

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2026. №4 (178). С. 12-19.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №4 (178). P. 12-19.

Обзорная статья
УДК 621.789
doi: 10.30987/2223-4608-2026-4-12-19

Дилатометрические и денсиметрические изменения при лазерном упрочнении деталей из стали 40X

Игорь Васильевич Беляев¹, д.т.н.

Алексей Валерьевич Жданов², к.т.н.

Александр Борисович Люхтер³, к.т.н.

Тимур Викторович Волчанский⁴, аспирант

Илья Сергеевич Печников⁵, нач. ОЭП НОЦ ВЛТ

Максим Денисович Валгин⁶, зав. ЛФМИ НОЦ ВЛТ

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} *Владимирский государственный университет, Владимир, Россия*

¹ belyaev-iv54@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0786-2889>

² zhav33@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0158-8611>

³ 3699137@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1523-0637>

⁴ tw33@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-9479-0356>

⁵ pechnikov@laser33.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6727-8525>

⁶ valgin@laser33.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5713-7312>

Аннотация. *Исследовали влияние режимов упрочняющей лазерной обработки поверхности деталей из стали 40X на размеры, структуру и свойства этих деталей. Исследования проводили на образцах размерами 10×10×20 мм, вырезанных из массивной заготовки методом электроэрозионной резки. Твёрдость материала вырезанных образцов составляла 42HRC. Геометрические размеры образцов измеряли при помощи электронного высоотомера-рейсмаса Didimar CX2 с точностью до 0,001мм. Измерения проводили до и после лазерной обработки. Лазерную обработку проводили при помощи универсального роботизированного комплекса с лазерным модулем Robot M0710iC/50, оснащённым волоконным иттербиевым лазером ЛС-5 мощностью 5 кВт. Варьировали мощность лазерного излучения и скорость перемещения лазерного луча. Диаметр лазерного пятна во всех случаях оставался постоянным и равнялся 7 мм. Твёрдость материала образцов до и после проведения лазерной обработки измеряли по методу Роквелла при помощи твердомера ТН-301. Микроструктуру образцов исследовали методом оптической металлографии на поперечных травленых шлифах при помощи оптического цифрового микроскопа MET IC. Было установлено, что лазерная обработка приводит к изменению геометрических размеров, объёма и твёрдости материала исследуемых образцов. Изменения эти зависят от плотности энергии лазерного излучения, воздействующего на обрабатываемую поверхность образца. Эта зависимость имеет экстремальный характер. Максимальные значения всех этих изменений наблюдаются при плотности энергии лазерной обработки 32,86 Дж/мм². При дальнейшем увеличении плотности энергии величина этих изменений уменьшается. Причиной изменений геометрических размеров и твёрдости образцов является мартенситное превращение, происходящее в поверхностных слоях стали 40X под воздействием лазерного облучения и сопровождающееся изменением объёма этих поверхностных слоёв материала. Результаты исследования необходимо учитывать в технологии изготовления деталей из стали 40X для точной механики, подвергаемых лазерному упрочнению.*

Ключевые слова: сталь 40X, лазерное упрочнение, геометрические размеры, объём, твёрдость, мартенситное превращение

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ.

Для цитирования: Беляев И.В., Жданов А.В., Люхтер А.Б., Волчанский Т.В., Печников И.С., Валгин М.Д. Дилатометрические и денсиметрические изменения при лазерном упрочнении деталей из стали 40X // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 4 (178). С. 12–19. doi: 10.30987/2223-4608-2026-4-12-19

Dilatometric and densimetric changes occurring under laser hardening of 40Cr steel parts

Igor V. Belyaev¹, D. Eng.

Aleksey V. Zhdanov², PhD. Eng.

Alexandr B. Liukhter³, PhD. Eng.

Timur V. Volchanskiy⁴, PG student

Ilya S. Pechnikov⁵, chief EDP REC LTI

Maxim D. Valgin⁶, head PhTL REC LTI

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Vladimir State University, Vladimir, Russia

¹ belyaev-iv54@yandex.ru

² zhav33@mail.ru

³ 3699137@mail.ru

⁴ twt33@yandex.ru

⁵ pechnikov@laser33.ru

⁶ valgin@laser33.ru

Abstract. The effect of the modes of laser strengthening treatment for 40Cr steel parts surfaces on the dimensions, structure and properties of these parts was investigated. The studies were carried out on samples measuring 10×10×20 mm of a massive steel feed obtained by electroerosion cutting. The hardness of the material of the cut samples was 42HRC. The geometric dimensions of the samples were measured using an electronic didimar CX2 altitude marking gauge with an accuracy of 0,001 mm. The measurements were performed before and after the laser treatment. The laser treatment was performed using a universal robotic complex with a robot M0710iC/50 laser module equipped with an LS-5 fiber ytterbium laser having a rate of 5 kW. The power of the laser radiation and the speed of movement of the laser beam were varied. The diameter of the laser spot remained constant in all cases and was 7 mm. The hardness of the sample material before and after laser treatment was measured using the Rockwell method using a TN-301 hardness tester. The microstructure of the samples was studied by optical metallography on transverse etched sections using a MET 1c optical digital microscope. It was found that laser treatment contributes to changes in geometric dimensions, volume and hardness of the studied samples material. These changes depend on the energy density of the laser radiation acting on the treated surface of the sample. This dependence is extreme. The maximum values of all these changes are observed at a laser treatment energy density of 32,86 J/mm². As the energy density increases further, the magnitude of these changes decreases. The reason for the changes in the geometric dimensions and hardness of the samples is the martensitic transformation that occurs in the surface layers of 40Cr steel under the influence of laser irradiation and is accompanied by a change in the volume of these outer zones in the work material. The results of the study should be taken into account in the manufacturing technology of 40Cr steel parts for precision mechanics subjected to laser strengthening treatment.

Keywords: 40Cr steel, laser strengthening, geometric dimensions, volume, hardness, martensitic transformation

Acknowledgments: This work was completed within the framework of the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, FZUN-2024-0004, a state assignment for VISU.

For citation: Belyaev I.V., Zhdanov A.V., Liukhter A.B., Volchanskiy T.V., Pechnikov I.S., Valgin M.D. Dilatometric and densimetric changes occurring under laser hardening of 40Cr steel parts / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 4 (178). P. 12–19. doi: 10.30987/2223-4608-2026-4-12-19

Введение

Лазерная обработка поверхности деталей с целью упрочнения в настоящее время широко применяется в машиностроении [1 – 9]. В результате такой обработки можно значительно увеличить твёрдость и износостойкость поверхностных слоёв материала детали сохраняя неизменными все механические характеристики его внутренних слоёв. Однако известно, что при этом объём и геометрические размеры детали могут измениться [10, 11]. Это связано с фазовыми превращениями, происходящими в материале детали вследствие воздействия на него интенсивного теплового излучения лазера. Поэтому размерную обработку упрочняемой поверхности детали, которая, как правило, проводится до упрочняющей лазерной обработки, следует проводить с учётом возможного изменения геометрических размеров этой детали. Для этого необходимо знать характер и величину изменений геометрических размеров детали, вызываемых лазерной обработкой. Информация об этом в технической литературе, как правило, отсутствует.

Цель работы – выявить характер и количественные значения изменений геометрических размеров и твёрдости материала образцов из стали 40X после лазерной обработки их поверхности при различной плотности энергии лазерного излучения.

Материал и методы исследования

Материалом исследования являлась сталь 40X по ГОСТ 4543-2016. Химический состав стали 40X в % масс.: С = 0,36...0,44; Cr = 0,8...1,1; Mn = 0,5...0,8; Si = 0,17...0,37; Ni = до 0,3; Cu = до 0,3; S = до 0,035; P = до 0,035; Fe – остальное. Исследования проводили на образцах размерами 10×10×20 мм, вырезанных из массивной заготовки методом электроэрозионной резки. Твёрдость материала образцов составляла 42HRC. Стороны

образцов обозначали буквами, как показано на рис. 1.

Реальные размеры каждого образца измеряли при помощи электронного высотометра-рейсмаса Digimar CX2 (Mahr GmbH, Германия) до и после лазерной обработки с точностью до 0,001 мм = 1 мкм.

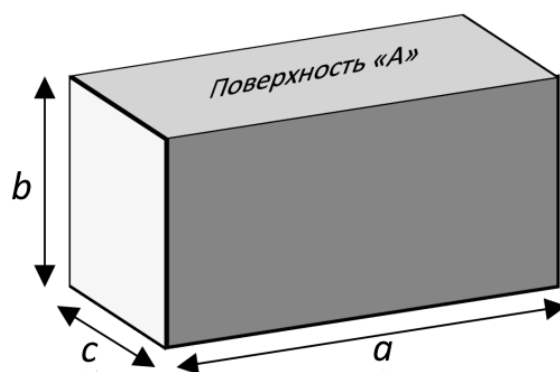


Рис. 1. Форма и размеры исследуемых образцов из стали 40X

Fig. 1. Shape and dimensions of the studied 40Cr steel samples

Лазерную обработку образцов проводили по поверхности А (рис. 1) при помощи универсального роботизированного комплекса с лазерным модулем Robot M0710iC/50 (Fanuc, Япония), оснащённым волоконным иттербиевым лазером ЛС-5 (ИРЭ-Полус, Россия) мощностью 5 кВт. Варьировали мощность лазерного излучения и скорость перемещения лазерного луча. Диаметр лазерного пятна во всех случаях оставался постоянным и равнялся 7 мм. Плотность энергии лазерного излучения обрабатываемой поверхности, ρ , определяли по формуле

$$\rho = \frac{P}{v} \cdot d, \quad (1)$$

где P – мощность лазерного излучения, Вт; v – скорость перемещения лазерного луча, мм/с; d – диаметр лазерного пятна, мм.

Режимы лазерной обработки образцов приведены в табл. 1.

1. Режимы лазерной обработки образцов из стали 40X

1. Modes of laser processing of 40Cr steel samples

Номер образца	Мощность, P , Вт	Скорость, v , мм/с	Диаметр лазерного пятна, d , мм	Плотность энергии, ρ , Дж/мм ²
1	4400	22	7	28,57
2	4400	18		34,92
3	4600	24		27,38
4	4600	22		29,87
5	4600	20		32,86
6	4600	18		36,51

Твёрдость поверхности образцов измеряли по методу Роквелла при помощи твердомера ТН-301 (Time Group Inc., Китай). Микроструктуру образцов исследовали на поперечных травленных шлифах при помощи оптического цифрового микроскопа MET 1С (Альтами, Россия). В качестве травителя использовали 4 %-ный спиртовой раствор азотной кислоты.

Геометрические размеры исследуемых образцов измеряли до и после лазерной обработки. Изменение размеров после лазерной обработки определяли как разность величин размеров образца после лазерной обработки и размеров этого же образца до лазерной обработки. По результатам измерений геометрических размеров расчётным путём определяли объём образца и его изменение после лазерной обработки. Результаты приведены в табл. 2.

2. Результаты измерений геометрических размеров и объёма образцов

2. Results of measurements of geometric dimensions and volume of samples

№ образца	Размер «а», мм		Δa , мкм	Размер «b», мм		Δb , мкм	Размер «с», мм		Δc , мкм	Изменение объёма после Л/О, ΔV , мм ³
	до Л/О «а»	после Л/О «а'»		до Л/О «b»	после Л/О «b'»		до Л/О «с»	после Л/О «с'»		
1	20,047	20,024	-23	9,944	9,95	+6	9,831	9,837	+6	+0,128
2	20,051	20,035	-16	9,958	9,964	+6	9,839	9,842	+3	+0,214
3	20,045	20,046	+1	9,997	9,933	-64	9,837	9,859	+22	-8,141
4	20,057	20,036	-21	9,95	9,957	+7	9,836	9,827	-9	+2,471
5	20,049	20,049	0	9,91	9,999	+89	9,855	9,826	-29	+11,772
6	20,036	20,044	+8	9,949	9,942	-7	9,841	9,841	0	-0,598

Примечание. 1. Знак «+» означает увеличение линейного размера или объёма образца; знак «-» его уменьшение. 2. Численные значения изменения объёма материала образцов после лазерной обработки, определённые расчётным путём, являются завышенными вследствие неравномерности протекания мартенситного превращения, вызывающего эти объёмные изменения.

Из табл. 2 видно, что лазерная обработка даже какой-то одной поверхности (в нашем случае это поверхность А) приводит к изменению всех геометрических размеров образца. Причём может происходить как увеличение, так и уменьшение размеров по разным направлениям (по длине, ширине и высоте образца). Величина и знак этих изменений зависят от

режима лазерной обработки, а именно от плотности энергии лазерного излучения.

По результатам проведённых измерений для наглядности были построены графики зависимости значений Δa , Δb , Δc и ΔV исследуемых образцов от плотности энергии лазерного излучения при лазерной обработке поверхности А этих образцов (рис. 2 и рис. 3).

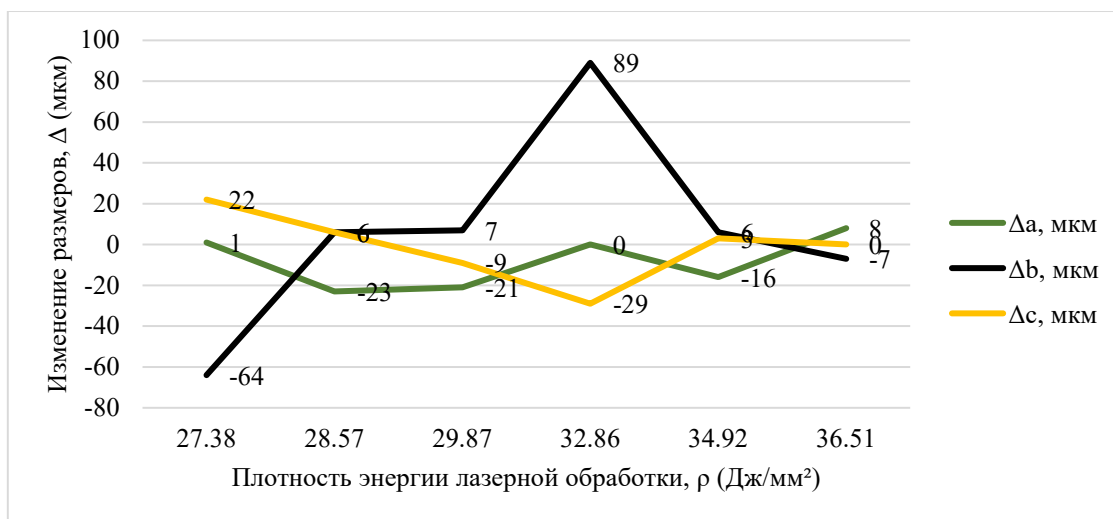


Рис. 2. Значения изменений геометрических размеров образцов в зависимости от плотности энергии лазерного излучения обрабатываемой поверхности

Fig. 2. The values of changes in the geometric dimensions of the samples depending on the energy density of the laser radiation of the treated surface

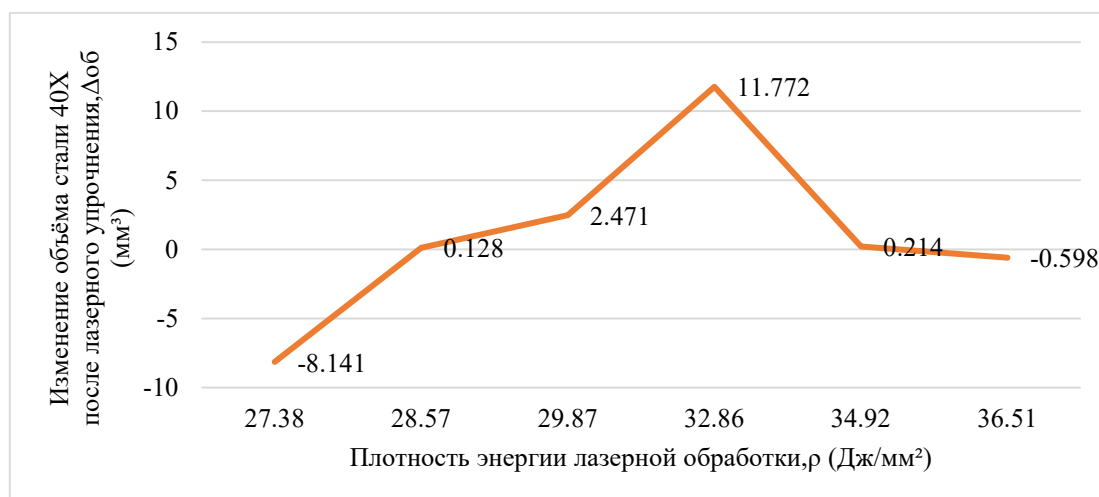


Рис. 3. Изменения объёма образцов из стали 40X в зависимости от плотности энергии лазерного излучения обрабатываемой поверхности

Fig. 3. Volume changes of 40Cr steel samples depending on the energy density of the laser radiation of the treated surface

Как видно из рис. 2 и 3, зависимости изменения линейных размеров и объёма от плотности энергии лазерной обработки имеют

экстремальный характер. Максимальные изменения размеров и объёма образцов происходят при лазерной обработке поверхности с

плотностью лазерного излучения $\rho = 32,86$ Дж/мм². Особенно сильно изменяется размер по высоте образца (размер b). Этот размер увеличивается на 89 мкм. При этом размер по ширине образца (размер c) уменьшается на 29 мкм.

График зависимости твёрдости поверхности образцов из стали 40Х от значения плотности энергии лазерной обработки этой поверхности приведен на рис. 4.

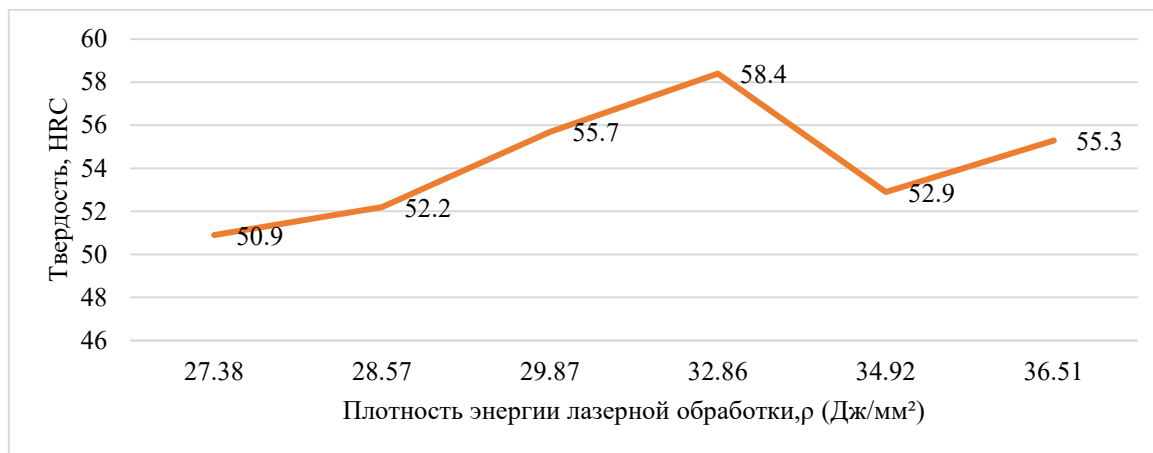


Рис. 4. Изменение твёрдости поверхности образцов из стали 40Х в зависимости от плотности энергии лазерной обработки

Fig. 4. Change in surface hardness of 40Cr steel samples depending on the energy density of laser treatment

Как видно из рис. 4, наибольшее значение твёрдости наблюдается на образце 5, обработанном при плотности лазерной энергии $\rho = 32,86$ Дж/мм². Таким образом характер зависимостей изменения геометрических размеров, объёма и твёрдости от значения плотности лазерной энергии при проведении лазерной обработки поверхности образцов из стали 40Х является одинаковым. Значения экстремумов на графиках этих зависимостей находятся при одном и том же значении плотности лазерной энергии. Это означает, что и изменение геометрических размеров образца, и изменение его объёма и твёрдости связано с протеканием одного и того же процесса в материале обрабатываемого образца. Таким процессом, по-видимому, является мартенситное превращение, которое, как известно, происходит с увеличением объёма материала и сопровождается увеличением его твёрдости [10]. Количество образовавшегося мартенсита определяет значения объёмных изменений в материале образца, а следовательно, и значения изменений геометрических размеров этого образца, а также

значения твёрдости материала обработанной поверхности образца. Чем больше мартенсита образуется в результате лазерной обработки, тем в большей степени увеличится объём материала образца в зоне термического влияния лазерного излучения, тем в большей степени изменятся геометрические размеры образца и тем выше станет твёрдость материала обработанной поверхности образца.

Из рис. 2 – 4 видно также, что увеличение твёрдости, увеличение значений изменения объёма и геометрических размеров образцов происходят лишь до определённой величины нарастания плотности лазерной энергии (до $\rho = 32,86$ Дж/мм²). При дальнейшем её нарастании твёрдость материала, а также значения изменения объёма и геометрических размеров образцов снижаются. Причиной этого может быть уменьшение в структуре материала образца количества образовавшегося мартенсита и увеличение остаточного аустенита. Это предположение подтверждается микроструктурой материала обработанных образцов в зоне термического влияния лазерного излучения (рис. 5).

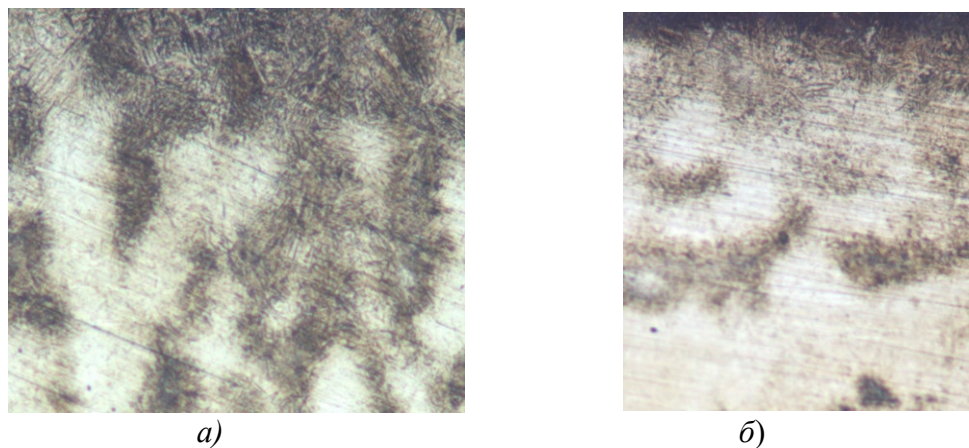


Рис. 5. Микроструктура поверхностного слоя материала исследуемых образцов из стали 40Х после проведения лазерной обработки при плотности энергии $\rho = 32,86$ Дж/мм² (а) и при $\rho = 34,92$ Дж/мм² (б)

Fig. 5. Microstructure of the surface layer of the material of the studied 40Cr steel samples after laser treatment at an energy density of $\rho = 32,86$ J/mm² (a) and at $\rho = 34,92$ J/mm² (b)

Выводы

1. Лазерная упрочняющая обработка детали из стали 40Х приводит к изменению объёма, геометрических размеров этой детали и твёрдости обрабатываемой поверхности.

2. Величина этих изменений зависит от величины плотности энергии лазерного излучения обрабатываемой поверхности детали. Зависимость эта имеет экстремальный характер.

3. Максимальные значения всех этих изменений (изменения объёма, геометрических размеров и твёрдости) наблюдаются при плотности энергии лазерной обработки $\rho = 32,86$ Дж/мм². При дальнейшем увеличении значения ρ величина этих изменений уменьшается.

4. Причиной изменения объёма, геометрических размеров и твёрдости детали из стали 40Х является мартенситное превращение, вызванное лазерной обработкой. Величина этих изменений обуславливается масштабами мартенситного превращения.

5. Изменения, происходящие при лазерной упрочняющей обработке поверхностей деталей из стали 40Х, следует учитывать в технологии изготовления деталей для изделий точной механики, особенно при окончательной размерной обработке этих деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение. 1989. 304с.
2. Григорянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 663с.
3. Тарасова Т.В. Перспективы использования лазерного излучения для повышения износостойкости коррозионностойких сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 6. С. 54–58.
4. Межевов В.С., Петровский В.Н. Обработка материалов с помощью мощных волоконных лазеров // РИТМ, 2008. № 4 (34). С. 49–50.
5. Воробьёв Г.М. Повышение износостойкости стальных поверхностей путём лазерной обработки // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. С. 14–17.
6. Костюк Г.И., Руденко Н.В. Лазерное упрочнение легированных сталей // Технология производства ленточных аппаратов. 2012. С. 23–27.
7. Печников И.С., Завитков А.В., Люхтер А.Б. Лазерное упрочнение рабочей поверхности цилиндра двигателя внутреннего сгорания // Двигателестроение: межотраслевой науч. -техн. и произв. журн. 2024. № 3. С. 21–27.
8. Завитков А.В. Исследование влияния лазерного термоупрочнения на износостойкость контактных поверхностей распределительных валов // Инновации. Технологии. Производство: материалы IX Международный технологический форум. Рыбинск. 2023. № 2 (65). С. 90–96.
9. Локтев А.С., Завитков А.В., Печников И.С., Люхтер А.Б. Исследование влияния лазерного термоупрочнения на показатели упрочненного слоя и

радиальное биеение вала // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 11 (173). С. 24–31. doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-24-31

10. Чудина О.В., Гладова Г.В., Остроух А.В. Теория и практика термической обработки металлов. М.: МАДИ. 2013. 64 с.

REFERENCES

1. Grigoryants A. G. Fundamentals of laser treatment of materials. Moscow: Mechanical engineering. 1989, 304p.

2. Grigoryants A.G. Manufacturing methods of laser treatment. Moscow: Bauman Moscow State Technical University. 2006, 663p.

3. Tarasova T.V. Prospects of using laser radiation to improve wear resistance of corrosion-resistant steels // Metal science and heat treatment of metals. 2010. No. 6. pp. 54–58.

4. Mezhevov V.S., Petrovsky V.N. Processing of materials using high-power fiber lasers // RHYTHM, 2008. No. 4 (34), pp. 49–50.

5. Vorobyeva G.M. Improving the wear resistance of steel surfaces by laser treatment // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2011, pp. 14–17.

6. Kostyuk G.I., Rudenko N.V. Laser hardening alloy steels // Aircraft manufacturing technology. 2012. pp. 23–27.

7. Pechnikov I.S., Zavitkov A.V., Liuchter A.B. Laser strengthening of the working surface of the cylinder of an internal combustion engine // Engine engineering: intersectorial scientific and technical industrial magazine. 2024. No. 3, pp. 21–27.

8. Zavitkov A.V. Study of the effect of laser thermo-hardening on the wear resistance of camshaft contact surfaces // Innovations. Technologies. Production: proceedings of the IX-th International Technological Forum. Rybinsk. 2023. No. 2 (65), pp. 90–96.

9. Loktev A.S., Zavitkov A.V., Pechnikov I. S., Liuchter A. B. Investigation of the effect of laser thermal hardening on the parameters of the hardened layer and radial beam of the shaft // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2025. No. 11 (173), pp. 24–31. doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-24-31

10. Chudina O.V., Gladova G.B. Ostroukh A.V. Theory and practice of heat treatment of metals. Moscow: MADI. 2013, p. 64.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.12.2025; одобрена после рецензирования 27.12.2025; принята к публикации 20.01.2026.

The article was submitted 16.12.2025; approved after reviewing 27.12.2025; assepted for publication 20.01.2026.