

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.891

doi: 10.30987/2782-5957-2026-5-83-90

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ

Владимир Павлович Бирюков^{1✉}, Антон Алексеевич Якубовский², Олег Игоревич Кулаков³, Ярослав Алексеевич Горюнов⁴

^{1,2,3,4} Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

¹ laser-52@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9278-6925>

² anton.at444@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9721-2525>

³ kulakov@imash.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1716-2180>

⁴ yarosgorun22112000@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-1614-0174>

Аннотация

В работе представлены результаты исследований по определению размеров зон термоупрочнения прямоугольным пятном полупроводникового лазера, микротвердости и триботехнических свойств образцов стали 55. Испытания на трение и износ были выполнены при трении скольжении и трении качении. В качестве эталонов были выбраны образцы цементованной стали 18ХГТ. Установлено, что глубина зон лазерной закалки и микротвердость при удельной энергии излучения 9 и 6 Дж/мм² составила 1,53 и 0,97 мм, 9000...11000 и 7000...7600 МПа соответственно. Минимальные

моменты трения при скольжении стального контртела от удельной нагрузки получены для образцов после лазерного термоупрочнения при большей удельной энергии излучения. Глубина треков износа при качении шариков из стали ШХ15 для образцов стали 55 термоупрочненных при большей удельной энергии излучения была в 1,5 раза меньше, чем у цементованных образцов из стали 18ХГТ.

Ключевые слова. лазерная закалка, долговечность, микротвердость, момент трения, глубина, трек, износостойкость.

Финансирование: работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2026-0003.

Ссылка для цитирования:

Бирюков В.П. Влияние режимов лазерной закалки на триботехнические свойства стали / В.П. Бирюков, А.А. Якубовский, О.И. Кулаков, Я.А. Горюнов // Транспортное машиностроение. – 2026. – № 5. – С. 83-90. doi: 10.30987/2782-5957-2026-5-83-90.

Original article

Open Access Article

THE INFLUENCE OF LASER QUENCHING MODES ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF STEEL

Vladimir Pavlovich Biryukov^{1✉}, Anton Alekseevich Yakubovsky², Oleg Igorevich Kulakov³, Yaroslav Alekseevich Goryunov⁴

^{1,2,3,4} Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ laser-52@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9278-6925>

² anton.at444@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9721-2525>

³ kulakov@imash.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1716-2180>

⁴ yarosgorun22112000@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-1614-0174>

Abstract

The paper presents the results of studies on determining the size of heat-hardening zones with a rectangular spot of a semiconductor laser, microhardness and

tribotechnical properties of 55 steel samples. Friction and wear tests were performed for sliding and rolling friction. Samples of 18HGT cemented steel were used

as reference materials. It is found that the depth of the laser quenching zone and the microhardness at specific radiation energies of 9 and 6 joule/mm² is 1.53 and 0.97 mm, 9000-11000 and 7000-7600 MPa, respectively. The minimum moments of friction during sliding of the steel counterbody from the specific load were obtained for samples after laser thermal hardening at a

higher specific radiation energy. The depth of wear tracks during rolling of balls made of SHH15 steel for steel samples 55 thermally-hardened with a higher specific energy of radiation was 1.5 times less than that of cemented samples made of 18HGT steel.

Keywords. laser quenching, durability, microhardness, friction moment, depth, track, wear resistance.

Funding: the paper is funded at the expense of the State Assignment, no. FFGU-2026-0003.

Reference for citing:

Biryukov VP, Yakubovsky AA, Kulakov OI, Goryunov YaA. The influence of laser quenching modes on tribological properties of steel. Transport Engineering. 2026;5:83-90. doi: 10.30987/2782-5957-2026-5-83-90.

Введение

Долговечность работы деталей машин зависит от износостойкости сопрягаемых поверхностей и узлов изделий. Обоснованность выбранного типа лазера и режимов технологического процесса лазерной обработки влияют на результаты закалки и продления ресурса и эксплуатационных свойств деталей [1-2]. Более полное представление о фазовых превращениях [3] удалось получить при моделировании температурных полей и объединении с их металлургическими моделями. Применение металлургических моделей [4] позволило прогнозировать развитие остаточных напряжений и их влияние на эксплуатационные свойства поверхностей, упрочненных лазером. Обработка лучом [5-7] основана на точном контроле энергии, по-

даваемой на поверхность металлических изделий для получения оптимальных свойств в зонах упрочнения. При лазерном упрочнении [8-10] необходим контроль мощности лазера, скорости сканирования, диаметра луча и времени взаимодействия для минимизации таких дефектов, как трещины и высокие остаточные деформации. Выбор лазера [11-12] зависит от типа металла, требуемой глубины упрочнения, формы детали и типа производства.

Из анализа проведенных исследований следует, что недостаточно изученными вопросами являются определения влияния лазерной закалки на триботехнические свойства сталей при трении скольжения и качении и сравнение их с традиционными технологиями.

Материалы и методы исследований.

Экспериментальные работы по лазерному упрочнению были проведены на плоских прямоугольных образцах стали 55 с при использовании оборудования на базе полупроводникового лазера PLD-6 при плотности энергии излучения 9 (режим 1) и 6 Дж/мм² (режим 2) и скорости перемещения луча 5 мм/с, пятном 20×4 мм по широкой стороне образцов. Для проведения сравнительных испытаний в качестве эталона была выбрана цементованная сталь 18ХГТ с твердостью 57...59 HRC.

Для проведения металлографических исследований были использованы цифровой микроскоп, микротвердомер ПМТ-3, с цифровой камерой и программным обеспечением, при нагрузке на алмазную пирамиду Виккерса 0,98 Н, металлографическая система МС-1000. Для определения

параметров зон лазерной закалки при изготовлении шлифов образцы разрезали на отрезном круге с водяным охлаждением перпендикулярно дорожке закалки.

Триботехнические испытания были проведены при трении скольжения по схеме, описанной в [13] и качении на машине трения по схеме (рис. 1), содержащей основание 1, с установленным на нем датчиком усилия прижима 2, с закрепленным на нем столиком 3, с двумя дисками 4 и 5 разделенными между собой стальным шаром 6, и соединенных винтами 7 с размещенными на них пружинами 8. Для охлаждения зоны трения на столике 3 установлен на штифты (на схеме не показаны) теплообменник 9 с подачей и отводом воды через штуцеры 10, с размещенным на нем держателем образцов 11 с фиксацией

его штифтами 12, с крепежными винтами 13 для крепления образца 14. В качестве контробразцов использованы стальные шарики 15 установленные в сепараторе (на схеме не показан) центрируемые верхним кольцом упорного подшипника 16, запрессованным в стальную оправку 17, цилиндрический конец которой закреплен в трех кулачковом патроне 18, жестко закрепленном в шпинделе 19. Датчик момента трения 20, размещен на балке 21, жестко за-

крепленной в кронштейне 22, винтами 23. Кронштейн 22 прикреплен к основанию 1 винтами 24.

В качестве смазочного материала использовали масло 10W-40. Глубину лунки износа определяли по формуле:

$$H = R - R - \sqrt{R^2 - \frac{B^2}{4}} \quad (1)$$

где R – радиус шарика, мм; B – ширина дорожки, мм; H – глубина лунки, мм.

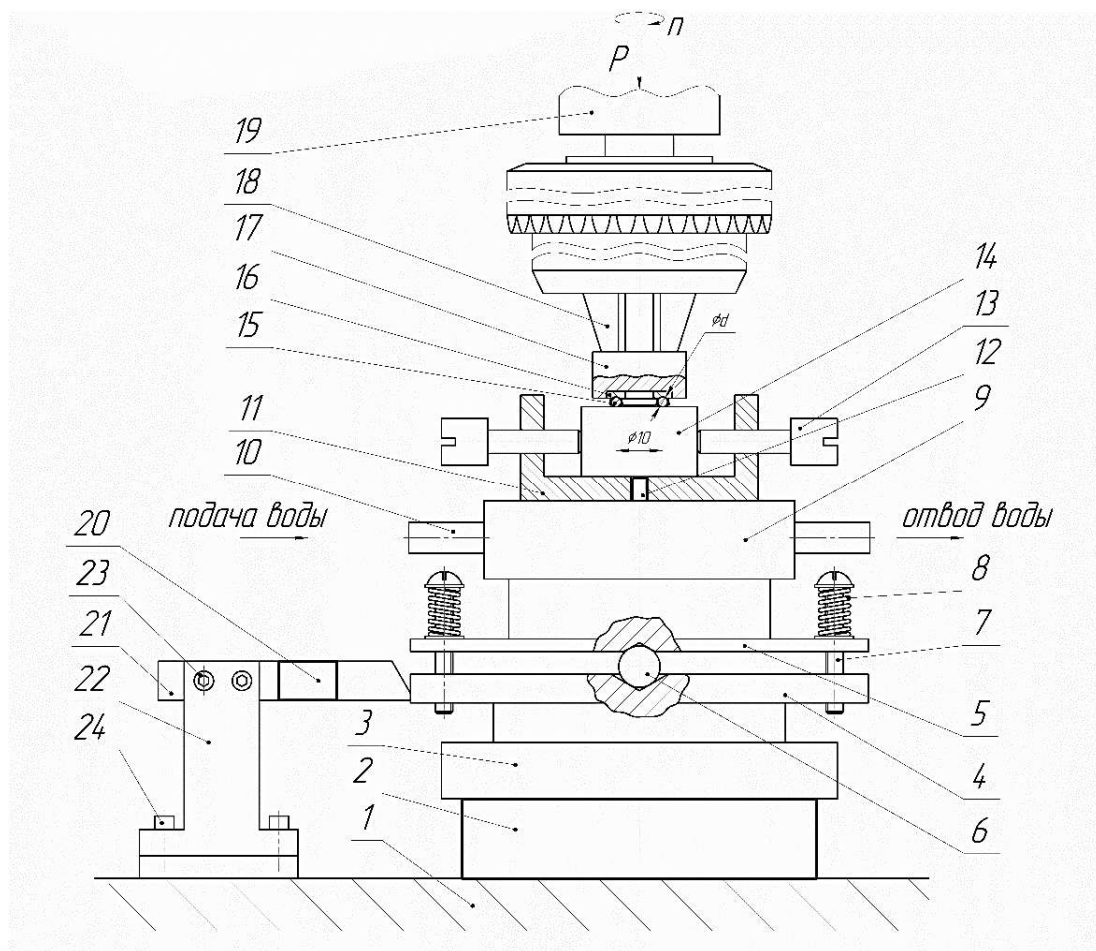
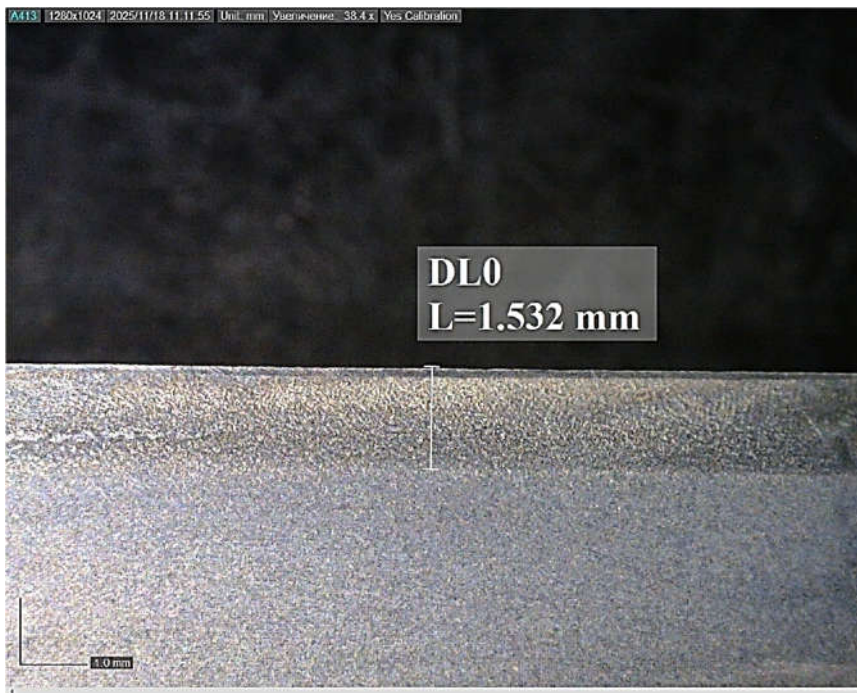


Рис. 1 Схема машины при испытании на трение качения
Fig. 1 Diagram of the machine during the rolling friction test

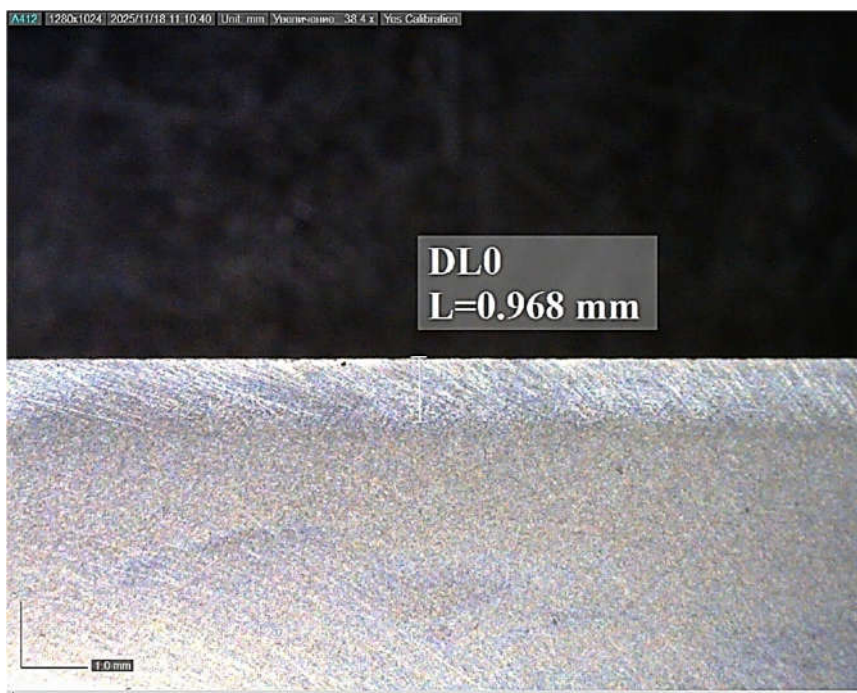
Результаты

По результатам металлографических исследований определены глубина и микротвердость зон лазерной закалки. При удельной энергии излучения лазера 9 и 6 Дж/мм² получена глубина зон упрочнения 1,53 и 0,97 мм соответственно (рис. 2). Следует отметить равномерность глубины зон закалки при обработке на обоих режимах по ширине образцов. Микротвердость

зон лазерной закалки изменялась в достаточно широких пределах и для режимов обработки 9 и 6 Дж/мм² она составила 9000...11000 и 7000...7600 МПа соответственно. Результаты измерения микротвердости (рис. 3) получены при вдавливании четырехгранной алмазной пирамиды с шагом 100 мкм, от поверхности образца вглубь основного материала.



a)

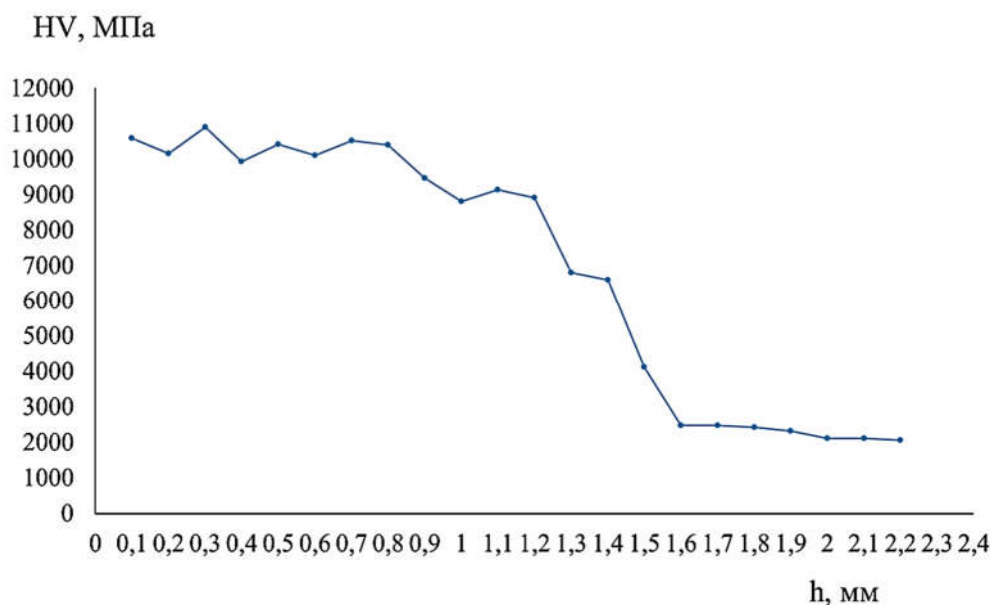


б)

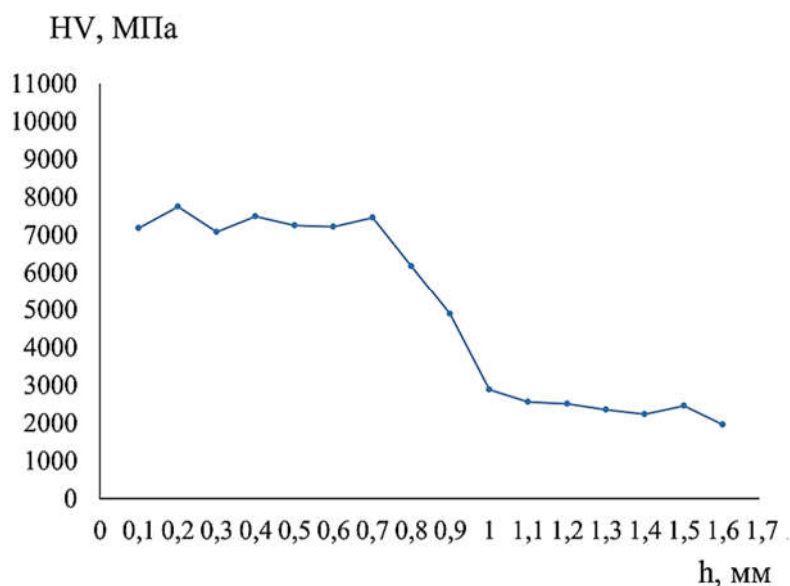
Рис. 2. Микрошлифы зон лазерной закалки стали 55: а – режим 1, б – режим 2
 Fig. 2. Microsections of 55 steel laser quenching zones: a – mode 1, b – mode 2

На рис. 4 представлены закономерности изменения моментов трения при трении скольжении от давления. Наименьшие моменты трения скольжения от удельной нагрузки получены для образцов после лазерного термоупрочнения при

удельной энергии излучения 9 Дж/мм^2 . Максимальные моменты трения установлены для образцов исходной стали 55. Цементованные образцы стали 18ХГТ имели большие моменты трения, чем образцы с лазерной закалкой.



a)



б)

Рис. 3. Показания микротвердости по глубине зоны закалки от поверхности образца вглубь основы с шагом 100 мкм:

а – 9 Дж/мм², б – 6 Дж/мм²

Fig.3. Microhardness indications along the depth of the quenching zone of sample surfaces with 100 microns increments:

a – 9 joule/mm², b – 6 joule/mm²

В таблице представлены результаты определения глубины треков износа при испытании стальными шариками образцов термоупрочненных лазером по двум режимам 9 (1), 6 Дж/мм² (2) и цементованных образцов (3).

Средняя глубина трека при качении стальных шариков для образцов, упроч-

ненных при удельной энергии излучения 9 и 6 Дж/мм² составила 3,63 и 4,941 мкм соответственно, а для цементованных образцов стали 18ХГТ она составила 5,469 мкм, что в 1,5 раза больше, чем при лазерной закалке образцов обработанных при большей удельной энергии излучения.

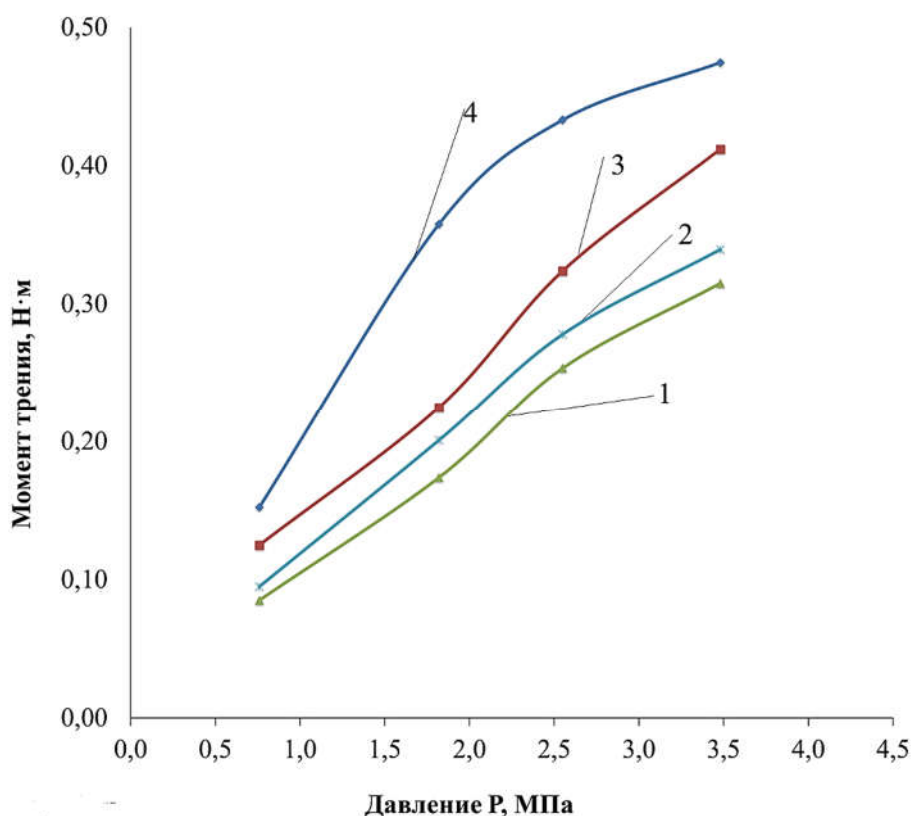


Рис. 4. Изменение моментов трения от давления: 1 – 9 Дж/мм², 2 – 6 Дж/мм², 3 – цементация 18ХГТ, 4 – основа сталь 55
 Fig. 4. Change of friction moments from pressure: 1 – 9 joule/mm², 2 – 6 joule/mm², 3 – 18HGT cementation, 4 – 55 steel base

Таблица

Глубина трека образцов

Table

Depth of sample tracks

№ п/п	№ образца	Глубина трека, мкм	Средняя глубина трека, мкм
1	1.1	3,786	3,630
2	1.2	3,648	
3	1.3	3,456	
4	2.1	5,121	4,491
5	2.2	4,300	
6	2.3	4,053	
7	3.1	5,427	5,459
8	3.2	5,619	
9	3.3	5,332	

Выводы

1. Лазерное термоупрочнение прямоугольным пятном полупроводникового лазера является перспективным технологическим процессом для обработки стали 55.

2. Получена глубина зон лазерной закалки и микротвердость при удельной энергии излучения 9 и 6 Дж/мм² 1,53 и 0,97 мм и 9000...11000 и 7000...7600 МПа соответственно.

3. Минимальные моменты трения при трении скольжении от давления получены для образцов после лазерного термоупрочнения при 9 Дж/мм².

4. Глубина треков при трении качения стальных шариков для образцов стали 55 закаленных лучом лазера при 9 Дж/мм² была в 1,5 раза меньше, чем у цементованных образцов из стали 18ХГТ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Frerichs, F. Process Signature for Laser Hardening. *Metals* / F. Frerichs, Y. Lu, T. Lübben, T. Radel // *Metals*, 2021, vol. 11, no. 8, p. 465. doi.org/10.3390/met11030465.
2. He, P. Process Parameters Analysis of Laser Phase Transformation Hardening on the Raceway Surface of Shield Main Bearing / P. He, Y. Ding, S. Jiang, H. Zhang, T. Shen, Y. Wang // *Photonics*, 2023, vol. 10, p. 287. doi.org/10.3390/photonics10030287.
3. Hadhri, M. Hardness Profile Prediction for a 4340 Steel Spline Shaft Heat Treated by Laser Using a 3D Modeling and Experimental Validation / M. Hadhri, A. El Ouafi, N. Barka // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2016, vol. 4, pp. 9–19. doi.org/10.4236/msce.2016.44002
4. Kiefer, D. Experimental and simulative studies on residual stress formation for laser-beam surface hardening / D. Kiefer, P. Schüssler, F. Mühl, J. Gibmeier // *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, 2019, vol. 74, pp. 23–35.
5. Dongre, G. Laser surface hardening of SS316L / G. Dongre, A. Rajurkar, R. Gondil, N. Jaju // *IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering*, 2021, vol.1070, p. 012107. doi:10.1088/1757-899X/1070/1/012107.
6. Ovsik, M. The thermal energy influence on the surface layer of construction steels during laser beam cutting / M. Ovsik, M. Stanek, L. Hylova, M. Manas, P. Stoklasek // *Manufacturing Technology*, 2019, vol. 19, no.1, pp.123–128.
7. Taha, J.M. Effect of laser surface treatment on the some of mechanical properties of AISI 4130 steel // *Engineering & Technology Journal*, 2017, vol. 35, pp. 85–90. doi.org/10.30684/etj.35.2B.1.
8. Zhang, H. Numerical simulation and experimental study on laser hardening process of the 42CrMo4 steel / H. Zhang, M. Zhu, S. Ji, J. Zhang, H. Fan // *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, vol. 13, no. 9, pp. 1–9. doi.org/10.1177/16878140211044649.
9. Barka, N. Effects of Laser Hardening Process Parameters on Case Depth of 4340 Steel Cylindrical Specimen—A Statistical Analysis / N. Barka, A. El Ouafi // *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2015, vol. 5, no.3, pp. 124–135. doi.org/10.4236/jsemat.2015.53014.
10. Wagh, S.V. Experimental investigation and effects of laser hardening process parameters on micro-hardness of En24 Steel / S.V. Wagh, D.V. Bhatt, J.V. Menghani, S.S. Pardeshi, B.B. Deshmukh // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 814, p. 012003. doi.org/10.1088/1757-899X/814/1/012003
11. Mandolfino, C. Comparing the adhesion strength of 316L stainless steel joints after laser surface texturing by CO₂ and fiber lasers / C. Mandolfino, M. Obeidi, E. Lertora, D. Brabazon // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 109, pp.1059–1069. doi.org/10.1007/s00170-020-05639-6.
12. Fayyadh, S.K. Enhancement of Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Cast Iron Alloy Using CO₂ Laser Surface Treatment / S.K. Fayyadh, E.A.K. Al-Khwarizmi, A.S. Alwan // *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, vol. 11, no.1, pp.185–198.
13. Евсеев Д.Г. Технологические методы увеличения долговечности колес пассажирского железнодорожного вагона / Д.Г. Евсеев, В.П. Бирюков, Ю.М. Куликов, А.А. Якубовский // *Транспортное машиностроение*, 2024. № 3. (27). С. 41–48. doi.org/10.30987/2782-5957-2024-3-41-48.

REFERENCES

1. Frerichs F, Lübben YuL, Radel T. Process Signature for Laser Hardening. *Metals*. 2021;11(8):465. doi.org/10.3390/met11030465.
2. He P, Ding Y, Jiang S, Zhang H, Shen T, Wang Y. Process Parameters Analysis of Laser Phase Transformation Hardening on the Raceway Surface of Shield Main Bearing. *Photonics*. 2023;10:287. doi.org/10.3390/photonics10030287.
3. Hadhri M, El Ouafi A, Barka N. Hardness Profile Prediction for a 4340 Steel Spline Shaft Heat Treated by Laser Using a 3D Modeling and Experimental Validation. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2016;4:9–19. doi.org/10.4236/msce.2016.44002
4. Kiefer D, Schüssler P, Mühl F, Gibmeier J. Experimental and simulative studies on residual stress formation for laser-beam surface hardening. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*. 2019;74:23–35.
5. Kiefer D, Schüssler P, Mühl F, Gibmeier J. Laser surface hardening of SS316L. *IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering*. 2021;1070:012107. doi:10.1088/1757-899X/1070/1/012107.
6. Ovsik M, Stanek M, Hylova L, Manas M, Stoklasek P. The thermal energy influence on the surface layer of construction steels during laser beam cutting. *Manufacturing Technology*. 2019;19(1):123–128.
7. Taha JM. Effect of laser surface treatment on the some of mechanical properties of AISI 4130 steel. *Engineering and Technology Journal*. 2017;35:85–90. doi.org/10.30684/etj.35.2B.1.
8. Zhang H, Zhu M, Ji S, Zhang J, Fan H. Numerical simulation and experimental study on laser hardening process of the 42CrMo4 steel. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021;13(9):1–9. doi.org/10.1177/16878140211044649.
9. Barka N, El Ouafi A. Effects of Laser Hardening Process Parameters on Case Depth of 4340 Steel Cylindrical Specimen—A Statistical Analysis.

- Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology. 2015;5(3):124–135. doi.org/10.4236/jsemat.2015.53014.
10. Wagh SV, Bhatt DV, Menghani JV, Pardeshi SS, Deshmukh BB. Experimental investigation and effects of laser hardening process parameters on microhardness of En24 Steel. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;814:012003. doi.org/10.1088/1757-899X/814/1/012003
 11. Mandolino C, Obeidi M, Lertora E, Brabazon D. Comparing the adhesion strength of 316L stainless steel joints after laser surface texturing by CO₂ and

- fiber lasers. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020;109:1059–1069. doi.org/10.1007/s00170-020-05639-6.
12. Fayyadh SK, Al-Khwarizmi EAK, Alwan AS. Enhancement of Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Cast Iron Alloy Using CO₂ Laser Surface Treatment. Journal of Mechanical Engineering. 2022;11(1):185–198.
 13. Evseev DG, Biryukov VP, Kulikov MYu, Yakubovsky AA. Technologies for increasing the durability of passenger car wheels. Transport Engineering. 2024;3(27):41-48. doi.org/10.30987/2782-5957-2024-3-41-48.

Информация об авторах:

Бирюков Владимир Павлович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), тел. +7(903)776-02-81.

Якубовский Антон Алексеевич – младший научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Российская Федерация, аспирант Российского университета транспорта (МИИТ); тел.

Biryukov Vladimir Pavlovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, phone: +7(903)776-02-81.

Yakubovsky Anton Alekseevich – Junior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Postgraduate student at the Russian University of Transport (MIIT); phone:

+7(953)972-42-35.

Кулаков Олег Игоревич – научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), тел. +7(925) 135-31-11.

Горюнов Ярослав Алексеевич – младший научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), аспирант Российского университета транспорта (МИИТ); тел.+7 (977) 754-02-70.

+7(953)972-42-35.

Kulakov Oleg Igorevich – Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, phone: +7(925) 135-31-11.

Goryunov Yaroslav Alekseevich – Junior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Postgraduate student at the Russian University of Transport (MIIT); phone: +7 (977) 754-02-70.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 10.02.2026; одобрена после рецензирования 06.04.2026; принята к публикации 27.04.2026. Рецензент – Петраков О.В., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 10.02.2026; approved after review on 06.04.2026; accepted for publication on 27.04.2026. The reviewer is Petrakov O.V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University.