

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №11 (173). С.24-31.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №11 (173). P.24-31.

Научная статья
УДК 621.789
doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-24-31

Исследование влияния лазерного термоупрочнения на показатели упрочненного слоя и радиальное биение вала

Александр Сергеевич Локтев¹, аспирант
Алексей Викторович Завитков², ассистент
Илья Сергеевич Печников³, нач. НОЦ ВЛТ
Александр Борисович Люхтер⁴, к.т.н.

^{1, 2, 3, 4}Владимирский государственный университет, Владимир, Россия,
^{1, 2} ООО «ИЦ при ВлГУ», Владимир, Россия

¹ loktev @laser33.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5978-2219>

² vip.zavitkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4323-5398>

³ pechnikov@laser33.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6727-8525>

⁴ 3699137@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1523-0637>

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема повышения поверхностной твердости нежестких ступенчатых валов, широко применяемых в различных отраслях промышленности, посредством лазерного термоупрочнения (ЛТУ). Валы являются важными элементами в различных машинах и механизмах, и увеличение их поверхностной твердости значительно улучшает их эксплуатационные характеристики. Особое внимание уделяется проблеме увеличения радиального биения, возникающего в процессе ЛТУ. Данное негативное явление ограничивает применение технологии ЛТУ в высокоточных узлах и механизмах. Целью представленного исследования является установление зависимости показателей упрочненного поверхностного слоя и радиального биения валов от технологических параметров лазерного термоупрочнения. Изучение этих зависимостей необходимо для определения параметров технологического режима ЛТУ, позволяющих достигать требуемых показателей упрочненного слоя без значительного увеличения радиального биения. В работе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных на образцах-имитаторах из коррозионностойкой жаропрочной стали 14X17H2 и реальных ступенчатых валах из конструкционной легированной стали 40X. Выявлена закономерность увеличения радиального биения при повышении мощности лазерного излучения без изменения скорости обработки. Также установлена зависимость показателей упрочненного слоя от критерия Фурье, характеризующего скорость охлаждения. Представленная взаимосвязь позволяет создать базу для разработки инструментов прогнозирования, позволяющих оценивать влияние параметров технологического режима лазерного термоупрочнения на показатели формируемого упрочненного поверхностного слоя, и управления технологическим процессом ЛТУ. Результаты исследования могут быть использованы при разработке и оптимизации технологий лазерного термоупрочнения нежестких валов и геометрически подобных деталей, применяемых в машиностроении.

Ключевые слова: лазерное термоупрочнение, радиальное биение, ступенчатый вал, сталь 14X17H2, сталь 40X, упрочненный слой, технологические параметры

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

Для цитирования: Локтев А.С., Завитков А.В., Печников И.С., Люхтер А.Б. Исследование влияния лазерного термоупрочнения на показатели упрочненного слоя и радиальное биение вала // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 11 (173). С. 24–31. doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-24-31

Investigation of laser thermal hardening effect on the hardened layer parameters and radial shaft runout

Alexander S. Loktev¹, PhD student

Alexey V. Zavitkov², assistant

Ilya S. Pechnikov³, Head of the Department at the REC LTI

Alexander B. Luchter⁴, PhD Eng.

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

^{1, 2} LLC «IC at the All-Russian State University», Vladimir, Russia

¹ loktev @laser33.ru

² vip.zavitkov@mail.ru

³ pechnikov@laser33.ru

⁴ 3699137@mail.ru

Abstract. The article discusses the current problem of increasing the surface hardness of non-rigid step-shaped shafts, widely used in various industries, by means of laser thermohardening (LThH). Shafts are important parts in various vehicles and machinery, and increasing their surface hardness significantly improves their performance. Special attention is paid to the problem of increasing the radial runout that often occurs during LThH. This negative phenomenon limits the use of LThH technology in high-precision assemblies and machinery. The purpose of the presented study is to find the dependence of the parameters of the hardened surface layer and radial runout of the shafts on the technological parameters of laser thermohardening. The study of these dependencies takes an important part for LThH technological regime characterisation, making it possible to achieve the required parameters of the hardened layer without a significant increase in the radial runout. The paper presents the results of experimental studies conducted on imitation samples made of corrosion-resistant heat-resistant steel 14Cr17Ni2 and real step-shaped shafts made of structural alloy steel 40Cr. A pattern for the radial runout increase with growing laser radiation power under unchanging treatment speed has been revealed. The dependence of the hardened layer parameters on the Fourier criterion, which characterizes its cooling rate has also been proved. The presented relationship makes it possible to create the basis for the development of forecasting tools that allow assessing the impact of the technological regime parameters within laser thermohardening on the hardened surface layer parameters being formed under the treatment together with LThH process flow control. The results of the study can be used in the development and optimization of laser thermohardening technologies for non-rigid shafts and geometrically similar parts used in mechanical engineering.

Keywords: laser thermohardening, radial runout, step-shaped shaft, steel 14Cr17Ni2, steel 40Cr, hardened layer, technological parameters

Acknowledgments: The work was carried out 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 (topic FZUN-2024-0004, state assignment of VISU).

For citation: Loktev A.S., Zavitkov A.V., Pechnikov I.S., Luchter A.B. Investigation of laser thermal hardening effect on the hardened layer parameters and radial shaft runout / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 11 (173). P. 24–31. doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-24-31

Введение

Лазерное термоупрочнение (ЛТУ) представляет собой один из методов повышения твердости поверхностного слоя валов за счет его локального нагрева и последующего быстрого охлаждения [1 – 4].

Несмотря на значительные преимущества [5 – 9], технология ЛТУ сталкивается с

проблемой увеличения радиального биения валов, что обуславливает необходимость проведения исследований по ограничению изменения формы вала при воздействии лазерного излучения. В частности, для валов насосных установок, широко используемых в атомной энергетике, требования к радиальному биению достигают 0,02 мм. Оптимальное значение скорости лазерной обработки металла



Рис. 2. Последовательность обработки шеек ступенчатого вала

Fig. 2. The sequence of the machining for the step-shaped shaft crankpins

В ходе экспериментальных исследований по определению влияния технологического режима на показатели упрочненного слоя образцов-имитаторов из стали 14X17H2 варьировались такие показатели, как: мощность лазерного излучения (P), скорость перемещения детали относительно лазерного излучения (v) и

диаметр пятна лазерного излучения на обрабатываемой поверхности (d_n).

Результаты

Диаграмма (рис. 3) показывает изменение значения максимального радиального биения валов № 1-1, № 1-2 до и после ЛТУ с мощностью лазерного излучения 3900 Вт и 4100 Вт.

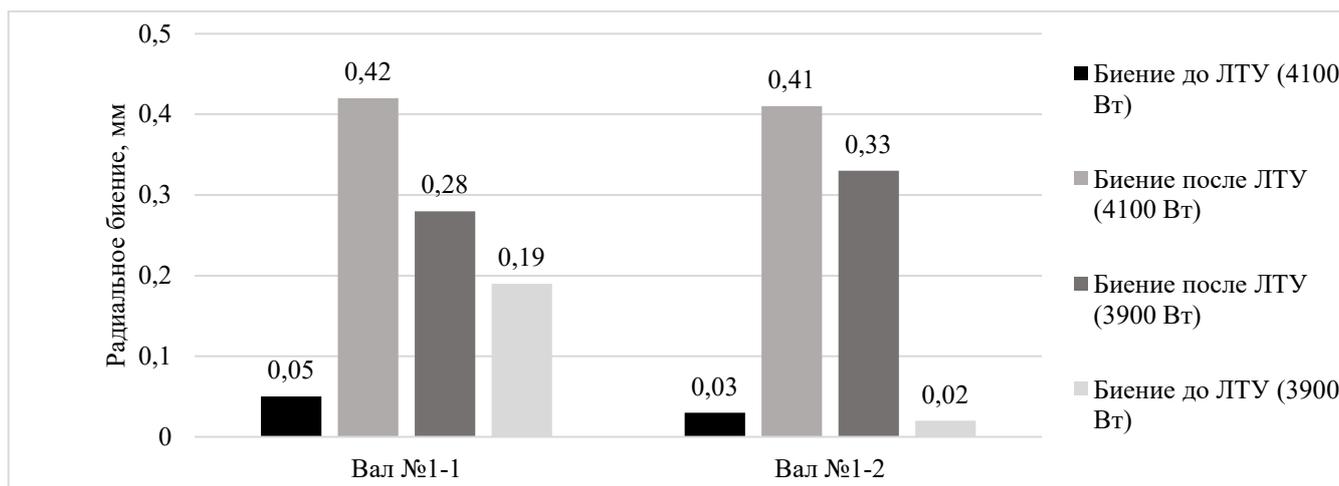


Рис. 3. Диаграмма зависимости максимального радиального биения валов из стали 40X от мощности лазерного излучения

Fig. 3. Diagram of the dependence of the maximum radial runout of 40Cr steel shafts on the laser radiation power.

Результаты измерения микротвердости образцов-имитаторов из стали 14X17H2 после лазерного термоупрочнения на разных технологических режимах представлены в табл. 1.

Для характеристики соотношения между скоростью изменения тепловых условий и скоростью перестройки температурного поля внутри тела использовался критерий Фурье:

$$F_o = \frac{\alpha \cdot \tau}{d_n^2}, \quad (1)$$

где α – коэффициент температуропроводности; d_n – диаметр пятна лазерного излучения; v – относительная скорость движения лазерного луча; τ – время воздействия пятна лазерного луча излучения на поверхность, определяемая по формуле:

$$\tau = \frac{d_n}{v}. \quad (2)$$

1. Экспериментальные режимы ЛТУ стали 14X17H2

1. Experimental modes of LThN steel 14Cr17Ni2

Режимы ЛТУ стали 14X17H2		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фокусное расстояние фокусирующей оптической головки	F , мм	250									
Смещение по нормали фокальной плоскости относительно обрабатываемой поверхности	ΔF , мм	207	207	207	207	67	67	67	67	137	137
Размер пятна лазерного излучения	$d_{п}$, мм	8,1	8,1	8,1	8,1	4,5	4,5	4,5	4,5	6,5	6,5
Режим работы лазера	-	Непрерывный									
Мощность лазерного излучения	P , Вт	500 0	5000	5000	5000	1600	1600	1600	1600	3900	4200
Частота вращения поворотного устройства	n , мин ⁻¹	2,5	3,2	3,8	4,4	3,2	4,4	6,9	5,4	4,1	4,1
Шаг смещения оптической головки	S , мм	6	6	6	6	3	3	3	3	4	5
Скорость перемещения поверхности детали или фокусирующей оптической головки	$v_{п}$, мм/с	17,7	22,1	26,6	31,0	22,1	31,0	48,7	37,6	28,8	28,8
Плотность мощности	q , Вт/м ²	97,1	97,1	97,1	97,1	100,7	100,7	100,7	100,7	117,6	126,6
Критерий Фурье	F_0	0,04 1	0,033	0,027	0,023	0,059	0,042	0,027	0,034	0,031	0,031
Твердость упрочненного слоя на глубине:											
0,2 мм	HRC	48,8	44,7	52,2	35,6	49,9	42	31,8	46,5	44	46
0,4 мм	HRC	47,9	48,8	49,1	37,6	48,3	42,9	37,7	48,5	46	42
0,8 мм	HRC	45,4	44,4	44,4	37,6	35,6	33,8	38,2	37,9	45	47
1,0 мм	HRC	43,3	35,4	39,8	38,5	30,3	32,8	36,7	37,1	28	39

Зависимости твердости и глубины упрочненного слоя стали 14X17H2 от критерия

Фурье при мощностях лазерного излучения 5000 Вт и 1600 Вт представлены на рис. 4 – 6.

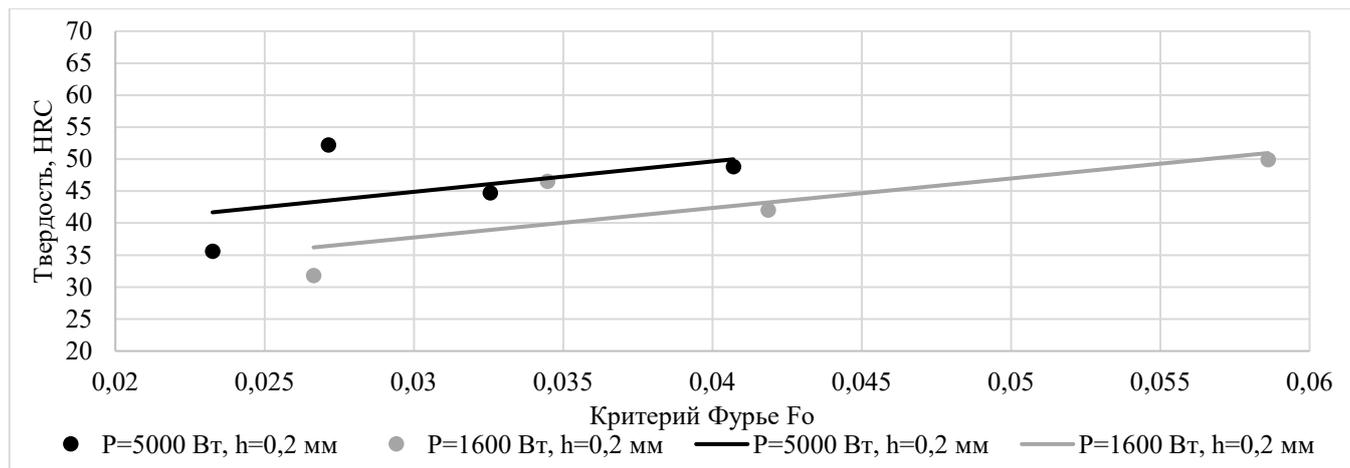


Рис. 4. График зависимости твердости стали 14X17Ni2 после ЛТУ на глубине 0,2 мм от критерия Фурье

Fig. 4. Graph of the dependence of 14Cr17Ni2 steel hardness after LThH at a depth of 0,2 mm on the Fourier criterion

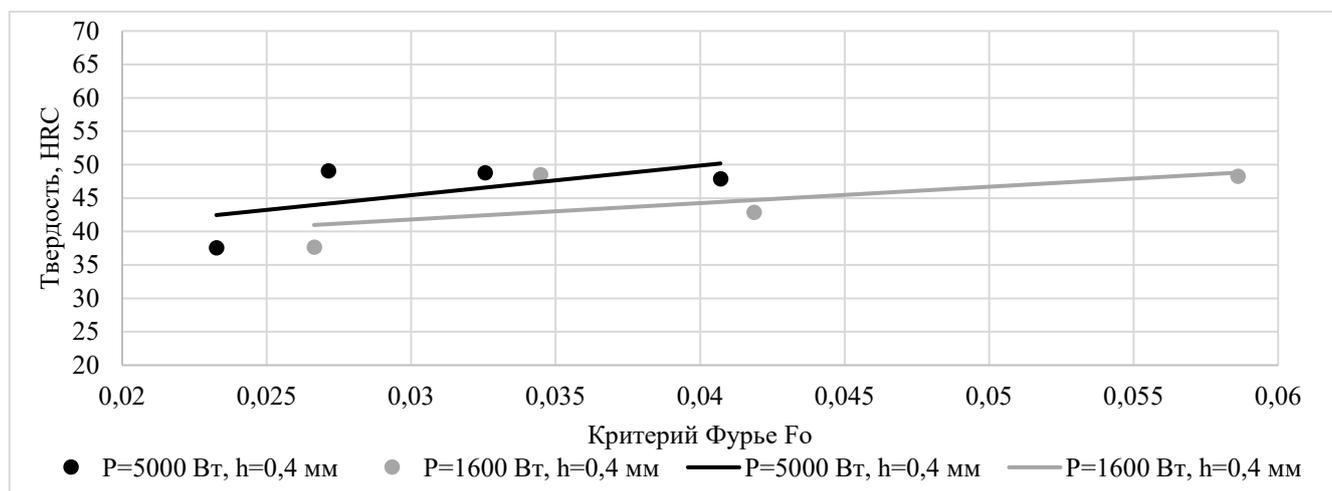


Рис. 5. График зависимости твердости стали 14X17Ni2 после ЛТУ на глубине 0,4 мм от критерия Фурье

Fig. 5. Graph of the dependence of 14Cr17Ni2 steel hardness after LThH at a depth of 0,4 mm on the Fourier criterion

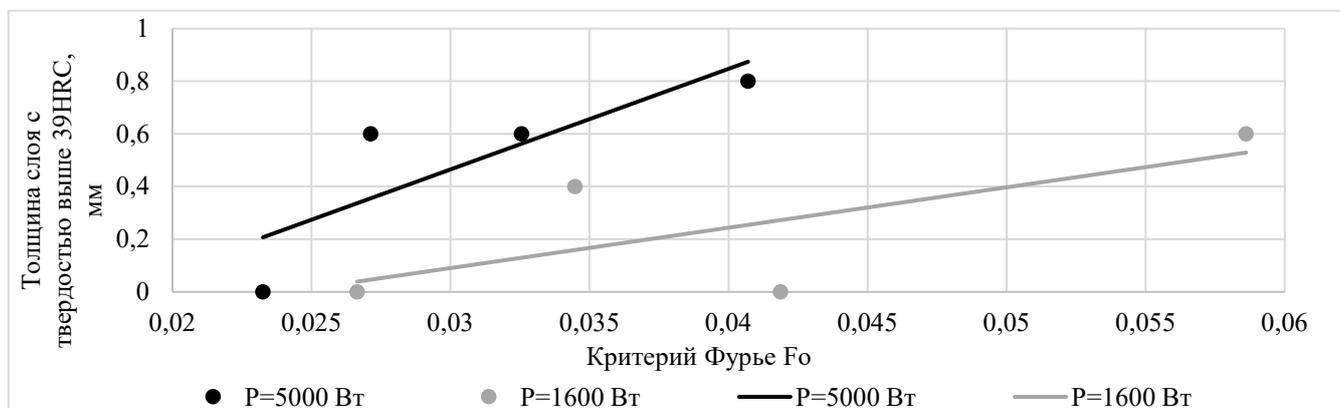


Рис. 6. График зависимости толщины закаленного слоя стали 14X17Ni2 от критерия Фурье

Fig. 6. Graph of the dependence of the thickness of the hardened layer of 14Cr17Ni2 steel on the Fourier criterion

Обсуждение результатов

Экспериментально установлено, что мощность лазерного излучения оказывает влияние на радиальное биение ступенчатых валов при термоупрочнении. Уменьшение мощности лазера приводит к понижению тепловложения в материал и, как следствие, к снижению радиального биения. В частности, уменьшение мощности лазерного излучения от 4,1 до 3,9 кВт сопровождается понижением радиального биения вала в среднем на 26 %.

Однако чрезмерное снижение мощности лазера может привести к недостаточной глубине упрочненного слоя, что подтверждается ранее выполненными исследованиями [4, 11 – 13]

Экспериментальные исследования технологических режимов лазерного термоупрочнения, выполненные на образцах-имитаторах из стали 14X17H2, показывают, что с уменьшением мощности лазерного излучения и критерия Фурье снижаются показатели упрочненного слоя. Кроме того, при критерии Фурье, равном 0,027 и более и мощности ЛИ 5000 Вт наблюдается оплавление поверхности.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований, включавших лазерное термоупрочнение четырех валов из стали 40X, а также образцов из стали 14X17H2, было установлено следующее:

Выявлена тенденция к снижению радиального биения вала при уменьшении мощности лазерного излучения;

Получена взаимосвязь между показателями упрочненного поверхностного слоя, формирующегося в процессе ЛТУ, и критерием Фурье;

Показано, что уменьшение критерия Фурье, характеризующего скорость охлаждения при термообработке, приводит к снижению показателей упрочненного слоя.

Полученные результаты могут служить основой для разработки практических рекомендаций по применению ЛТУ в машиностроении и других отраслях, где важны высокие требования к поверхностной твердости и точности геометрических параметров деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Завитков А.В.** Исследование влияния лазерного термоупрочнения на износостойкость контактных поверхностей распределительных валов // Инновации. Технологии. Производство: Матер. IX Междунар. технологический форум. Рыбинск. 2023. № 2 (65). С. 90–96.

2. **Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И.** Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 664 с.

3. **Ежова Г.П.** Лазерная обработка // Инновационные научные исследования в современном мире: Матер. XII Междунар. науч.-практ. Конф. (Ч. 1). Уфа. 2023. С. 86–90.

4. **Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н.** Методы поверхностной лазерной обработки: учеб. пособие. М.: Директ-Медиа. 2021. 191 с.

5. **Павлов Е.В.** Повышение износостойкости и контактной долговечности коленчатых валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1. С. 28–31.

6. **Фазулянов М.Р., Русинов В.Д., Нигуманова Э.И., Шивоев Р.С.** Методы поверхностного упрочнения деталей машин на примере коленчатого вала // Современная наука и образование: достижения и перспективы развития. Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». 2023. С. 100–111.

7. **Майсурадзе М.В., Рыжков М.А., Корниенко О.Ю., Степанов С.И.** Индукционная и лазерная термическая обработка стальных изделий: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2022. 92 с.

8. **Lach L.** Recent advances in laser surface hardening: Techniques, modeling approaches, and industrial applications // Crystals. 2024. Vol. 14. No. 8. pp. 726. DOI: 10.3390/cryst14080726

9. **Завитков А.В., Печников И.С.** Современные методы восстановления и повышения износостойкости деталей двигателя внутреннего сгорания. Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств // Матер. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. Владимир. 2021. С. 111–115.

10. **Петроченко С.В.** Оценка влияния параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя деталей станков // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 56–65.

11. **Садовский В.Д.** Фазовые и структурные превращения при лазерном нагреве стали. II. Влияние отпуска закаленной стали на процесс перекристаллизации при лазерном нагреве // Физика металлов и металловедение. 1984. Т. 58. № 4. С. 812–817.

12. **Mishchiruk O.M.** Influence of laser hardening modes on the properties of 40X13 steel // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series. 2023. Т. 68. №. 2. С. 103-112. DOI: 10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112

13. **А.В. Королев, А.А. Мазина, А.С. Яковинин, А.В. Шалунов.** Технологические причины возникновения остаточных напряжений // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 5 (8). С. 116–120

REFERENCES

1. **Zavitkov A.V.** Study of the effect of laser thermo-hardening on the wear resistance of camshaft contact surfaces // Innovations. Technologies. Production: Proc. of the IX-th International technology forum. Rybinsk. 2023, no. 2 (65), pp. 90–96.

2. **Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I.** Technological processes of laser treatment: training manual. Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University. 2008. 664 p.

3. **Yezhova G.P.** Laser treatment // Innovative scientific research in the modern world: Proc. of the XII-th International Scientific and Practical Conf. (Part 1). Ufa. 2023. pp. 86–90.

4. **Grigoryants A.G., Safonov A.N.** Methods of surface laser treatment: training manual. Moscow: Direct-Media. 2021. 191 p.

5. **Pavlov E.V.** Increase of wear resistance and contact durability of crankshafts // Proceedings of the Southwestern State University. 2013, no. 1, pp. 28–31.

6. **Fazulzyanov M.R., Rusinov V.D., Nugumanova E.I., Shivoev R.S.** Methods of surface hardening of machine parts using the example of a crankshaft // Modern science and education: achievements and development prospects. Kerch: Kerch State Maritime Technological University. 2023, pp. 100–111.

7. **Maisuradze M.V., Ryzhkov M.A., Kornienko O.Y., Stepanov S.I.** Induction and laser heat treatment of steel products: training manual. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University, 2022. 92 p.

8. **Lach L.** Recent advances in laser surface hardening: Techniques, modeling approaches, and industrial applications // Crystals. 2024, vol. 14, no. 8, pp. 726. DOI: 10.3390/cryst14080726

9. **Zavitkov A.V., Pechnikov I.S.** Modern methods of restoring and increasing the wear resistance of internal combustion engine parts. Current problems of motor vehicles operation // Proc. of the XXIII-th International Scientific and Practical Conference Vladimir. 2021, pp. 111–115.

10. **Petrochenko S.V.** Evaluation of the influence of laser quenching mode parameters on the quality of the surface and surface layer of machine parts // Omsk Scientific Bulletin. 2024, no. 1 (189), pp. 56–65.

11. **Phase** and structural transformations during laser heating of steel. II. The effect of tempering of hardened steel on the recrystallization process under laser heating // Physics of Metals and Metal Science. 1984, vol. 58, no. 4, pp. 812–817.

12. **Mishchiruk O.M.** Influence of laser hardening modes on the properties of 40X13 steel // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series. 2023, vol. 68, no. 2, pp. 103–112. DOI: 10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112

13. **A.V. Korolev, A.A. Mazina, A.S. Yakovishin, A.V. Shalunov.** Technological causes of residual stresses // Modern materials, machinery and technologies. 2016, no. 5 (8), pp. 116–120.

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 05.07.2025; одобрена после рецензирования 27.07.2025; принята к публикации 30.07.2025.

The article was submitted 05.07.2025; approved after reviewing 27.07.2025; asseped for publication 30.07.2025.