

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112>

УДК 621.789



*Оригинальная статья*

**О. М. Мищирук<sup>1\*</sup>, А. И. Веремейчик<sup>1</sup>, О. Г. Девойно<sup>2</sup>, М. В. Нерода<sup>1</sup>, Б. Г. Холодарь<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Брестский государственный технический университет,  
ул. Московская, 267, 224017, Брест, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь*

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА СВОЙСТВА СТАЛИ 40X13**

**Аннотация.** Проведено исследование зависимости характеристик прочности и пластичности, а также микротвердости образцов из коррозионно-стойкой стали 40X13 от режимов лазерной поверхностной закалки волоконным лазером. В зависимости от размеров пятна сканирования и скорости сканирования на противоположных плоскостях образца с габаритными размерами 20 × 200 мм наносились 3–5 дорожек. Проведены испытания образцов на статическое разрушение и исследования микротвердости материала образцов по глубине измененной структуры. Установлено, что разрушение обработанных образцов во всех случаях имело хрупкий характер с невысоким уровнем разрушающих деформаций при напряжениях ниже предела прочности исходного материала. Построенные диаграммы растяжения указывают на незначительное влияние лазерной обработки на величину модуля упругости материала. Исследования твердости материала закаленной лазером дорожки и микротвердости материала по глубине зоны измененной структуры показало их увеличение до 3–4 раз в сравнении с исходными характеристиками. Полученные результаты могут служить базой для исследования взаимосвязи между режимами нагрева лазерным лучом и свойствами материала упроченной зоны.

**Ключевые слова:** лазерная поверхностная закалка, микроструктура, характеристики пластичности, микротвердость, прочностные характеристики, легированная сталь 40X13

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** *Мищирук Ольга Михайловна*\* – старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и инженерной графики, Брестский государственный технический университет. E-mail: purtyupolia@gmail.com; *Веремейчик Андрей Иванович* – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской части, Брестский государственный технический университет. E-mail: vai\_mrtm@bstu.by; *Девойно Олег Георгиевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией плазменных и лазерных технологий, Белорусский национальный технический университет. E-mail: scvdmed@bntu.by; *Нерода Михаил Владимирович* – кандидат технических наук, доцент, первый проректор, Брестский государственный технический университет. E-mail: nerodaMV@mail.ru; *Холодарь Борис Григорьевич* – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской части, Брестский государственный технический университет. E-mail: hbg@list.ru

**Вклад авторов:** *Мищирук Ольга Михайловна* – написание и критический пересмотр текста рукописи, сбор, анализ и обобщение данных литературы, оформление текста рукописи, работа с графическим материалом, проведение испытаний на статическое разрушение, сбор, анализ и систематизация данных, проведение сравнительного анализа результатов исследования и их обобщение, формулировка выводов; *Веремейчик Андрей Иванович* – проведение исследования материала образцов на твердость, сбор, анализ и систематизация данных, редактирование текста рукописи, обсуждение выводов; *Девойно Олег Георгиевич* – обоснование концепции исследования, осуществление лазерной обработки образцов; *Нерода Михаил Владимирович* – формулирование идеи исследования, разработка дизайна экспериментального исследования, редактирование текста рукописи; *Холодарь Борис Григорьевич* – проведение исследований микротвердости образцов, сбор, анализ и систематизация данных, аккумулялирование исследовательских данных, обсуждение выводов.

**Для цитирования:** Влияние режимов лазерной закалки на свойства стали 40X13 / О. М. Мищирук [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 103–112. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112>

*Поступила в редакцию: 13.12.2022*

*Утверждена к печати: 25.05.2023*

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original articleOlga M. Mishchiruk<sup>1\*</sup>, Andrei I. Verameichyk<sup>1</sup>, Oleg G. Devoino<sup>2</sup>, Mihail V. Neroda<sup>1</sup>, Boris G. Kholodar<sup>1</sup><sup>1</sup>Brest State Technical University,

267, Moskovskaya Str., 224017, Brest, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University,

65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus

**INFLUENCE OF LASER HARDENING MODES ON THE PROPERTIES OF 40X13 STEEL**

**Abstract.** We have studied the dependence of the characteristics, strength and plasticity, as well as the microhardness of specimens made of corrosion-resistant steel 40X13 on the modes of laser surface hardening by a fiber laser. Depending on the size of the scanning spot and the scanning speed, 3–5 tracks were applied on opposite planes of the sample with overall dimensions of 20 × 200 mm. Samples were tested for static fracture and the microhardness of the material of the samples was studied in terms of the depth of the changed structure. It was found that the fracture of the treated samples in all cases was of a brittle nature with a low level of destructive deformations at stresses below the tensile strength of the original material. The plotted tension diagrams indicate an insignificant effect of laser processing on the value of the elastic modulus of the material. Studies of the hardness of the material of the laser-hardened track and the microhardness of the material along the depth of the zone of the changed structure showed their increase up to 3–4 times compared with the initial characteristics. The results obtained can serve as a basis for studying the relationship between the modes of heating by a laser beam and the properties of the material of the hardened zone.

**Keywords:** laser surface hardening, fiber laser, plasticity characteristics, microhardness, strength characteristics, alloy steel 40X13

**Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

**Information about authors:** *Olga M. Mishchiruk*\* – Senior Lecturer, Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, Brest State Technical University. E-mail: purtyupolia@gmail.com; *Andrei I. Verameichyk* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher of the Research Unit, Brest State Technical University. E-mail: vai\_mrtm@bstu.by; *Oleg G. Devoino* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of Plasma and Laser Technologies Research Laboratory, Belarusian National Technical University. E-mail: scvmed@bntu.by; *Mikhail V. Neroda* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, First Vice-Rector, Brest State Technical University. E-mail: nerodaMV@mail.ru; *Boris G. Kholodar* – Cand. Sci. (Engineering), Senior, Associate Professor, Senior Researcher of the Research Unit, Brest State Technical University. E-mail: hbg@list.ru

**Contribution of the authors:** *Olga M. Mishchiruk* – writing and critical revision of the text of the manuscript, collection, analysis and generalization of literature data, design of the text of the manuscript, work with graphic material, testing for static destruction, collection, analysis and systematization of data, comparative analysis of research results and their generalization, formulation of conclusions; *Andrei I. Verameichyk* – conducting a study of the material of the samples for hardness, collecting, analyzing and systematizing data, editing the text of the manuscript, discussing the conclusions; *Oleg G. Devoino* – substantiation of the research concept, implementation of laser processing of samples; *Mikhail V. Neroda* – formulation of the idea of the study, development of the design of the experimental study, editing the text of the manuscript; *Boris G. Kholodar* – providing research on the microhardness of samples, collecting, analyzing and systematizing data, accumulating research data, discussing the conclusions.

**For citation:** Mishchiruk O. M., Verameichyk A. I., Devoino O. G., Neroda M. V., Kholodar B. G. Influence of laser hardening modes on the properties of 40X13 steel. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 103–112 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112>

Received: 13.12.2022

Approved for printing: 25.05.2023

**Введение.** В процессе проектирования деталей машин и конструкций значимым этапом является выбор материала изделия, что обуславливается конструктивными, технологическими, эксплуатационными и экономическими требованиями [1]. Наиболее важными параметрами материала, определяющими его прочностные характеристики, считаются модуль упругости, коэффициент Пуассона, пределы прочности и текучести.

В настоящее время сталь применяется в качестве основного конструкционного материала, так как обладает высокими эксплуатационными характеристиками. Достоинством стали является также возможность применения упрочняющих технологий, которые ориентированы на придание повышенных характеристик поверхностному слою детали [2], что достигается при использовании плазменных, электронно-ионных и лазерных воздействий [3, 4].

Лазерные технологии поверхностной обработки в ряде случаев заменяют традиционные методы термической обработки. Это обусловлено преимуществами сфокусированного лазерно-

го излучения: бесконтактностью и локальностью теплового воздействия, минимальной зоной термического влияния, высокими скоростями нагрева и охлаждения, снижением уровня остаточных напряжений, сведением к минимуму коробления, повышением дисперсности структуры [5, 13]. Лазерная закалка может рассматриваться в качестве альтернативы поверхностному упрочнению цементацией и последующей объемной закалке, а также ионно-плазменному азотированию. Технология лазерной закалки сканирующим лучом без оплавления позволяет отказаться от шлифования поверхности после упрочнения [6].

Актуальность проблем, связанных с влиянием режимов лазерной закалки на структуру и свойства различных материалов, подтверждается многочисленными публикациями отечественных и зарубежных ученых [3, 5, 6–17]. Лазерное упрочнение стали AISI 4130 (аналог отечественной стали 25ХМ) для различных параметров лазера исследовано в [8]. Микроструктура обработанной зоны изучалась с помощью оптической эмиссионной сканирующей электронной микроскопии. Микротвердость измерялась в направлениях ширины и глубины. Результаты показали, что твердость и глубина упрочненного слоя увеличивались при уменьшении скорости сканирования и фокусного положения лазера, а также при увеличении длительности импульса. В [9] описаны результаты исследования влияния режимов лазерной закалки на свойства конструкционных сталей 40, 40Х и 38Х2МЮА и показано, что лазерная закалка позволяет значительно повысить твердость, а наивысшие значения твердости соответствуют зоне наиболее дисперсного мартенсита. Найдены математические закономерности влияния скорости перемещения лазерного луча на глубину закаленного слоя в зависимости от марки стали. Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, направленных на повышение с помощью локальной лазерной обработки механической прочности деталей из листового металла, изготовленных из высококачественной конструкционной углеродистой стали, представлены в [11]. Также в [11] изучено влияние лазерной обработки на прочность стальных листовых пластин при изгибе. В [14] показано, что использование излучения оптоволоконного лазера обеспечивает повышение производительности закалки в 3–5 раз по сравнению с применением излучения CO<sub>2</sub>-лазера той же мощности. В [16] для повышения износостойкости стали AISI 1020 (аналог отечественной стали марки 20) применялась лазерная закалка с помощью излучения волоконного лазера с мощностью луча 150 Вт, скоростью сканирования 10 мм/с, диаметром пятна 2 мм и поперечным шагом 0,5 мм, что привело к значительному увеличению твердости поверхностных слоев материала. В [17] приведены результаты исследования влияния лазерной закалки на усталостную стойкость образцов из стали 42CrMo4 (аналог отечественной стали 40ХН2МА) для двух скоростей перемещения лазерного луча по поверхности материала при постоянной энергии луча.

Следует отметить, что в основном исследования ученых заключаются в определении влияния режимов лазерной закалки на износостойкость, а проблеме влияния лазерной обработки на прочностные характеристики и характеристики пластичности материала достаточного внимания не уделяется.

*Цель исследования* – изучение зависимости прочностных характеристик, характеристик пластичности и микротвердости образцов из коррозионно-стойкой стали 40Х13 от режимов лазерной поверхностной закалки излучением волоконного лазера.

**Методика проведения исследований.** Образцы были изготовлены из легированной стали 40Х13 при помощи водной резки. Размеры образцов: толщина – 7 мм, ширина – 20 мм и длина – 200 мм (отклонения от указанных размеров учтены при обработке результатов).

Образцы подвергались лазерной поверхностной обработке излучением волоконного иттербиевого лазера мощностью 1 кВт с объективом для фокусировки лазерного излучения, системой перемещения и сканирующей лазерный луч головкой [6] при пяти различных режимах обработки (табл. 1). Для каждого режима закалки использовалось три образца. На противоположных плоскостях образца с габаритными размерами 20 × 200 мм наносилось 3–5 дорожек (рис. 1, 2). Количество линий в пятне сканирования зависело от размеров лазерного пятна. Частота сканирования составляла  $f = 200$  Гц.

Для определения прочностных характеристик образцы испытывались на статическое растяжение согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» на машине разрывной ИР 5145-500-11 (Российская Федерация).

Таблица 1. Режимы лазерной обработки  
Table 1. Laser processing modes

Пятно сканирования, мм	Количество линий	Скорость сканирования, $V$ мм/мин	Номер образца
$4,0 \times 2,25$	7 линий	500	1а, 1б, 1в
		700	2а, 2б, 2в
		1000	3а, 3б, 3в
$3,0 \times 3,0$	10 линий	700	4а, 4б, 4в
$4,0 \times 2,25$	7 линий		5а, 5б, 5в

Примечание: в графе «Номер образца» 1–5 – номер партии; а, б, в – номер образца в партии.

Испытания материала образцов на твердость осуществлялись с помощью ультразвукового твердомера «Константа ТУ» (Российская Федерация). Для определения микротвердости по глубине дорожки использовались микротвердомер ПМТ-3 и цифровой микротвердомер LM-700AT (LECO Согroгation, США). Визуальные наблюдения структуры материала проведены с помощью цифрового металлографического микроскопа «Альтами МЕТ 3С» (компания «Альтами», Российская Федерация).

**Результаты исследований и их обсуждение.** Испытания образцов на растяжение осуществлялись при нагружении со скоростью 5 мм/мин (рис. 1).

Разрушение необработанных образцов (НО) происходило в пределах расчетной длины с образованием «шейки». Разрушение обработанных образцов было хрупким с небольшими деформациями и без образования «шейки». Все испытанные образцы разрушились по сечениям, перпендикулярным направлению растягивающей нагрузки. Примеры разрушенных образцов и сечений разрушения приведены на рис. 2.

Разрушение обработанных образцов во всех случаях носило хрупкий характер. Излом имел ярко выраженный крупнозернистый рельеф и состоял из множества блестящих граней. Такой характер разрушения можно объяснить возникновением в образце зон измененной структуры исходного материала, которые оказывают влияние на локальное напряженно-деформированное состояние зерен материала в своей окрестности. В большинстве случаев разрушение произошло возле захватов разрывной машины.

По результатам проведенных испытаний были построены зависимости возникающих в образцах напряжений  $\sigma$  от деформаций  $\epsilon$  (рис. 3). Для удобства сравнения графиков выполнено их наложение на графики образцов, которые не подвергались лазерной обработке.

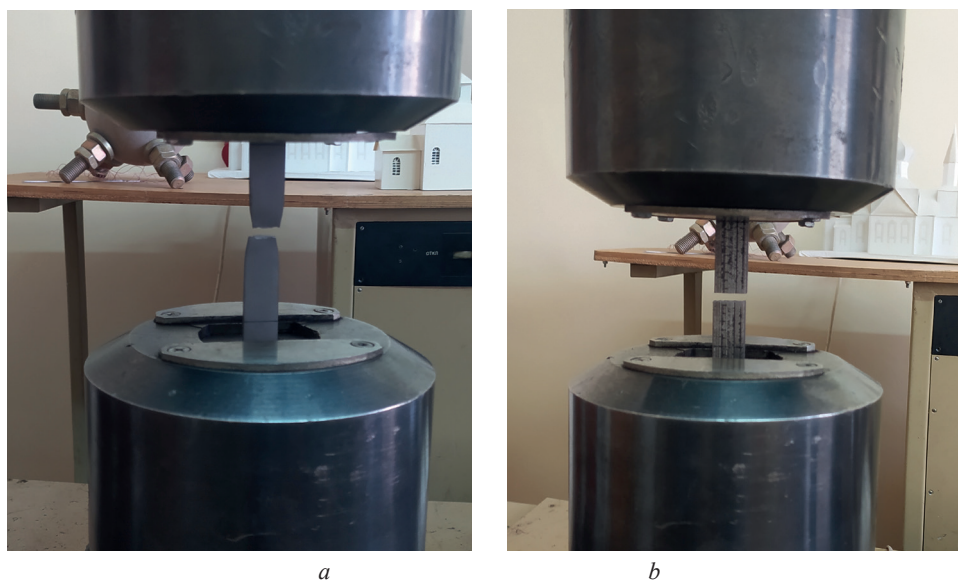


Рис. 1. Испытания образцов материала на растяжение: *a* – необработанный образец; *b* – образец, закаленный лазером  
Fig. 1. Tensile testing of material samples: *a* – untreated sample; *b* – laser-hardened sample



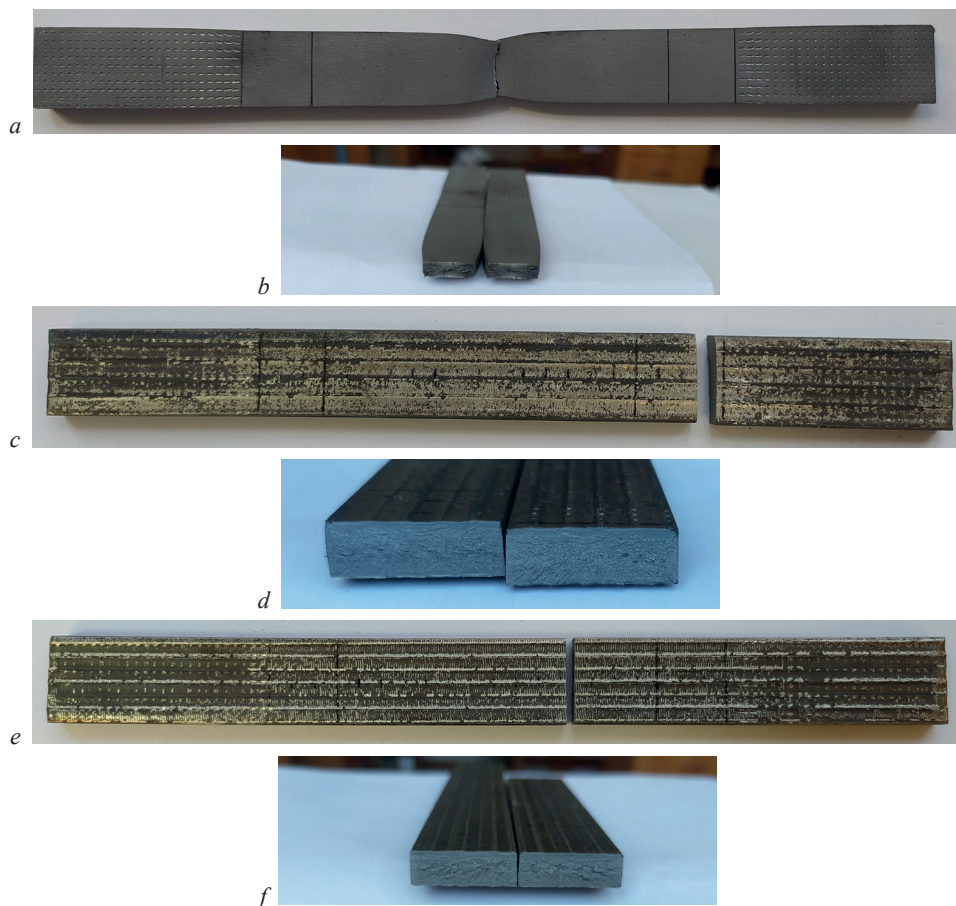


Рис. 2. Разрушенные образцы (*a, c, e*) и сечения разрушения (*b, d, f*): *a, b* – разрушение в пределах расчетной длины образца HO2; *c, d* – разрушение в зоне захватов образца 1a; *f, e* – разрушение в пределах расчетной длины образца 4a  
 Fig. 2. Fractured specimens (*a, c, e*) and fracture cross sections (*b, d, f*): *a, b* – fracture within the design length of the HO2 specimen; *c, d* – destruction in the grip zone of sample 1a; *f, e* – destruction within the estimated length of the sample 4a

Анализ диаграмм растяжения указывает на незначительное влияние лазерной обработки на величину модуля упругости материала. Разрыв всех образцов произошел с невысоким уровнем разрушающих деформаций, не более чем в 2–3 раза превышающих деформацию, соответствующую пределу текучести необработанного материала. Результаты испытаний показывают высокую степень повторяемости полученных зависимостей  $\sigma(\epsilon)$ .

Для каждого образца были определены значения максимального напряжения (табл. 2).

Таблица 2. Некоторые характеристики при испытании плоских образцов  
 Table 2. Some characteristics when testing flat specimens

Пятно сканирования и скорость отработки	Номер партии	Маркировка	Максимальное напряжение, МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %
Необработанные образцы	НО	1	579	21
		2	579	22
		3	579	22
4 × 2,25 мм (7 линий) 500 мм/мин	1	а	595	1
		б	577	1
		в	584	1
4 × 2,25 мм (7 линий) 700 мм/мин	2	а	570	1
		б	525	1
		в	523	2
4 × 2,25 мм (7 линий) 1000 мм/мин	3	а	524	2
		б	557	3
		в	523	3

Окончание табл. 2

Пятно сканирования и скорость обработки	Номер партии	Маркировка	Максимальное напряжение, МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %
3 × 3 мм (10 линий) 700 мм/мин	4	a	562	1
		б	537	—
		в	515	1
4 × 2,25 мм (7 линий) 700 мм/мин	5	a	541	—
		б	487	1
		в	547	1

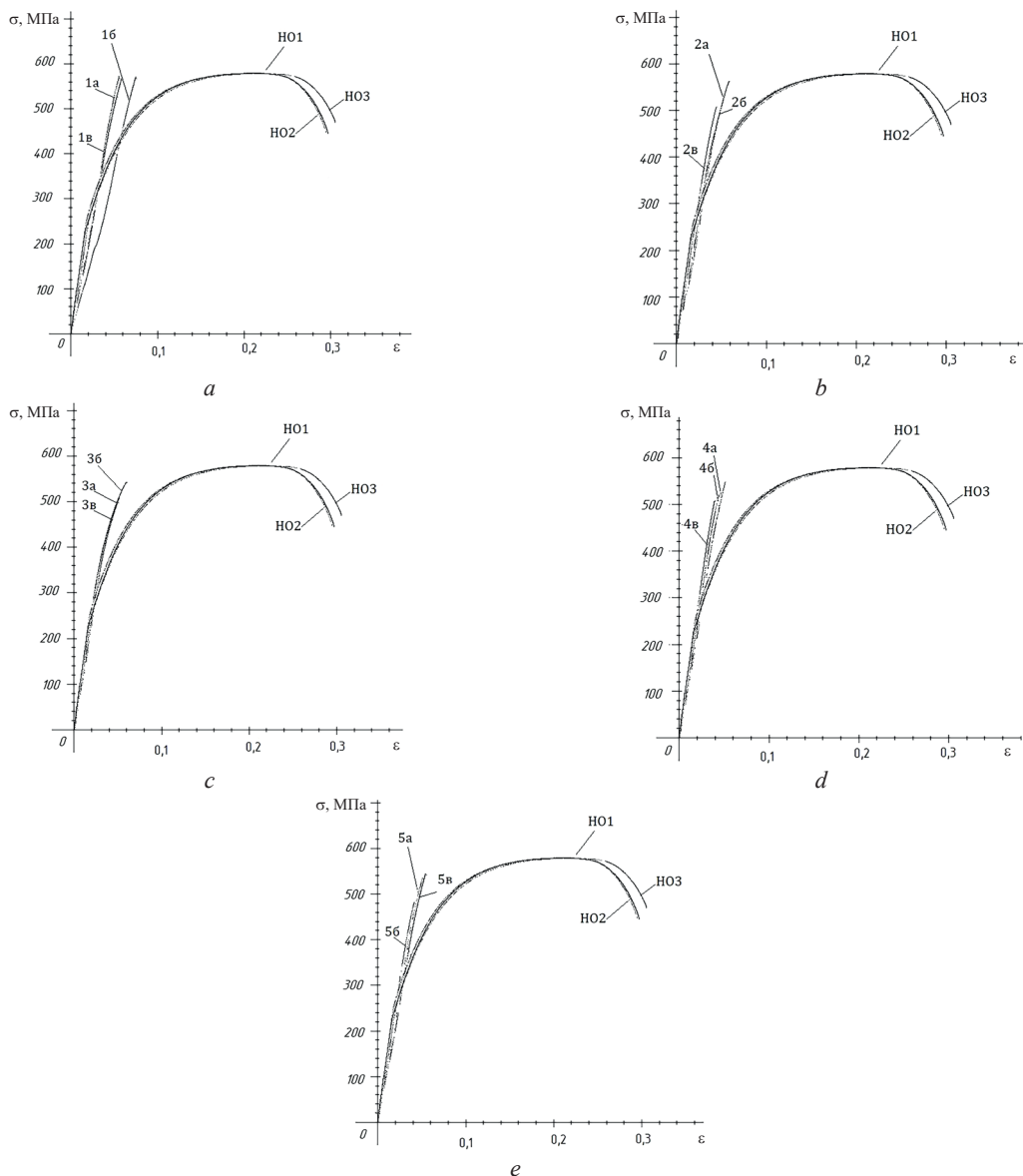


Рис. 3. Зависимость возникающих в образцах напряжений ( $\sigma$ ) от деформаций ( $\epsilon$ ):  
a – партия № 1, b – партия № 2, c – партия № 3, d – партия № 4, e – партия № 5

Fig. 3. Dependence of stresses ( $\sigma$ ) arising in the samples on deformations ( $\epsilon$ ):  
a – batch no. 1, b – batch no. 2, c – batch no. 3, d – batch no. 4, e – batch no. 5

Результаты показывают, что максимальное напряжение для всех подвергнутых обработке образцов, кроме образцов партии № 1, уменьшилось. Следует отметить значительное снижение характеристик пластичности: относительное удлинение закаленных образцов не превышает 2–3 % при аналогичном параметре для исходных образцов 21–22 % на уровне предела прочности материала. Снижение характеристик прочности и пластичности связано со значительным повышением твердости закаленной зоны и наличием микротрещин на ее поверхности.

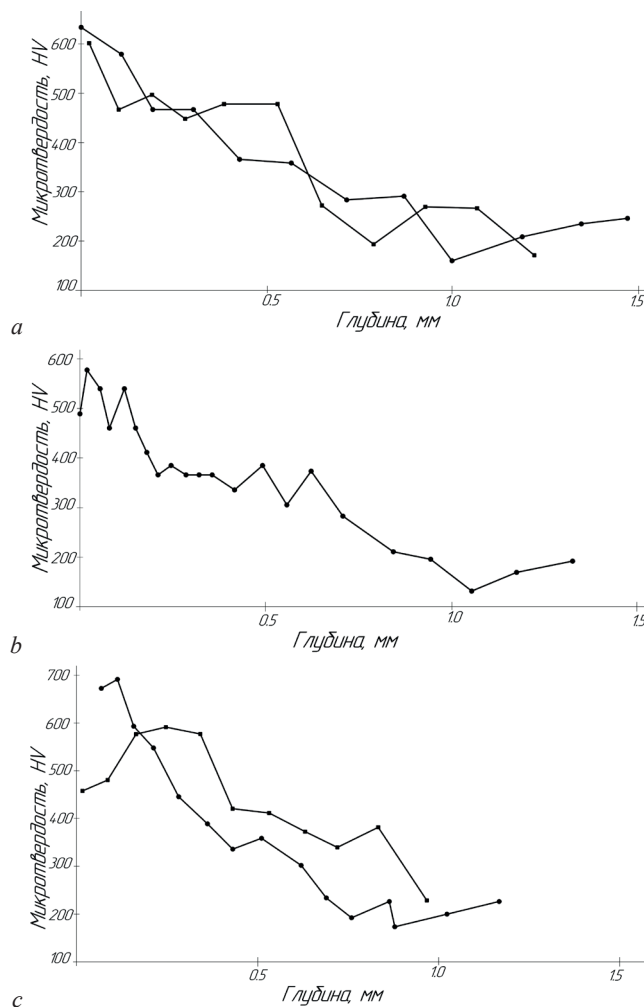


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя при различных скоростях лазерной обработки: *a* –  $V = 500$  мм/мин, *b* –  $V = 700$  мм/мин, *c* –  $V = 1000$  мм/мин

Fig. 4. Distribution of microhardness over the depth of the hardened layer at different laser processing speeds: *a* –  $V = 500$  mm/min, *b* –  $V = 700$  mm/min, *c* –  $V = 1000$  mm/min

Для испытаний материала образцов на твердость с помощью ультразвукового твердомера «Константа ТУ» выбраны участки материала необработанного образца и материала дорожки различных закаленных образцов. Результаты измерений показали, что среднее значение твердости необработанных образцов составляет 16 HRC, для образцов из партии № 1 – 59 HRC, из партии № 2 – 52 HRC, № 3 и № 5 – 54 HRC, № 4 – 56 HRC. Твердость материала дорожки достигла наиболее высокого уровня при закалке с наименьшей скоростью ( $V = 500$  мм/мин).

Также были проведены исследования микротвердости образцов. Определение микротвердости лазерной дорожки на микротвердомере ПМТ-3 осуществлялось для различных режимов термообработки с шагом по глубине 30–50 мкм. Зависимости микротвердости от глубины по некоторым дорожкам приведены на рис. 4.

Результаты измерений показали, что в приповерхностных слоях обработанных образцов микротвердость достигает значений 600–700 HV и далее падает до 170–200 HV на глубине 1,0–1,5 мм.

Микротвердость сердцевины сечения образцов составила 175–184 HV при измерениях на цифровом микротвердомере LM-700AT и 170–230 HV – при измерениях микротвердомером ПМТ-3.

С помощью металлографического микроскопа «Альтами МЕТ 3С» проведены визуальные наблюдения структуры материала поверхности необработанных и закаленных образцов. Исследования показали наличие поверхностных микротрещин в зоне теплового воздействия, ориентированных преимущественно поперек оси симметрии образцов. Трещинообразование вызвано растрескиванием поверхностного слоя образца из-за возникших усадочных напряжений материала (рис. 5–7).

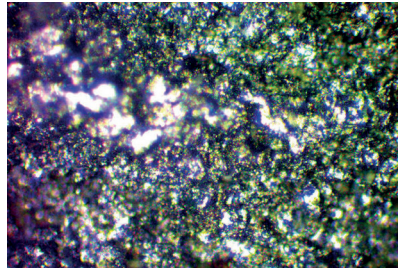
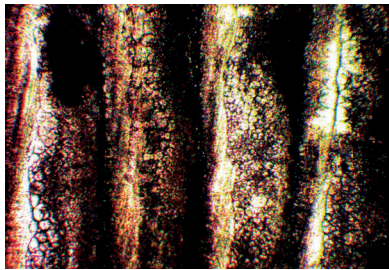
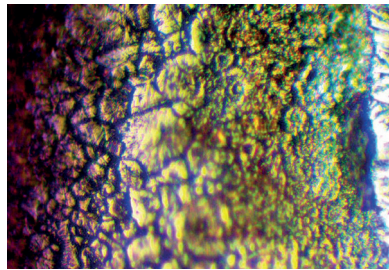
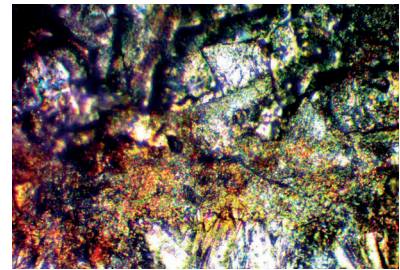
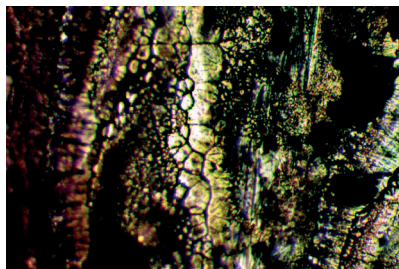
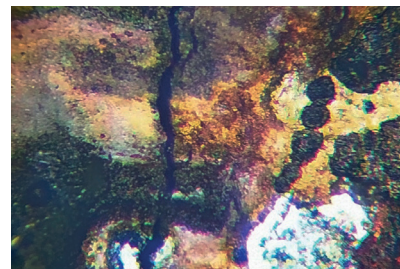


Рис. 5. Структура необработанного образца HO1

Fig. 5. Structure of the untreated HO1 sample

*a**b**c*Рис. 6. Структура образца 1в: *a*, *b* – в закаленной зоне, *c* – между дорожкамиFig. 6. Structure of sample 1b: *a*, *b* – in the hardened zone, *c* – between the tracks*a**b*Рис. 7. Структура материала дорожки образца 5в: *a* – в закаленной зоне, *b* – поперечная трещина в закаленной зонеFig. 7. Structure of the track material of sample 5b: *a* – in the hardened zone, *b* – transverse crack in hardened zone

Высокие скорости и градиенты термического воздействия в зоне обработки вызывают большую неоднородность процессов структурных превращений в термически активированном объеме и, как следствие, развитие дефектности структуры, что приводит к охрупчиванию материала и падению его деформационных свойств.

**Заключение.** Проведены исследования влияния режимов лазерной закалки излучением волоконного иттербиевого лазера мощностью 1 кВт на механические характеристики и структуру образцов из стали 40X13. Результаты испытаний образцов на статическое растяжение указывают на хрупкое разрушение обработанных образцов вследствие образования микротрещин в зоне термообработки. Разрушающие напряжения закаленных образцов уменьшились на 5–20 % со значительным снижением характеристик пластичности. Диаграммы растяжения не показали изменений модуля упругости материала образцов после лазерной обработки по сравнению с исходным материалом.

Установлено, что поверхностная твердость материала увеличивается в зависимости от режимов термической обработки в 3–4 раза (до 52–59 HRC). Микротвердость по глубине образцов изменяется от 600–700 HV в приповерхностной зоне до 170–200 HV на глубине 1,0–1,5 мм при микротвердости сердцевины образцов 175–230 HV.

Результаты могут быть использованы для установления взаимосвязи между режимами нагрева и свойствами материала закаленной зоны.



### Список использованных источников

1. Denesh Babu, P. Laser surface hardening: A review / P. Denesh Babu, K. R. Balasubramanian, G. Buvanashakaran // *Int. J. Sci. Eng.* – 2011. – Vol. 5, № 2/3. – P. 131–151. <http://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2011.041398>
2. Исследование механических и пластических свойств стали марки 10кп с покрытиями, сформированными методом ионно-плазменного азотирования / М. В. Нерода [и др.] // *Вест. Брест. гос. техн. ун-та.* – 2019. – № 4: *Машиностроение.* – С. 2–4.
3. Андрияхин, В. М. Расчет поверхностной закалки железоуглеродистых сплавов с помощью технологических CO<sub>2</sub>-лазеров непрерывного действия / В. М. Андрияхин, В. С. Майоров, В. П. Якунин // *Поверхность: Физика, химия, механика.* – 1983. – № 6. – С. 140–147.
4. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // *Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр.* / Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.
5. Использование лазерных технологий упрочнения в сельскохозяйственном машиностроении / В. С. Голубев [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 кн.* / Гос. науч. учреждение «Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси»; редкол.: А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – Кн. 2: *Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки.* – С. 58–65.
6. Девойно, О. Г. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием поверхностных слоев, формируемых лазерными технологиями [Электронный ресурс] / О. Г. Девойно, И. В. Швец // *Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб.* / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: А. В. Чигарев (пред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 266–270. – Режим доступа: [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/52290/OBESPECHENIE\\_RESURSNYH\\_PARAMETROV\\_OTVETSTVENNYH\\_EHLEMENTOV\\_MEKHANICHESKIH\\_TRANSMISSIJ.pdf?sequence=1](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/52290/OBESPECHENIE_RESURSNYH_PARAMETROV_OTVETSTVENNYH_EHLEMENTOV_MEKHANICHESKIH_TRANSMISSIJ.pdf?sequence=1). – Дата доступа: 21.10.2022.
7. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В. Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
8. Experimental and Numerical Study of AISI 4130 Steel Surface Hardening by Pulsed Nd:YAG Laser / G. Casalino [et al.] // *Materials.* – 2019. – Vol. 12, № 19. – Art. ID 3136. <https://doi.org/10.3390/ma12193136>
9. The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels / A. F. I. Idan [et al.] // *East. Eur. J. Enterp. Technol.* – 2016. – Vol. 2, iss. 5. – P. 69–73. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65455>
10. Gusev, V. Multiple-factor model of hardness of steel 40H13 after laser processing / V. Gusev, V. Morozov, D. Gavrilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – Vol. 896, iss. 1. – Art. ID 012119. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012119>
11. Kapustynskiy, O. Laser Treatment for Strengthening of Thin Sheet Steel / O. Kapustynskiy, N. Visniakov // *Adv. Mater. Sci. Eng.* – 2020. – Article ID 5963012. <https://doi.org/10.1155/2020/5963012>
12. Ерицяня, С. Л. Разработка методики оценки свойств сталей после лазерной поверхностной закалки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07 / С. Л. Ерицяня. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 18 с.
13. Миширук, О. М. Особенности лазерного упрочнения сталей / О. М. Миширук, М. В. Нерода, А. И. Веремейчик // *Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та, Брест, 29–30 сент. 2021 г.* / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест: Изд-во БрГТУ, 2021. – С. 121–124.
14. Девойно, О. Г. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>
15. Веремей, П. В. Компьютерное моделирование процесса лазерной закалки оптоволоконным лазером / П. В. Веремей, О. Г. Девойно, И. П. Филонов // *Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. 8-го Междунар. симп., Минск, 10–12 апр. 2013 г.: в 2 ч.* / гл. ред. П. А. Витязь. – Минск: Беларус. навука, 2013. – Ч. 2. – С. 51–56.
16. Effect of Laser Surface Hardening on the Microstructure, Hardness, Wear Resistance and Softening of a Low Carbon Steel / Peilei Zhang [et al.] // *Lasers in Engineering.* – 2014. – Vol. 28, iss. 3. – P. 135–149.
17. Laser Hardening Parameters Influencing Component Lifetime and Residual Stresses / S. Němeček [et al.] // *Mater. Sci. Forum.* – 2014. – Vol. 782. – P. 306–310. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.782.306>

### References

1. Denesh Babu P., Balasubramanian K. R., Buvanashakaran G. Laser surface hardening: A review. *International Journal of Science and Engineering*, 2011, vol. 5, no. 2/3 pp. 131–151. <http://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2011.041398>
2. Neroda M. V., Onys'ko S. R., Martinovskaya O. V., Dragan A. V., Mishchiruk O. M. Investigation of mechanical and plastic properties of steel grade 10kp with coatings formed by ion-plasma nitriding. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Brest State Technical University*, 2019, no. 4: *Mechanical Engineering*, pp. 2–4 (in Russian).
3. Andriyahin V. M., Maiorov V. S., Yakunin V. P. Calculation of surface hardening of iron-carbon alloys using technological CO<sub>2</sub> lasers of continuous action. *Poverhnost': Fizika, himiya, mekhanika* [Surface: Physics, Chemistry, Mechanics], 1983, no. 6, pp. 140–147 (in Russian).

4. Veremeichik A. I., Sazonov M. I., Hvisevich V. M. Plasma technologies as one of the main technologies for improving the performance properties of metal products. *Mekhanika. Nauchnye issledovaniya i uchebno-metodicheskie razrabotki: mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov* [Mechanics. Scientific Research and Educational and Methodological Developments: International Collection of Scientific Papers]. Gomel, Belarusian State University of Transport, 2008, iss. 2, pp. 6–12 (in Russian).
5. Golubev V. S., Mikhlyuk A. I., Romanchuk I. A., Protskevich L. I. The use of laser technology for hardening of interchangeable parts working bodies of agricultural machinery. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sbornik nauchnykh trudov. Kniga 2: Tekhnologii i oborudovanie mekhanicheskoi i fiziko-tekhnicheskoi obrabotki* [Modern Methods and Technologies of Creation and Processing of Materials: a Collection of Scientific Papers. Book 2: Technologies and Equipment of Mechanical and Physical-Technical Processing]. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 2018, pp. 58–65 (in Russian).
6. Devoino O. G., Shvec I. V. Provision of resource parameters of critical elements of mechanical transmissions using surface layers formed by laser technologies. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection]. Minsk, Belarusian National Technical University, 2019, iss. 34, pp. 266–270. Available at: [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/52290/OBESPECHENIE\\_RESURSNYH\\_PARAMETROV\\_OTVETSTVENNYH\\_EHLEMENTOV\\_MEKHANICHESKIH\\_TRANSMISSIJ.pdf?sequence=1](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/52290/OBESPECHENIE_RESURSNYH_PARAMETROV_OTVETSTVENNYH_EHLEMENTOV_MEKHANICHESKIH_TRANSMISSIJ.pdf?sequence=1) (accessed 21 October 2022) (in Russian).
7. Panchenko V. Ya., Golubev V. S., Vasil'tsov V. V., Galushkin M. G., Dubrov V. D., Evseev A. V., Zharinov A. N., et al. Panchenko V. Ya., ed. *Laser Technologies of Materials Processing: Modern Problems of Fundamental Research and Applied Developments*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 664 p. (in Russian).
8. Casalino G., Moradi M., Moghadam M. K., Khorram A., Perulli P. Experimental and Numerical Study of AISI 4130 Steel Surface Hardening by Pulsed Nd:YAG Laser. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 19, art. ID 3136. <https://doi.org/10.3390/ma12193136>
9. Idan A. F. I., Akimov O., Golovko L., Goncharuk O. The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 2, iss. 5, pp. 69–73. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65455>
10. Gusev V., Morozov V., Gavrilov D. Multiple-factor model of hardness of steel 40H13 after laser processing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 896, iss. 1, art. ID 012119. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012119>
11. Kapustynskiy O., Visniakov N. Laser Treatment for Strengthening of Thin Sheet Steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, art. ID 5963012. <https://doi.org/10.1155/2020/5963012>
12. Ericyan S. L. *Development of a Methodology for Assessing the Properties of Steels after Laser Surface Hardening*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 1999. 18 p. (in Russian).
13. Mishchiruk O. M., Neroda M. V., Veremeichik A. I. Features of laser hardening of steels. *Novye tekhnologii i materialy, avtomatizatsiya proizvodstva: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 55-letiyu Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, Brest, 29–30 sentyabrya 2021 g.* [New Technologies and Materials, Production Automation: Collection of Articles of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 55th Anniversary of the Brest State Technical University, Brest, September 29–30, 2021]. Brest, Brest State Technical University Publ., 2021, pp. 121–124 (in Russian).
14. Devoino O. G., Zarski V. V., Pilipchuk A. P. Simulation of surface hardening using a fiber-optic laser scanning. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 435–443 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>
15. Veremei P. V., Devoino O. G., Filonov I. P. Computer simulation of the laser hardening process by fiber-optic laser. *Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy. Svarka: sbornik dokladov 8-go Mezhdunarodnogo simpoziuma, Minsk, 10–12 aprelya 2013 g. Chast' 2* [Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding: Collection of Reports of the 8<sup>th</sup> International Symposium, Minsk, April 10–12, 2013. Part 2]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013, pp. 51–56 (in Russian).
16. Peilei Zhang, Hua Yan, Peiquan Xu, Yu Z.-S., Li C.-G., Lu Q.-H. Effect of Laser Surface Hardening on the Microstructure, Hardness, Wear Resistance and Softening of a Low Carbon Steel. *Lasers in Engineering*, 2014, vol. 28, iss. 3, pp. 135–149.
17. Němeček S., Míšek M., Černý I., Sís J., Ganev N., Kolařík K. Laser Hardening Parameters Influencing Component Lifetime and Residual Stresses. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 782, pp. 306–310. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.782.306>