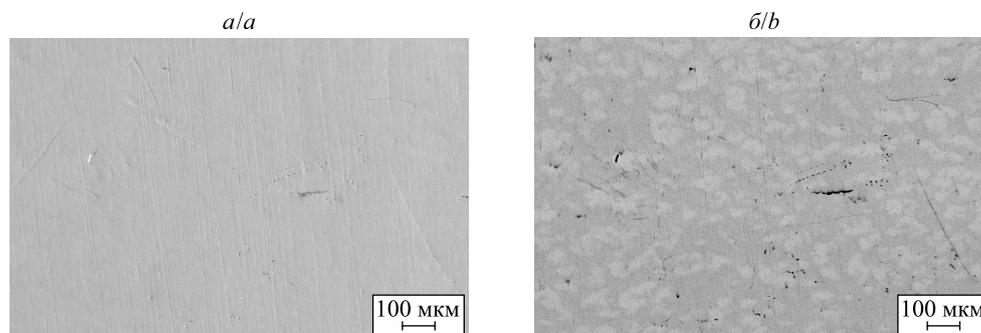


Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности стали до обработки ЭП, полученные в режимах SE (а) и BSD (б)

Fig. 1. Scanning electron microscopy (SEM) images of the steel surface before treatment with an electron beam obtained in SE (a) and BSD (b) modes

¹ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Введ. 01.07.1977. М. : Изд-во стандартов, 1993. 33 с.

²ГОСТ Р 8.748-2011. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Ч. 1. Метод испытаний. Введ. 01.05.2013. М. : Стандартинформ, 2013. IV, 23 с.

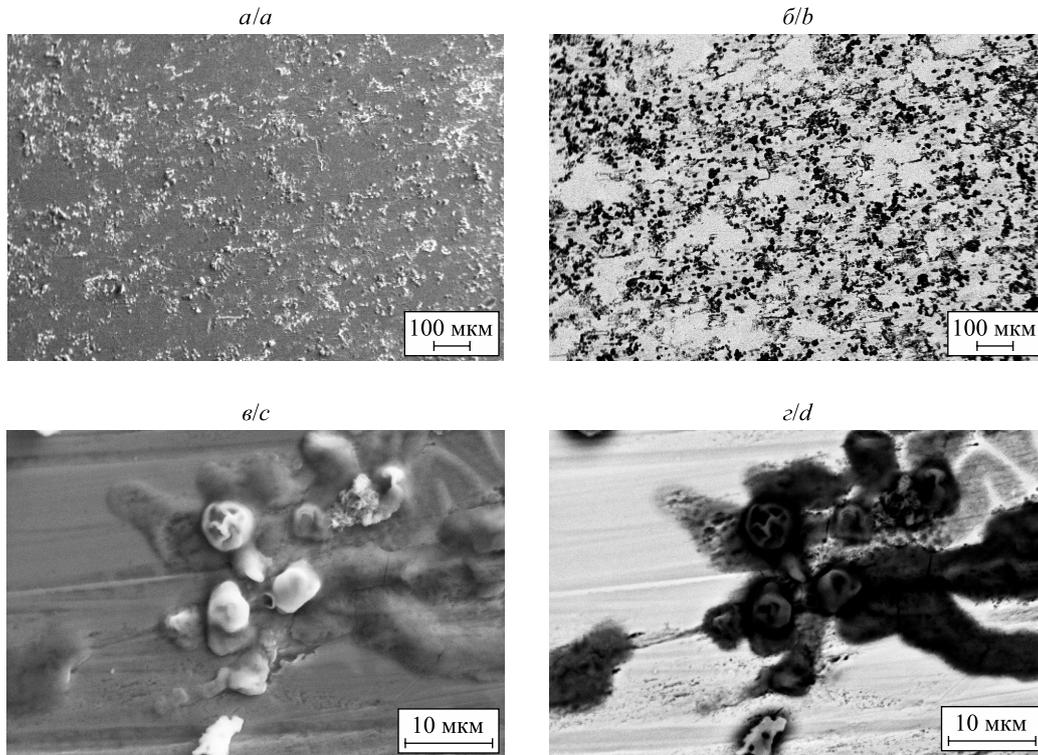


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности стали после обработки ЭП, полученные в режимах SE (а, в) и BSD (б, з)
Fig. 2. SEM images of the steel surface after treatment with an electron beam obtained in SE (a, c) and BSD (b, d) modes

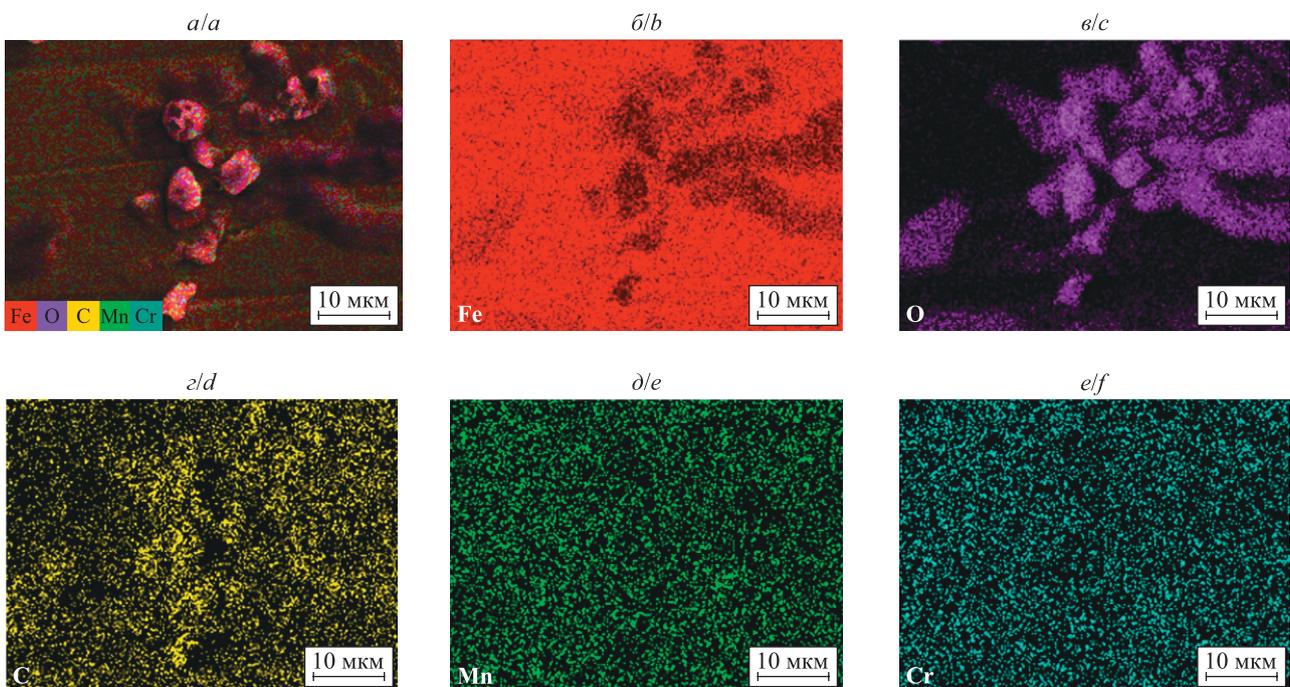


Рис. 3. Карты распределения химических элементов в стали после обработки импульсным ЭП
Fig. 3. Maps of the distribution of chemical elements in steel after treatment with a pulsed electron beam

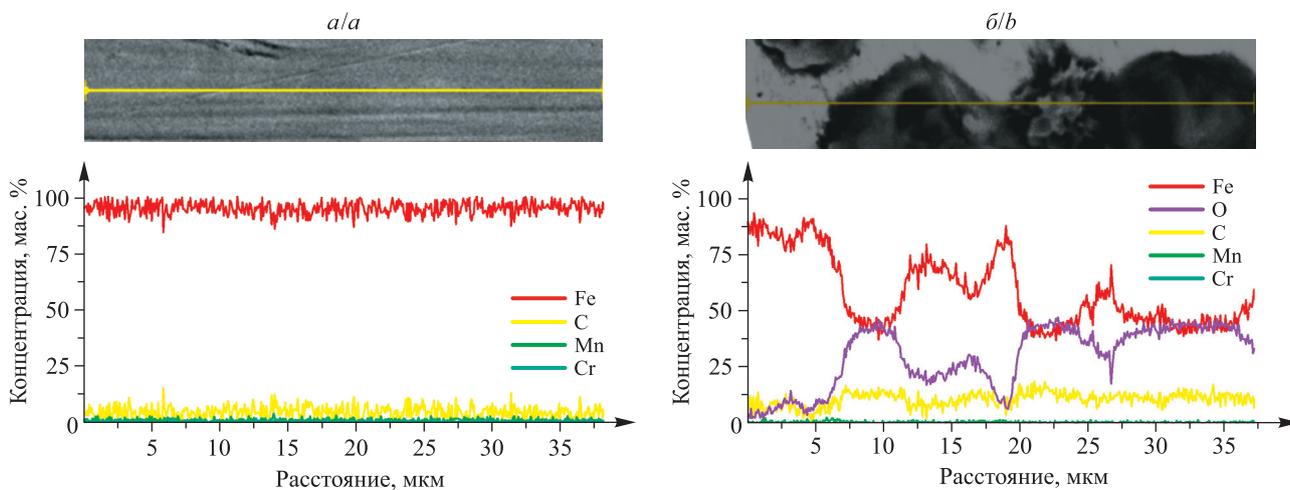


Рис. 4. Распределение химических элементов вдоль произвольной линии в приповерхностном слое исходного (а) и обработанного ЭП (б) образцов
 Fig. 4. Distribution of chemical elements along an arbitrary line in the near-surface layer of the original (a) and electron-beam-treated (b) samples

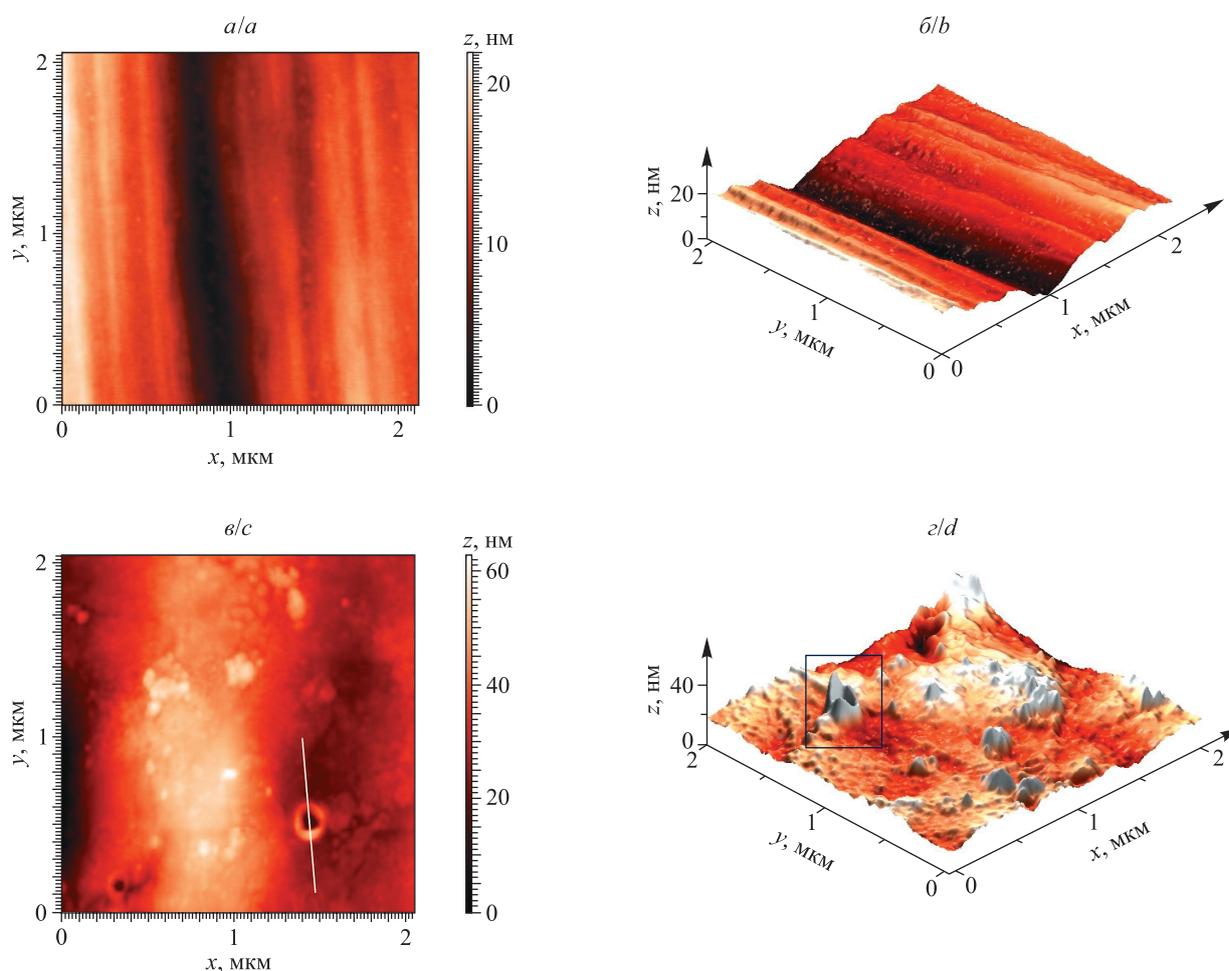


Рис. 5. Двумерные (а, в) и трехмерные (б, г) АСМ-изображения поверхности исходного (а, б) и обработанного ЭП (в, г) образцов
 Fig. 5. Two-dimensional (a, c) and three-dimensional (b, d) atomic force microscopy (AFM) images of the surface of the original (a, b) and electron-beam-treated (c, d) samples

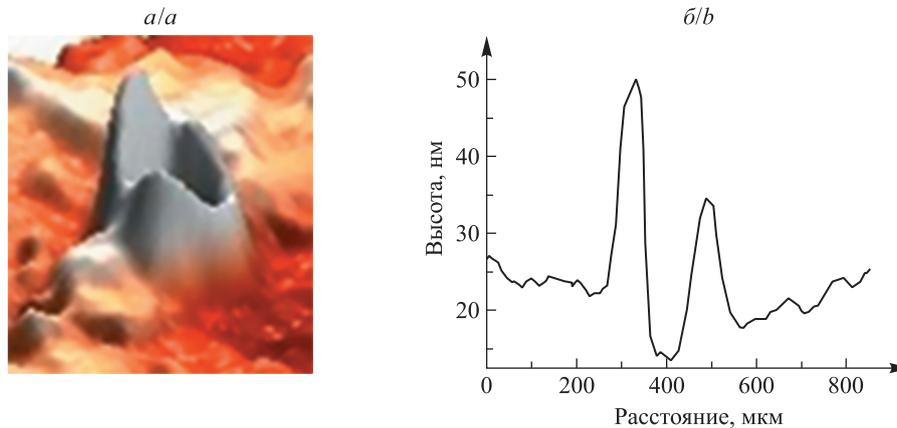


Рис. 6. Трехмерное АСМ-изображение конусовидного образования на поверхности стали, обработанной ЭП (а), и его профиль (б)
Fig. 6. Three-dimensional AFM image of a cone-shaped formation on the surface of steel treated with an electron beam (a) and its profile (b)

Таким образом, анализ представленных выше экспериментальных данных свидетельствует о существенном изменении состояния приповерхностных слоев стали, обработанной ЭП. Участки с повышенным содержанием кислорода и углерода (см. рис. 3 и 4) соответствуют частицам оксикаридов, образование которых вызвано интенсификацией диффузионных процессов вследствие не только сверхбыстрого нагрева (10^7 – 10^9 К/с) и резкого охлаждения (10^4 – 10^9 К/с), но и развития при этом значительных напряжений в приповерхностном слое мишени.

Как показали результаты рентгеноструктурного анализа [7], параметр решетки α -Fe для исходного образца составляет 0,286 51 нм, что ниже табличного значения ($a_{Fe} = 0,286 64$ нм). После воздействия ЭП его величина незначительно уменьшается (до 0,286 45 нм), при этом размер блоков мозаики увеличивается от 18,7 до 21,9 нм, а величина микронапряжений уменьшается от $3,29 \cdot 10^{-3}$ до $2,49 \cdot 10^{-3}$. Несмотря на то что поверхность обработанного ЭП образца приобрела радужный отлив, который становится заметен невооруженным глазом при толщине окисленного слоя 40–500 нм, рефлексы оксикаридов на дифрактограмме облученного образца не выявлены, что можно связать с их малой объемной долей [7].

Благодаря непрерывной регистрации глубины проникновения индентора h под приложенной нормальной нагрузкой F в течение времени t при индентировании можно определить упругопластические характеристики материалов [8]. На рис. 7 и 8 приведены типичные кривые «нагрузка – глубина проникновения индентора» и «глубина проникновения индентора – время» исследуемых образцов. Можно видеть, что глубина проникновения индентора h_{max} после выдержки под максимальной нагрузкой, глубина остаточного отпечатка h_0 после снятия нагрузки и упругая жесткость материала в отпечатке (наклон начального участка разгрузочной ветви) $S = \frac{dF}{dh}$ для обработанного ЭП образца значительно отличаются от таковых исходного образца.

Результаты инструментального индентирования, приведенные в табл. 2, показали заметные изменения физико-механических свойств приповерхностного слоя стали после ее обработки ЭП.

Таблица 2

Микротвердость по Виккерсу (HV_{μ}), твердость по Мартенсу (HM), твердость (H_{IT}), модуль Юнга (E_{IT}), ползучесть (C_{IT}), работа упругой деформации (W_{el}), полная работа, совершенная при индентировании (W_{total}), упругая составляющая работы (η_{IT}) и упругое восстановление (R) образцов стали до и после обработки ЭП

Table 2

Vickers microhardness (HV_{μ}), Martens hardness (HM), indentation hardness (H_{IT}), Young's modulus (E_{IT}), indentation creep (C_{IT}), elastic reverse deformation work of indentation (W_{el}), total mechanical work of indentation (W_{total}), elastic component of work (η_{IT}) and indentation relaxation (R) of the steel samples before and after treatment with an electron beam

Образец	HV_{μ} , ГПа	HM , ГПа	H_{IT} , ГПа	E_{IT} , ГПа	C_{IT} , %	$10^{-3} W_{el}$, мкН · м	$10^{-3} W_{total}$, мкН · м	η_{IT} , %	R , %
Исходный	$2,1 \pm 0,1$	2,1	2,5	202	3,2	36	313	11,5	12
Обработанный ЭП	–*	1,5	1,8	141	3,4	46	365	12,7	17

*Из-за наличия окисленных областей на поверхности образца корректно провести измерение HV_{μ} не удалось.

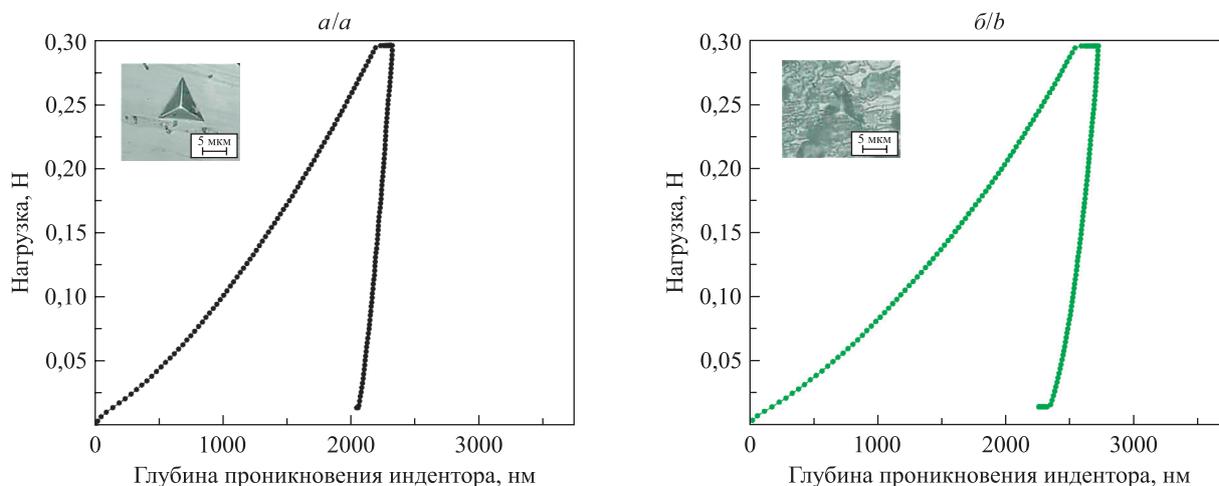


Рис. 7. Диаграммы инструментального индентирования «нагрузка – глубина проникновения индентора» исходного (а) и обработанного ЭП (б) образцов. На вставках приведены оптические снимки отпечатков индентора

Fig. 7. Diagrams of instrumental indentation «load – indenter penetration depth» of the original (a) and electron-beam-treated (b) samples. The inserts show optical images of indenter prints

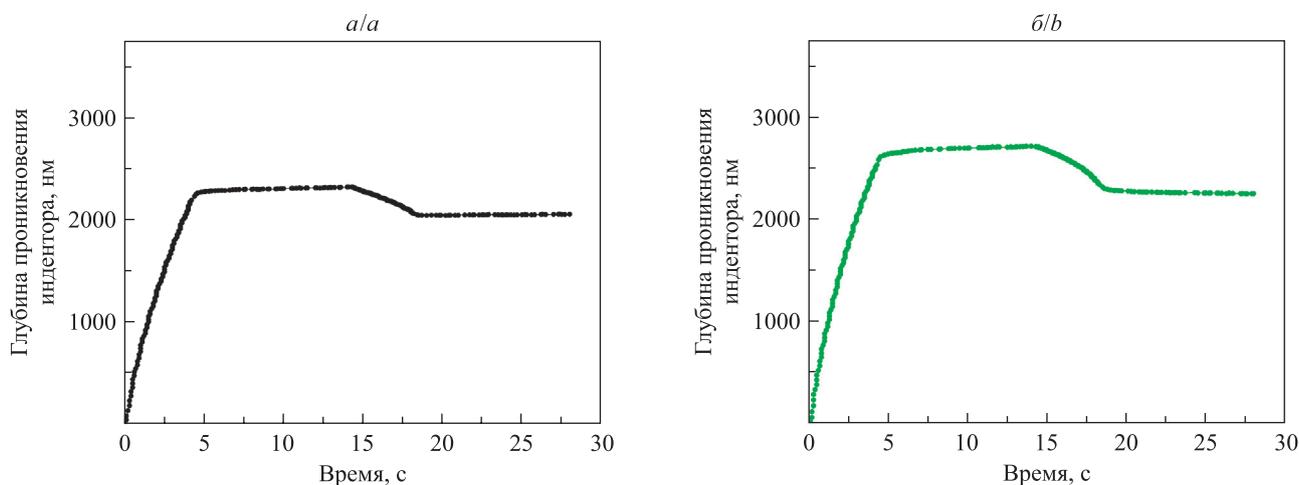


Рис. 8. Диаграммы инструментального индентирования «глубина проникновения индентора – время» исходного (а) и обработанного ЭП (б) образцов

Fig. 8. Diagrams of instrumental indentation «indenter penetration depth – time» of the original (a) and electron-beam-treated (b) samples

Микротвердость по Виккерсу исходного образца стали при глубине индентирования 2200–3000 нм составляет 2,1 ГПа, что совпадает со значением твердости по Мартенсу (см. табл. 2). Для обработанного ЭП образца наличие оксикаридов на поверхности не позволило корректно провести измерения длин диагоналей отпечатков и определить величину HV_{μ} (см. рис. 7, б, вставка). Твердость по Мартенсу находилась по максимальной глубине проникновения индентора (h_{\max}) как для мононагружения (см. табл. 2), так и для каждого цикла мультинагружения и соответствующей нагрузки (рис. 9 и 10). Можно видеть, что для исходного образца с увеличением глубины проникновения индентора от 420 до 2300 нм наблюдается уменьшение твердости по Мартенсу от 6,3 до 2,2 ГПа. Обработка образцов ЭП не повлияла на характер зависимостей $HM = f(h)$, при этом значения HM уменьшились на 30–35 % и составили 4,4 ГПа для $h = 530$ нм и 1,4 ГПа для $h = 2800$ нм. Как видно из представленных в табл. 2 данных, обработка ЭП также приводит к значительному уменьшению твердости и модуля Юнга приповерхностного слоя стали (на 28 и 30 % от исходных значений $H_{IT} = 2,5$ ГПа и $E_{IT} = 202$ ГПа соответственно). Скорость убывания H_{IT} и E_{IT} примерно одинакова для обоих режимов, ползучесть при этом незначительно возрастает. Полная работа деформации $W_{\text{total}} = W_{\text{el}} + W_{\text{pl}}$, совершенная при индентировании, тратится преимущественно на пластическую деформацию W_{pl} , при этом обработка ЭП приводит к увеличению работы упругой деформации W_{el} и упругого восстановления $R = \frac{h_{\max} - h_0}{h_{\max}}$.

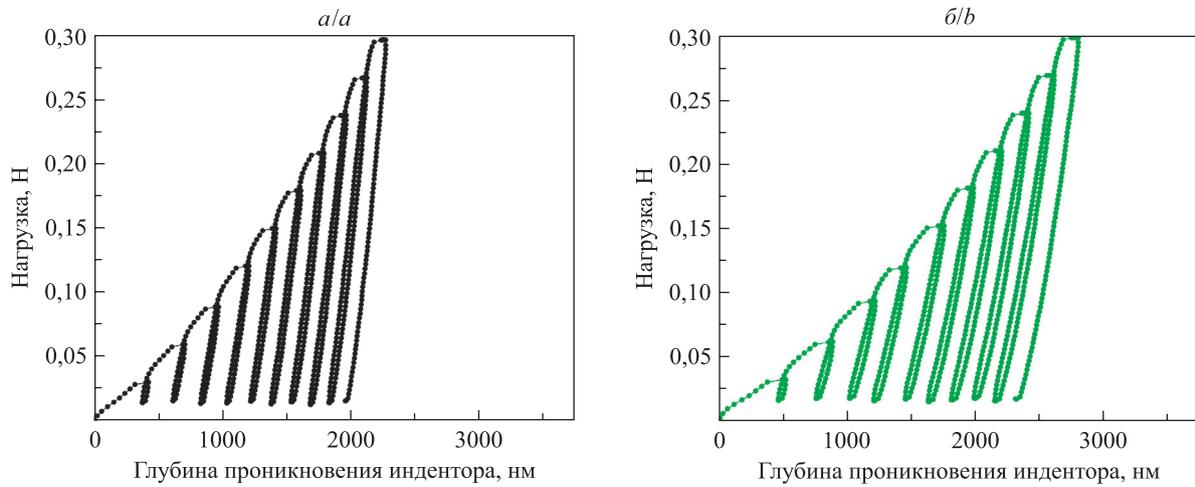


Рис. 9. Диаграммы инструментального индентирования «нагрузка – глубина проникновения индентора» исходного (а) и обработанного ЭП (б) образцов

Fig. 9. Diagrams of instrumental indentation «load – indenter penetration depth» of the original (a) and electron-beam-treated (b) samples

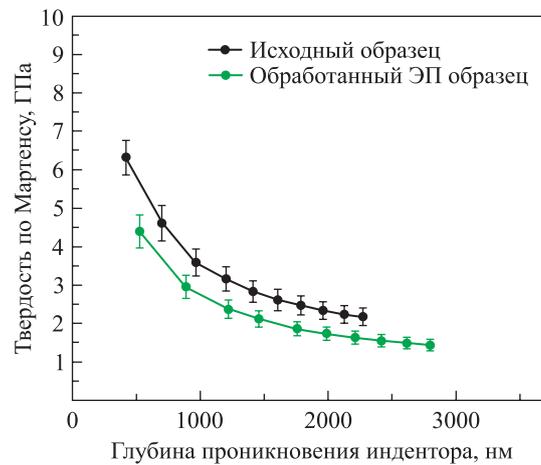


Рис. 10. Зависимость твердости по Мартенсу от глубины проникновения индентора для исходного и обработанного ЭП образцов

Fig. 10. Dependence of the Martens hardness on the indenter penetration depth of the original and electron-beam-treated samples

Результаты инструментального индентирования хорошо согласуются с данными рентгеноструктурного анализа, т. е. можно полагать, что изменение физико-механических свойств во многом обусловлено напряжениями в анализируемом слое. В то же время воздействие сверхбыстрого нагрева и резкого охлаждения при облучении приводит к образованию высокой концентрации вакансий в приповерхностном слое, что способствует протеканию структурно-фазовых превращений, а также изменению уровня напряжений [9] и параметра решетки мишени.

Заключение

Таким образом, обработка стали импульсным ЭП приводит к изменению морфологии поверхности, вызванному радиационной эрозией, интенсификации диффузионных процессов под воздействием сверхбыстрого нагрева и резкого охлаждения (с образованием высокой концентрации вакансий), перемешиванию компонентов сплава, синтезу новых фаз, распространению при этом упругопластических волн, релаксации напряжений и, как следствие, соответствующему изменению физико-механических свойств.

Библиографические ссылки

1. Диденко АН, Лигачев АЕ, Куракин ИБ. *Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов*. Москва: Энергоатомиздат; 1987. 184 с.
2. Клопотов АА, Иванов ЮФ, Власов ВА, Потехаев АИ. Термодинамический анализ фазообразования в нержавеющей стали, обработанной высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. В: Самсонов ВМ, Сдобняков НЮ, редакторы. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Выпуск 8*. Тверь: Тверской государственный университет; 2016. с. 155–163. EDN: XERSOX.
3. Рыкалин НН, редактор. *Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы*. Москва: Наука; 1985. 246 с.
4. Блейхер ГА, Кривобоков ВП. Влияние параметров мощных импульсных пучков заряженных частиц на интенсивность и энергоэффективность эрозии поверхности металлов. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2013;2:48–54. DOI: 10.17073/1997-308X-2013-2-48-54.
5. Погребняк АД, Кульментьева ОП. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях и свойства металлических материалов после импульсного воздействия пучков частиц. *Физическая инженерия поверхности*. 2003;1(2):108–136.
6. Egorov I, Esipov V, Remnev G, Kaikanov M, Lukonin E, Poloskov A. A high-repetition rate pulsed electron accelerator. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013;20(4):1334–1339. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6571453.
7. Поляк НИ, Анищик ВМ, Ходасевич ВВ, Викторовский НД, Караваева ВС, Егоров ИС. Структурно-фазовые изменения в стали, облученной импульсным пучком электронов. В: Рубаник ВВ, редактор. *Перспективные материалы и технологии. Материалы международного симпозиума; 21–25 августа 2023 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь; 2023. с. 204–206.
8. Oliver WC, Pharr GM. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*. 1992;7(6):1564–1583. DOI: 10.1557/JMR.1992.1564.
9. Ткаченко ЭА, Постников ДВ. Расчет напряжений при радиационном облучении металлических сплавов. *Омский научный вестник*. 2013;123:29–31.

References

1. Didenko AN, Ligachev AE, Kurakin IB. *Vozdeistvie puchkov zaryazhennykh chastits na poverkhnost' metallov i splavov* [The effect of charged particle beams on the surface of metals and alloys]. Moscow: Energoatomizdat; 1987. 184 p. Russian.
2. Klopotov AA, Ivanov YuF, Vlasov VA, Potekaev AI. [Thermodynamic analysis of phase formation in stainless steel treated with a high-intensity pulsed electron beam]. In: Samsonov VM, Sdobnyakov NYu, editors. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. Vypusk 8* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. Issue 8]. Tver: Tver State University; 2016. p. 155–163. Russian. EDN: XERSOX.
3. Rykalin NN, editor. *Vozdeistvie kontsentrirrovannykh potokov energii na materialy* [The effect of concentrated energy flows on materials]. Moscow: Nauka; 1985. 246 p. Russian.
4. Bleikher GA, Krivobokov VP. The effect of powerful impulse charged particle beam parameters on intensity and energy efficiency of metal surface erosion. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2013;2:48–54. Russian. DOI: 10.17073/1997-308X-2013-2-48-54.
5. Pogrebnyak AD, Kul'ment'eva OP. Structure-phase transformations in near-surface layers and properties of metal materials after pulse influence of particle beams. *Physical Surface Engineering*. 2003;1(2):108–136. Russian.
6. Egorov I, Esipov V, Remnev G, Kaikanov M, Lukonin E, Poloskov A. A high-repetition rate pulsed electron accelerator. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013;20(4):1334–1339. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6571453.
7. Poliak NI, Anishchik VM, Khodasevich VV, Victorovsky ND, Karavaeva VS, Egorov IS. [Structural and phase changes in steel, irradiated by a pulsed electron beam]. In: Rubanik VV, editor. *Perspektivnye materialy i tekhnologii. Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma; 21–25 avgusta 2023 g.; Minsk, Belarus'* [Advanced materials and technologies. Proceedings of the International symposium; 2023 August 21–25; Minsk, Belarus]. Minsk: Information and Computing Centre of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus; 2023. p. 204–206. Russian.
8. Oliver WC, Pharr GM. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*. 1992;7(6):1564–1583. DOI: 10.1557/JMR.1992.1564.
9. Tkachenko EA, Postnikov DV. Calculation of stresses under irradiation of metal alloys. *Omsk Scientific Bulletin*. 2013;123:29–31. Russian.

Получена 28.02.2024 / исправлена 07.03.2024 / принята 07.03.2024.
Received 28.02.2024 / revised 07.03.2024 / accepted 07.03.2024.