

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.891

doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-12-19

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШПИНТОНА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ

Владимир Павлович Бирюков<sup>1✉</sup>, Антон Алексеевич Якубовский<sup>2</sup>, Олег Игоревич Кулаков<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

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

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

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

### Аннотация

Представленная работа посвящена определению размеров зон лазерного термоупрочнения, микротвердости и определению износостойкости образцов стали 25 упрочненной дефокусированным и осциллирующим лучом. Приводятся результаты триботехнических испытаний на модернизированной машине трения возвратно-поступательного движения, оснащенной цифровой обработкой сигналов с тензодатчиков в среде LabView. Установлено, что при обработке расфокусированным и колеблющимся лучом площадь закалки образцов со-

ставляла 25 и 50 % от номинальной поверхности при равном шаге дорожек закалки, что свидетельствует о повышении производительности процесса в 2 раза при равных режимах упрочнения. Износостойкость образцов после закалки дефокусированным и осциллирующим лучом повысилась в 2,93 и 2,18 раза по сравнению с исходной сталью.

**Ключевые слова:** лазерная закалка, дорожки, упрочнение, микротвердость, коэффициент трения, интенсивность, изнашивание, износостойкость.

Ссылка для цитирования:

Бирюков В.П. Повышение износостойкости шпинтона при лазерной закалке / В.П. Бирюков, А.А. Якубовский, О.И. Кулаков // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 3. – С. 12-19. doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-12-19.

Original article

Open Access Article

## INCREASING WEAR RESISTANCE OF TAIL BY LASER HARDENING

Vladimir Pavlovich Biryukov<sup>1✉</sup>, Anton Alekseevich Yakubovsky<sup>2</sup>, Oleg Igorevich Kulakov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

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

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

### Abstract

The presented paper is devoted to determining the sizes of laser thermal hardening zones, microhardness, and wear resistance of steel 25 samples reinforced with a defocused and oscillating beam. The results of tribotechnical tests on an upgraded reciprocating friction machine equipped with digital signal processing from strain sensor in LabVIEW are presented. It is found out that when treated with a defocused and oscillating beam, the hardening area of the samples was 25 and

50% of the nominal surface with an equal step of the quenching tracks, which indicates an increase in process productivity twice under equal hardening conditions. The wear resistance of the samples after quenching with a defocused and oscillating beam increased by 2.93 and 2.18 times compared with the initial value.

**Keywords:** laser hardening, tracks, hardening, microhardness, friction factor, intensity, wear, wear resistance.

Reference for citing:

Biryukov VP, Yakubovsky AA, Kulakov OI. Increasing wear resistance of tail by laser hardening. Transport Engineering. 2025;3:12-19. doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-12-19.

## Введение

Износ шпинтона в механизме гасителя колебаний при рессорном подвешивании тележек приводит к значительным колебаниям вагонов при движении пассажирских поездов. В современном мире многие производители стремятся к увеличению срока эксплуатации деталей. Для этого используется множество способов, одним из которых является лазерная закалка, она повышает твердость, износостойкость и долговечность изделий. Лазерная закалка [1] поверхности – это процесс, основанный на точном контроле энергии, подаваемой на поверхность металла, для изменения микроструктуры и улучшения механических свойств. Лазерное упрочнение было применено для обработки втулок цилиндра дизеля [2], железнодорожных колес [3], зубчатых колес. После лазерной закалки микроструктура

## Цель работы

Оценка размеров зон лазерного термоупрочнения, микротвердости и интенсивности изнашивания образцов стали 25 (шпинтон) и контрообразцов из стали 45

## Материалы и методы исследований

Эксперименты по лазерному упрочнению были выполнены на плоских прямоугольных образцах стали 25. Удельная плотность мощности лазерного излучения изменялась в пределах 22-53 Вт·с/мм<sup>2</sup>. Дорожки лазерной закалки наносили перпендикулярно длинной стороне образца дефокусированным и осциллирующим лучом по нормали к вектору подачи с частотой 220 Гц. Шаг нанесения дорожек закалки был равен 9 мм.

Металлографический анализ были проведен с применением цифрового микроскопа, микротвердомера ПМТ-3, с цифровой камерой, при нагрузке на алмазную пирамиду Виккерса 0,98 Н. Для определения характеристик зон лазерной закалки были изготовлены шлифы с использованием отрезного и шлифовально-полировального оборудования.

Триботехнические испытания были проведены на модернизированной машине трения возвратно-поступательного движе-

стали состояла из остаточного аустенита и мелкодисперсного игольчатого мартенсита и получена более высокая микротвердость [4, 5]. В работах [6-9] был снижен износ образцов за счет увеличения твердости. В работах [10, 11] при лазерном упрочнении получено снижение коэффициента трения. Лазерное упрочнение сталей [12] *AISI 4340*, *AISI 5140* позволило повысить их коррозионную стойкость. При лазерном упрочнении зубчатых колес [13] повышена усталостная прочность.

Анализ проведенных исследований показал, что недостаточное внимание уделено стали 25 для изготовления шпинтонов и трибологическим испытаниям на малогабаритных образцах при возвратно-поступательном движении в присутствии смазочного материала.

(втулка шпинтона), применяемых в механизмах гасителя колебаний при рессорном подвешивании тележек вагонов.

ния МТВ-М. Для измерения сил трения на машине был установлен тензометрический датчик специального исполнения, выполненный по мостовой схеме. Питание моста датчика и предварительная обработка сигнала были осуществлены нормирующим усилителем Тензо-М НУ-010ДС. Усиленный сигнал поступал на вход 14-битного АЦП устройства сбора данных *National Instruments USB6009*. Регистрация сигнала, его визуализация в процессе испытания и сохранение полученных данных было выполнено в среде *LabView*. На рис. 1. представлена схема машины трения МТВ-М. Машина трения состоит из основания 1, с размещенными на нем четырьмя вертикальными стойками 2, скрепленными в верхней части плитой 3, корпуса редуктора 4 с электродвигателем 5 переменного тока, соединенного шатуном 6 с ползуном 7 опирающимся на плиту 8 с бронзовыми подпятниками 9. Контрообразец 10 из закаленной стали 45 устанавливается в ложе-

мент 11 жестко закрепленный на ползуне 7 и закрепляется винтом 12. Образец 13 из стали 25 устанавливается в ложемент 14 жестко закрепленный в оправке 15 и крепится винтом 16. Усилие прижима образца производится винтом 17 через динамометр 18 с установленными на нем шариками 19 находящимися в контакте с винтом 16 и опорой 20. Для установления минимального зазора между левой и правой поперечными планками 21 в правой планке установлен винт 22 с контргайкой 23. Тензодатчик (на схеме не показан) установлен по центру левой планки 21. Машина трения приводилась в движение от электродвигателя 5, момент трения через редуктор передавался на шатун 6, который приводил в движение ползун с контрообразцом 10.

Ход ползуна 7 составлял 2,5 мм. Для смазки образцов была использована графитная смазка, которая используется в механизме гасителя колебаний. Контрообразец был выполнен из стали 45 с размерами 12×20×80 мм с нанесенными канавками шириной 1 мм с шагом 5 мм для улучшения смазки пары трения и закален до твердости 48-51 HRC.

Интенсивность изнашивания  $J$  определяли по формуле [14]:

$$J = \Delta h / L, \quad (1)$$

где  $\Delta h$  - величина линейного износа [15], мкм;  $L$  - путь трения, мкм.

$$L = Int, \quad (2)$$

где  $I$  - длина двойного хода, мкм;  $n$  - число циклов в минуту;  $t$  - время, мин.

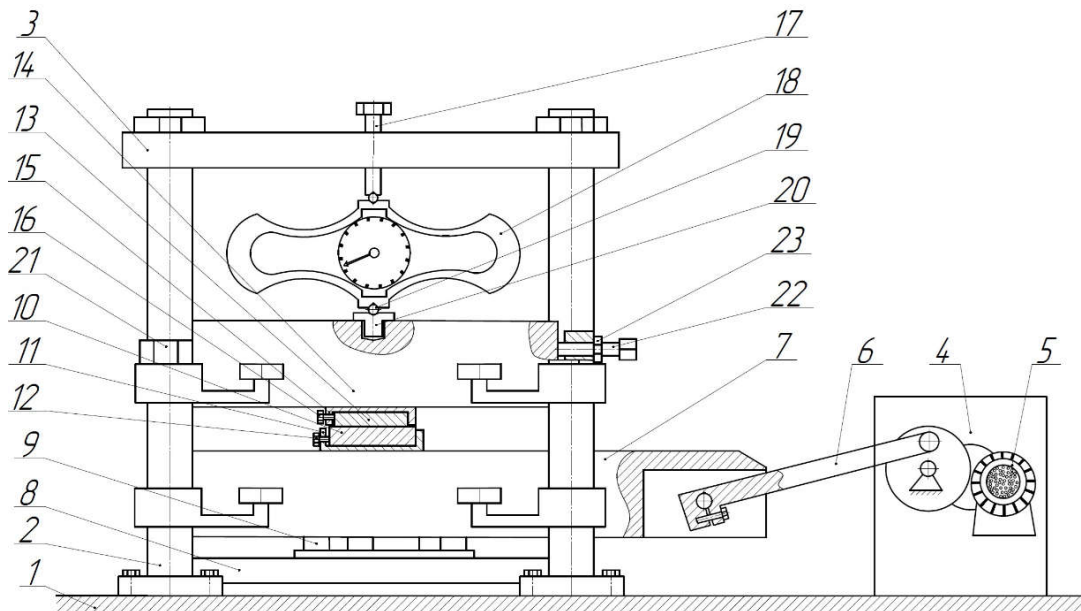


Рис. 1. Схема машины трения возвратно-поступательного движения  
Fig. 1. Diagram of the reciprocating friction machine

## Результаты

На рис. 2 представлены макрошлифы стали 25 обработанные дефокусированным (рис. 2а) и осциллирующим лучом (рис. 2б). Лазерные дорожки закалки получены при минимальной мощности и максимальной скорости обработки. Наибольшая глубина и ширина дорожек при закалке расфокусированным и колеблющимся лучом составляла 0,963 мм, 0,958 мм и 3,642 мм и 5,697 мм соответственно были получены при максимальной мощности и минималь-

ной скорости обработки. Увеличение ширины зон закалки связано с тем, что при обработке поверхности образца круглым лучом время воздействия в центре пятна максимально, а по краям пятна стремится к нулю и часть энергии по краям пятна расходуется на нагрев ниже температуры закалки. Поэтому ширина дорожки значительно меньше диаметра луча. При поперечных колебаниях с частотой 220 Гц эта

потерянная энергия участвует в нагреве дорожки закалки.

Микротвердость дорожек лазерного термоупрочнения изменялась в значительных пределах и в зависимости от режимов обработки и составляла 4260-5980 МПа. Твердость термоупрочненных дорожек, полученных с применением осциллирующего

луча, превосходила твердость зон закалки дефокусированным лучом на 600-820 МПа. Изменения значений микротвердости, полученных при вдавливании алмазной пирамиды с шагом 100 мкм, в глубину от края шлифа с измерениями 3-4 точек основного материала представлены на рис. 3.

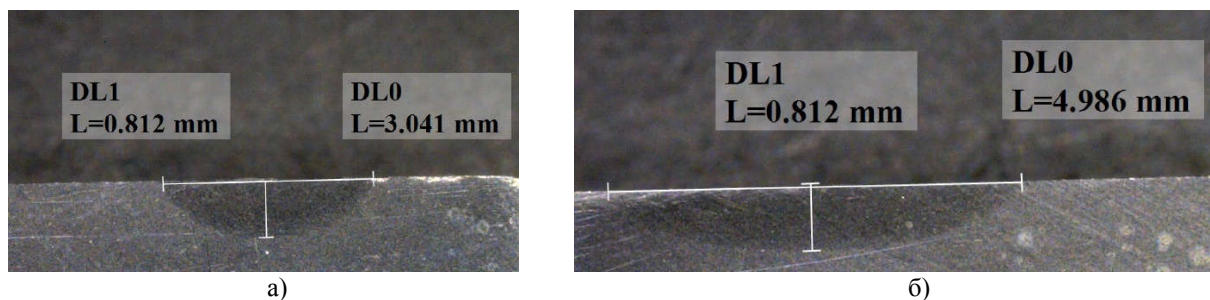
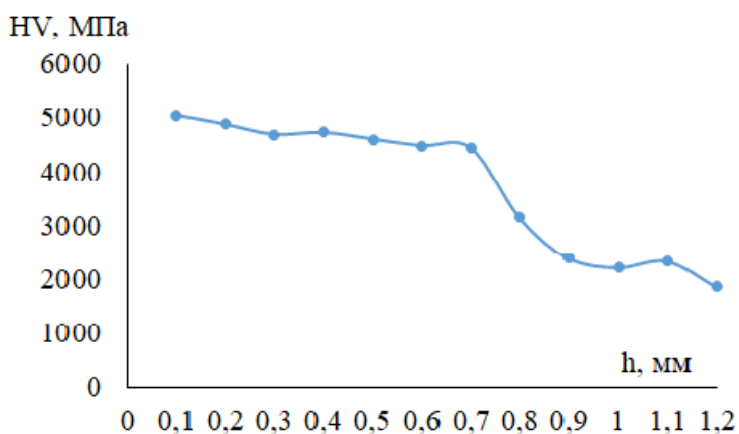
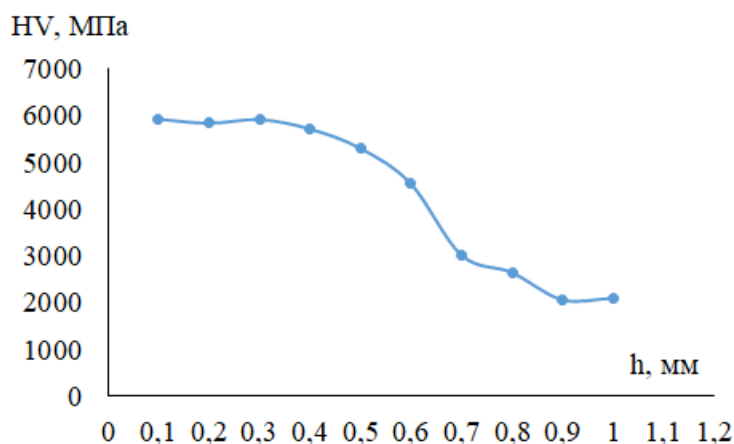


Рис. 2. Макрошлифы зон лазерной закалки стали 25: а – дефокусированный луч, б – осциллирующий луч  
 Fig. 2. Macrosections of 25 steel laser quenching zones: a – defocused beam, b – oscillating beam



а)

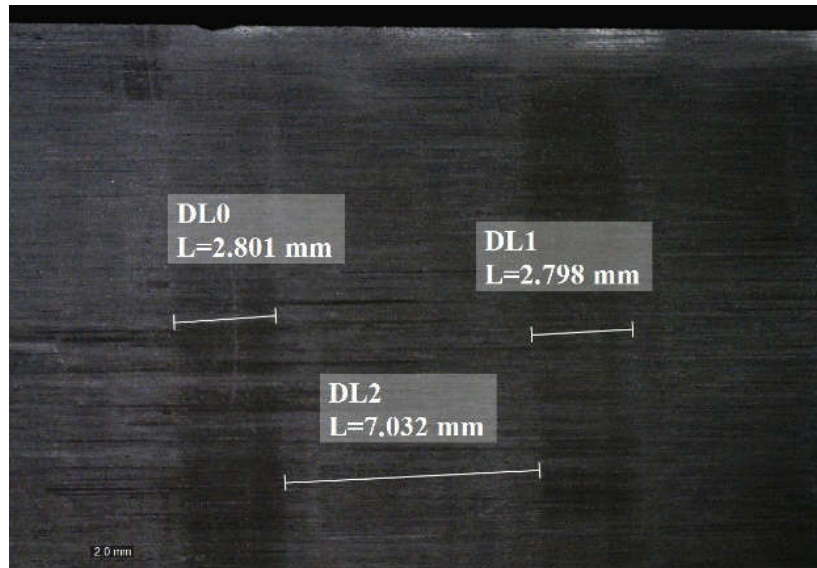


б)

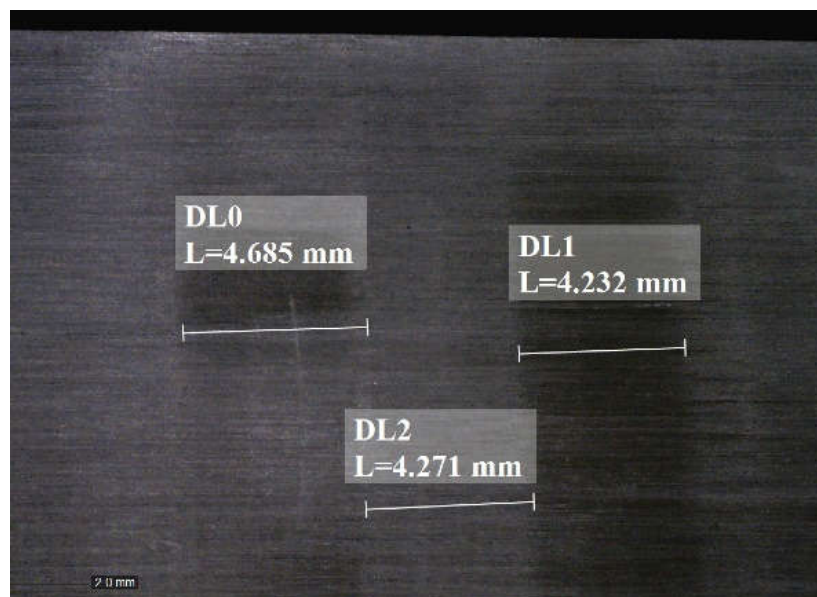
Рис. 3. Значения микротвердости от глубины слоя при лазерной закалке стали 25: а – дефокусированным лучом, б – осциллирующим лучом  
 Fig. 3. Microhardness values from the layer depth during laser hardening of steel 25: a – with a defocused beam, b – with an oscillating beam

Морфология поверхности трения представлена на фрагментах образцов (рис. 4). Ширина зон и площадь упрочнения дефокусированным и осциллирующим лучом имели различную величину. Так обработка дефокусированным лучом имела ширину дорожки 1,5...1,6 раза меньше,

чем осциллирующим лучом, и площадь закалки была в 2 раза ниже при упрочнении дефокусированным пучком. На поверхности трения образцов видны продольные риски в направлении скольжения и основным механизмом изнашивания было абразивное изнашивание.



а)



б)

Рис. 4. Морфология поверхностей трения образцов стали 25 с лазерной закалкой:  
а – дефокусированным лучом, б – осциллирующим лучом

Fig. 4. Morphology of friction surfaces of samples of steel 25 with laser hardening:  
a – defocused beam, b – oscillating beam

В таблице показаны результаты испытаний на интенсивность изнашивания образцов на машине трения МТВ-М.

Анализ проведенных испытаний показал, что износостойкость образцов, об-

работанных колеблющимся лучом № 2.1, 2.2, 2.3 и расфокусированным лучом № 3.1, 3.2, 3.3 в 2,93 и 2,18 раза выше, чем образцов стали 25 в исходном состоянии № 1.1, 1.2, 1.3.

## Интенсивности изнашивания образцов

Table

*Wear intensity of samples*

№ опыта	Интенсивность изнашивания образца	Среднее значение	Интенсивность изнашивания контрообразца	Среднее значение
	$I_1 \cdot 10^{-9}$	$I_{1cp} \cdot 10^{-9}$	$I_2 \cdot 10^{-9}$	$I_{2cp} \cdot 10^{-8}$
1.1	1,412	1,542	0,954	0,939
1.2	1,624		0,967	
1.3	1,547		0,897	
2.1	0,561	0,526	0,874	0,801
2.2	0,496		0,746	
2.3	0,523		0,783	
3.1	0,671	0,707	0,905	0,870
3.2	0,695		0,865	
3.3	0,727		0,842	

**Выводы**

1. Лазерное упрочнение является перспективным технологическим процессом и может быть применено при закалке деталей типа шпинтон.

2. Нанесение дорожек лазерной закалки дефокусированным и осциллирующим лучом позволило повысить износостойкость в 2,93 и 2,18 раза по сравнению с материалом основы.

3. Площадь лазерной закалки увеличилась в 2 раза при обработке осциллирующим лучом по сравнению с закалкой дефокусированным пучком при одинаковых режимах технологического процесса.

4. Микротвердость дорожек упрочнения на 600...820 МПа выше при обработке осциллирующим лучом, чем при закалке дефокусированным лучом.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

- Lackh, L. Recent Advances in Laser Surface Hardening: Techniques, Modeling Approaches, анявляется перспективной технологией и может быть применима при Industrial Applications // Crystals. 2024, vol. 14, no. 8, p. 726. doi: 10.3390/cryst14080726.
- Алисин, В.В. Повышение износостойкости цилиндрических втулок тяжелых дизелей лазерной обработкой // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. №16. С. 51-55. -doi.org/10.26160/2658-3305-2022-16-51-55.
- Бирюков, В.П., Лазерное упрочнение сталей прямоугольным пятном для повышения ресурса их работы / В.П. Бирюков, С.А. Шмелев, А.В. Богданов [и др.] // Фотоника. 2019. Т. 13. № 6. С. 532-537. - doi.org/ 10.22184/1993-7296.FROS.2019.13.6.532.537.
- Li, J Microstructure characteristics at different depths of 40CrNiMo steel after laser hardening / J. Li, H. Yan, S. Li // Materials Characterization, 2023, Vol. 197, 112680. doi: 10.1016/j.matchar.2023.112680.
- Zhao, K. The Resistance to Wear and Thermal Cracking of Laser Surface Engineered P20 Steel / K. Zhao, G. Yan, J. Li, W. Guo, J. Gu, C. Li // Coatings. 2023, Vol. 13, p. 97. doi: 7. 10.3390/coatings13010097.
- Anusha, E. A novel method of laser surface hardening treatment inducing different thermal processing condition for Thin-sectioned 100Cr6 steel / E. Anusha, A. Kumar, S.M. Shariff, D. Grochala, D. Lesyk // Optics & Laser Technology. 2020, Vol.106, p.106061. doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106061.
- Dzhemelinskyi, V. Surface Hardness Improvement of AISI D2 Tool Steel by Laser Transformation Hardening Process Using High-Power Disk Laser / V. Dzhemelinskyi, M. Hruska, B. Mordyuk // Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. 2024, pp. 178-187. doi: 10.1007/978-3-031-61797-3.
- Li, J. Sliding friction and wear properties of 40CrNiMo steel after laser hardening against GCr15 steel under oil lubrication / J. Li, H. Yan, S. Li Y. Zhang, S. Wu // Coatings. 2022, Vol. 12, pp.



- 604-623. doi: 10.3390/coatings12050604.
9. Hu, X., Investigation on the parameters optimization and sliding wear behaviors under starved lubrication of discrete laser surface hardened 25CrNi2MoV steel / X. Hu, S. Jia, F. Lai, L. Jiang, X. Li // *Tribology International*. 2021, Vol. 163, p. 107176. doi: 10.1016/j.triboint.2021.107176.
  10. Wu, L. Research on 40Cr Laser Quenching Process for Guide Rail / L. Wu, W. Long, Q. Hao, Z. Cheng, Y. Yang, L. Shi, Y. Wu // *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2566, 012100. doi: 10.1088/1742-6596/2566/1/012100.
  11. Furlani, M.R. Reduced Coefficient of Friction of Laser Surface Hardened AISI 4130 Steel Substrates / M.R. Furlani, S.M. Carvalho // *Material Design & Processing Communications*, 2022, Vol. 2022, 541853. doi: 10.1155/2022/7541853.
  12. Albahlol, O.A.A. Effect of laser hardening on the mechanical, tribological and corrosion properties of low alloy steels / O.A.A. Albahlol, H. Cug, Y.

## REFERENCES

1. Lackh L. Recent advances in laser surface hardening: techniques, modeling approaches. *Crystals*. 2024;14(8):726. doi: 10.3390/cryst14080726.
2. Alisin VV. Increase in wear resistance of heavy diesel cylinder liners by laser treatment. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2022;16:51-55. doi.org/10.26160/2658-3305-2022-16-51-55
3. Biryukov VP, Shmelev SA, Bogdanov AV. Laser quenching of steels by rectangular patch to improve their work resource. *Photonics*. 2019;13(6):532-537. doi.org / 10.22184/1993-7296.FROS.2019.13.6.532.537.
4. Li J, Yan H, Li S. Microstructure characteristics at different depths of 40CrNiMo steel after laser hardening. *Materials Characterization*. 2023;197:112680. doi: 10.1016/j.matchar.2023.112680.
5. Zhao K, Yan G, Li J, Guo W, Gu J, Li C The resistance to wear and thermal cracking of laser surface engineered P20 steel. *Coatings*. 2023;13:97. doi: 10.3390/coatings13010097.
6. Anusha E, Kumar A, Shariff SM, Grochala D, Lesyk D. A novel method of laser surface hardening treatment inducing different thermal processing condition for Thin-sectioned 100Cr6 steel. *Optics and Laser Technology*. 2020;106:106061. doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106061.
7. Dzhemelinskyi V, Hruska M, Mordyuk B. Surface hardness improvement of AISI D2 tool steel by laser transformation hardening process using high-power disk laser. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII*. 2024:178-187. doi: 10.1007/978-3-031-61797-3.
8. Li J, Yan H, Li S, Zhang Y, Wu S. Sliding friction and wear properties of 40CrNiMo steel after laser hardening against GCr15 steel under oil lubrication.

- Akgul, A. Incesu, A.K. Eticha // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2023, Vol. 52, no 2, pp. 255-267. doi: 10.2298/JMMB230209022A.
13. Kanazawa, T. Sustainable technology for remanufacturing of carburized steels by laser hardening / T. Kanazawa, M. Hayakawa, D. Vinas, Y. Tahara, N. Hata, M. Yoshimoto // *Journal of Materials research and technology*. 2023, Vol. 24, pp. 39-48. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.02.226.
  14. Куксенова, Л.И. Методы испытаний на трение и износ: монография / Л.И. Куксенова, В. Г. Лаптева, А.Г. Колмаков, Л.М. Рыбакова. М.: Изд-во Интермет Инжиниринг, 2001. 152 с.
  15. Патент № 2683600 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 (2006.01). Способ измерения износа металлических материалов и покрытий: № 2018118990: заявл. 23.05.2018: опубл. 29.03.2019 / Бiryukov В.П., Гудушаури Э. Г., Фишков А. А.; заявитель ИМАШ РАН. – 5 с.

Coatings. 2022;12:604-623. doi: 10.3390/coatings12050604.

9. Hu X, Jia S, Lai F, Jiang L, Li X. Investigation on the parameters optimization and sliding wear behaviors under starved lubrication of discrete laser surface hardened 25CrNi2MoV steel. *Tribology International*. 2021;163:107176. doi: 10.1016/j.triboint.2021.107176.
10. Wu L, Long W, Hao Q, Cheng Z, Yang Y, Shi L, Wu Y. Research on 40Cr laser quenching process for guide rail. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023;2566:012100. doi: 10.1088/1742-6596/2566/1/012100.
11. Furlani MR, Carvalho SM. Reduced coefficient of friction of laser surface hardened AISI 4130 steel substrates. *Material Design and Processing Communications*. 2022;2022:541853. doi: 10.1155/2022/7541853.
12. Albahlol OAA, Cug H, Akgul Y, Incesu A, Eticha AK. Effect of laser hardening on the mechanical, tribological and corrosion properties of low alloy steels. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2023;52(2):255-267. doi: 10.2298/JMMB230209022A.
13. Kanazawa T, Hayakawa M, Vinas D, Tahara Y, Hata N, Yoshimoto M. Sustainable technology for remanufacturing of carburized steels by laser hardening. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:39-48. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.02.226.
14. Kуксенова ЛI, Лаптева ZVG, Колмаков AG, Рыбакова LM. Methods of testing for friction and wear: monograph. Moscow: Intermet Engineering; 2001.
15. Biryukov VP, Gudushauri EG, Fishkov AA. RF Patent No.2683600. МПК G01N 3/56 (2006.01). Method of measuring wear of metal materials and coatings. 2019 March 03.

## 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

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

**Yakubovsky Anton Alekseevich** – Junior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH

им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), аспирант Российского университета транспорта (МИИТ), тел. +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.

RAN), Postgraduate student at Russian University of Transport (MIIT), phone: +7(953)972-42-35.

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

**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 13.02.2025; одобрена после рецензирования 24.02.2025; принята к публикации 27.02.2025. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 13.02.2025; approved after review on 24.02.2025; accepted for publication on 27.02.2025. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**