

УДК 621.891.22

## **Влияние лазерной закалки на металлографические и триботехнические характеристики стали 55 распределительного вала дизеля тепловоза**

**В. П. Бирюков<sup>1</sup>, А. Н. Миряха<sup>2</sup>, А. А. Якубовский<sup>1</sup>, Я. А. Горюнов<sup>1</sup>, О. И. Кулаков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук, Российской Федерации, 101000, Москва, М. Харитоньевский пер., 4

<sup>2</sup>ООО НПП «ИНЖЕКТ», Российская Федерация, 410033, Саратов, ул. Элмашевская, Владение 3А, оф. 1

**Для цитирования:** Бирюков В. П., Миряха А. Н., Якубовский А. А., Горюнов Я. А., Кулаков О. И. Влияние лазерной закалки на металлографические и триботехнические характеристики стали 55 распределительного вала дизеля тепловоза // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 167–177. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-167-177

### **Аннотация**

**Цель:** Определение влияния режимов обработки прямоугольным пятном полупроводникового лазера на изменения глубины зон закалки стали 55, микротвердости, микроструктуры, триботехнических свойств при трении по закаленной стали 45 при подаче масла капельным способом. **Методы:** Лазерное термоупрочнение поверхности трения образцов стали 55 было выполнено прямоугольным пятном полупроводникового лазера. Определение металлографических свойств зон лазерного упрочнения было выполнено с использованием оптической системы МС-1000, цифрового микроскопа АМ-419, микротвердомера ПМТ-3 с цифровой камерой МС-8,3С при нагрузке 0,98 Н. В качестве эталона был выбран образец стали 18ХГ после цементации с твердостью 56–59 НРС. Триботехнические испытания по схеме: «плоский прямоугольный образец стали 55 — кольцевая поверхность оправки контробразца из стали 45», установленной в патрон шпинделя машины трения. Измерение моментов трения и усилия нагружения образцов было выполнено с применением тензодатчиков в непрерывном режиме с отображением данных на дисплее персонального компьютера. Также на машине трения установлен бесконтактный индуктивный датчик частоты вращения шпинделя с выводом на тахометр, закрепленный на верхней крышке машины. **Результаты:** Исследования показали, что при лазерном упрочнении микроструктура зон закалки содержит мелкодисперсные иглы мартенсита. Твердость этих зон составляет 7470–10 980 МПа. Давление заедания при различных скоростях скольжения контробразца из стали 45 в 1,5–1,6 раза, а износостойкость — в 2 раза выше, чем у образцов стали 18ХГТ после цементации. При этом коэффициенты трения значительно ниже. **Практическая значимость:** Технологический процесс изготовления распределительного вала дизеля из стали 18ХГТ с последующей цементацией может быть заменен на лазерную закалку распределительного вала из стали 55 прямоугольным лучом полупроводникового лазера. При этом значительно снижается энергоемкость и повышается экологическая чистота производственного процесса.

**Ключевые слова:** Лазерное упрочнение, микротвердость, микроструктура, коэффициент трения, интенсивность изнашивания, износостойкость.

### **Введение**

Энергоэффективность тепловозов определяется продолжительностью и надежностью их работы. Износостойкость деталей дизеля влияет на его долговечность. В настоящее время распределительные валы дизелей изготавливаются из стали 18ХГТ с последующей их цементацией. Однако ресурс работы этих валов

недостаточен, а технологический процесс цементации энергоемкий. В современном машиностроении находят применение новые технологические процессы лазерного упрочнения сталей, которые повышают долговечность работы изделий по сравнению с традиционными методами обработки. Наиболее часто применяемыми лазерами в промышленном производстве являются CO<sub>2</sub>, Nd: YAG, волоконные лазеры и диодные лазеры [1, 2]. Новые достижения в области методов лазерного упрочнения позволили получить практические результаты и открыли путь к новым технологическим применением [3–7]. Широкое использование лазерной обработки поверхностей основано на преимуществах, которые они имеют по сравнению с традиционными технологиями [8–11]. Наряду с высокими достижениями упрочнение лазером стали 40Х [12] позволило получить твердость модифицированных зон 2980–3550 МПа, что не является верхним пределом по твердости этой стали при лазерной закалке. Разработано значительное количество экспериментальных [13–15] и аналитических моделей для их применения при лазерном упрочнении.

## Материалы и методы исследования

Для выполнения экспериментальных исследований по лазерному термоупрочнению образцов стали 55 с размерами 16 × 20 × 80 мм был использован автоматизированный технологический комплекс, содержащий полупроводниковый технологический лазер PLD-6, изготовленный в ООО «НПП “ИНЖЕКТ”» с мощностью излучения 6 кВт. Лазерная закалка была проведена при скорости сканирования луча 5 мм/с, пятном с размерами 20 × 4 мм. Мощность излучения при обработке первой партии образцов (1) составила 3,6 кВт, а для второй партии — 2,4 кВт (2).

Определение металлографических свойств зон лазерного упрочнения выполнено с использованием:

- оптической системы МС-1000;
- цифрового микроскопа АМ-419;
- микротвердомера ПМТ-3 с цифровой камерой МС-8,3С при нагрузке 0,98 Н.

В качестве эталона выбран образец стали 18ХГ, прошедший цементацию и закалку, с твердостью 56–59 HRC и глубиной цементованного слоя 1,4–1,5 мм, выполненного по стандартной технологии.

Триботехнические испытания были проведены на машине трения (рис. 1), содержащей станину 1 с размещенным на ней подвижным столом 2, на котором установлен датчик усилия нагружения 3 с закрепленным на нем предметным столиком 4, выполненным в виде двух дисков 5 и 6, разделенных стальным шариком и соединенных тремя винтами 7, оснащенными пружинами 8 для самоустановки образца, с размещенным на нем теплообменным устройством 9, оснащенным

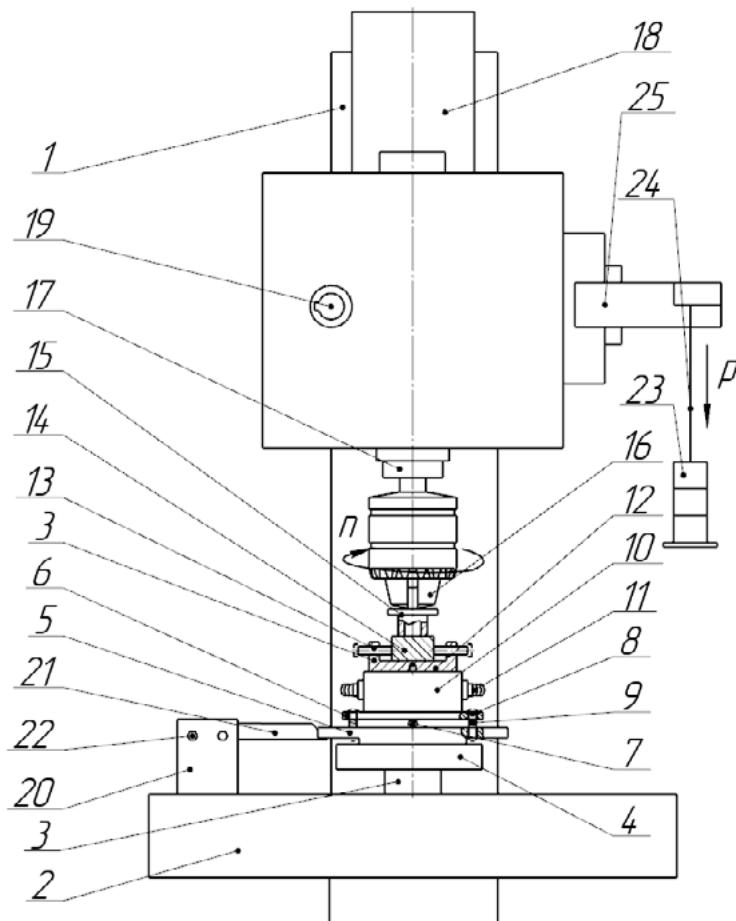


Рис. 1. Схема машины трения

штуцерами 10 для прокачки воды, ложементом 10 с размещенными симметрично относительно его оси шестью винтами 11 для крепления образца 12, на котором установлен контробразец 13, выполненный в виде кольцевой оправки, торец которой опирается на образец, а противоположный ее конец своим цилиндрическим хвостовиком закреплен в трехкулачковом патроне 14, установленном в шпинделе 15, вращение которого осуществляется с помощью электродвигателя постоянного тока 16 через редуктор (на схеме не показан). Изменение частоты вращения шпинделя производится рукояткой 17. Для измерения момента трения на опоре 18, жестко прикрепленной к столу 2, закреплена тензобалка 19 винтами 20, свободный конец которой входит в паз нижнего диска 5 предметного столика 4. Усилие нагружения  $P$  передается с помощью грузов 21, размещенных на шпильке 22, закрепленной на рычаге 23, через который с помощью зубчатой передачи «шестерня-рейка» (на схеме не показаны) — на шпиндель 15, трехкулачковый патрон 14, контробразец 13 и образец 12. Сигналы с тензометрических датчиков момента трения и усилия нагружения поступали на входы дифференциального усилителя ZETLAB ZET 410. Преобразование усиленного сигнала выполнялось 16-битным аналого-цифровым устройством (АЦП) ZETLAB ZET 210 в дифференциальном включении. Графики изменения моментов трения и усилия прижима

в реальном времени наблюдали на экране дисплея персонального компьютера. Также на машине установлен бесконтактный индуктивный датчик частоты вращения шпинделя с выводом на тахометр, закрепленный на верхней крышке установки (на схеме не показан).

Для смазки в зону трения подавалось масло 10W40 капельным способом — по одной капле в секунду. Интенсивность изнашивания определяли как среднюю арифметическую величину по результатам испытаний трех образцов.

Расчет величины интенсивности изнашивания  $J$  производили по формуле [16]:

$$J = \frac{\Delta h}{L}, \quad (1)$$

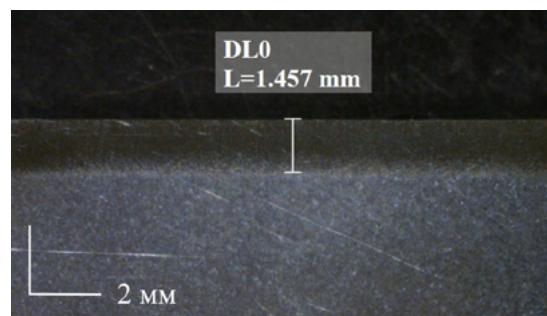
где  $\Delta h$  — линейный износ [17], мкм;

$L$  — путь трения, мкм.

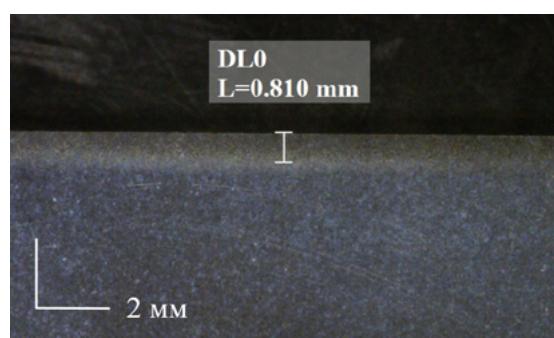
Результаты экспериментальных исследований

На рис. 2 показаны микрошлифы образцов стали 55, термоупрочненные при скорости перемещения луча 5 мм/с, мощности излучения 3,6 кВт (рис. 2, *a*) — образец партии 1 и 2,4 кВт (рис. 2, *б*) — образец партии 2.

Микроструктуры зон лазерного упрочнения, содержащие в основном мартенсит с различными размерами игл при увеличении в 1000 крат, представлены на рис. 3, *a* и *б*.



*a*



*б*

Рис. 2 Микрошлифы зон лазерного термоупрочнения стали 55:  
*а* — 3,6 кВт; *б* — 2,4 кВт

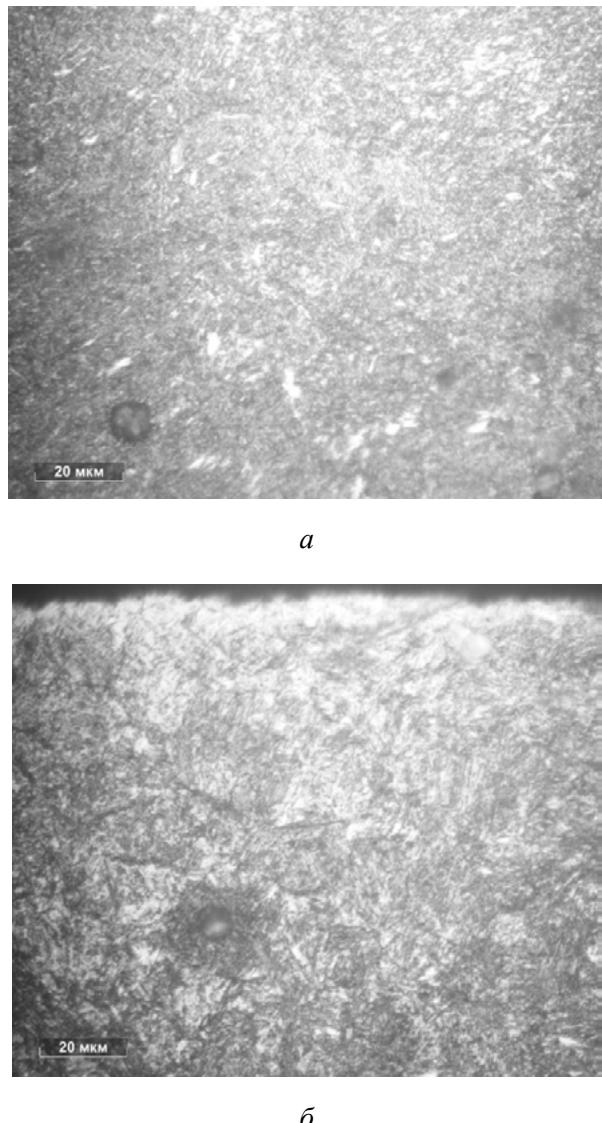


Рис. 3. Микроструктуры термоупрочненных лазерным лучом зон стали 55:  
а — образец партии 1; б — образец партии 2

Микроструктуры образцов партий 1 и 2 соответствовали баллам зерна маргентсита № 2 и № 3 соответственно. Микротвердость первой зоны закалки образцов партии 1 составила 7470–10 980 МПа, за ней следовала зона неполной закалки 5380–6470 МПа и далее зона основного металла 2220–2460 МПа. Микротвердость первой зоны закалки образцов партии 2 составила 5180–7580 МПа, за ней следовала зона неполной закалки 2590–3350 HV<sub>0,1</sub> и далее зона основного металла 2050–2140 МПа.

На рис. 4 представлен график зависимости удельной нагрузки заедания от скорости скольжения упрочненных лазером образцов в паре с контробразцом из стали 45. Из графика видно, что образцы партии 1 имели большую стойкость к заеданию в 1,5–1,6 раза, чем цементированные образцы. Образцы партии 2 по задиростойкости занимали промежуточное положение по этому показателю.

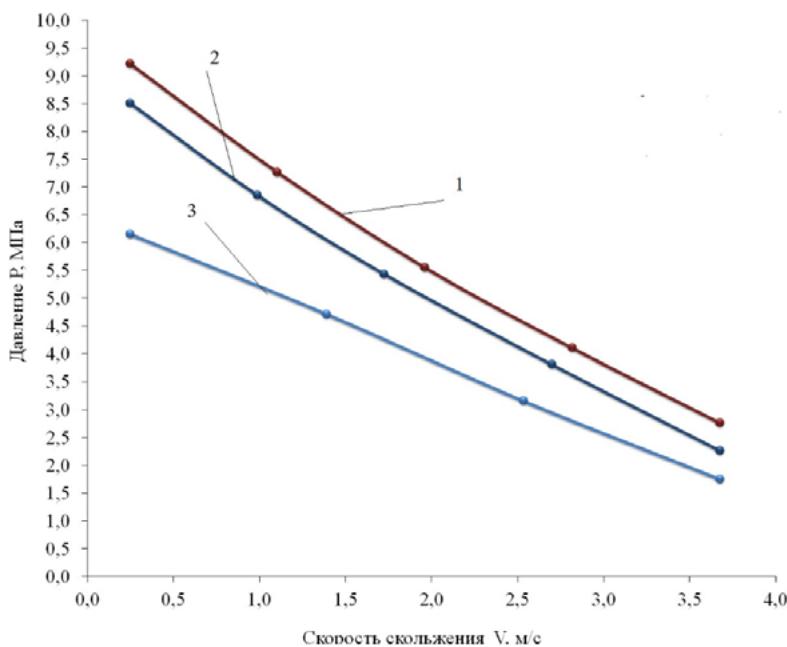


Рис. 4. Зависимость давления заедания от скорости скольжения:  
 1 — образцы партии 1; 2 — образцы партии 2;  
 3 — цементованные образцы стали 18ХГТ

На рис. 5 представлены зависимости коэффициентов трения от скорости скольжения стальных контробразцов. Анализ результатов испытаний показал, что минимальными коэффициентами трения обладали образцы партии 1, за ними по возрастанию коэффициентов трения следовали образцы партии 2 и цементованные образцы.

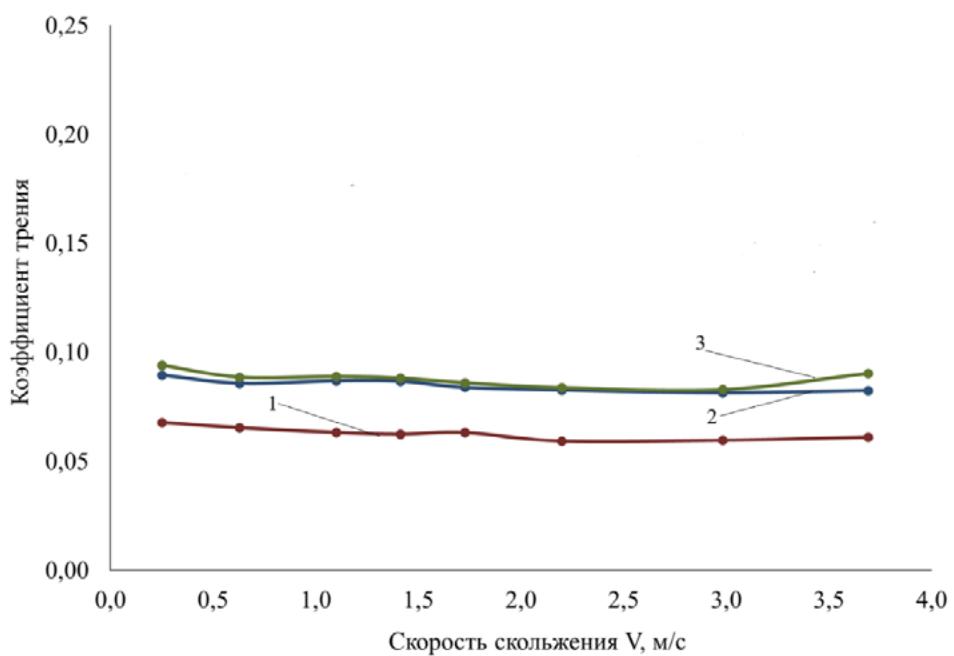


Рис. 5. Зависимость коэффициентов трения от скорости скольжения:  
 1 — образцы партии 1; 2 — образцы партии 2; 3 — цементованные образцы стали 18ХГТ

В таблице приведены результаты испытаний по определению интенсивности изнашивания образцов партий 1 и 2, цементованных образцов стали 18ХГТ и контробразцов из стали 45. Наименьшая средняя интенсивность изнашивания  $1,38 \cdot 10^{-8}$  наблюдалась у образцов партии 1, что в 2 и 2,65 раза меньше, чем у цементированных образцов и образцов партии 2 соответственно. Средняя интенсивность изнашивания контробразцов при трении по образцам из группы 1 составляла  $2,69 \cdot 10^{-8}$  и имела минимальное значение по сравнению с контробразцами, испытанными в паре с цементованными образцами и образцами партии 2.

Результаты испытаний по определению интенсивности изнашивания образцов партий 1 и 2, цементованных образцов стали 18ХГТ и контробразцов из стали 45

№ п/п	№ образца	Материал контр- образца	Смазка	Нагрузка, $P$ , МПа	Интенсивность изнашивания образца		Интенсивность изнашивания контробразца	
					$I_1 \cdot 10^{-9}$	$I_{1cp} \cdot 10^{-9}$	$I_2 \cdot 10^{-9}$	$I_{2cp} \cdot 10^{-9}$
1	1.1	Сталь 45 (49–54 HRC)	10W-40	0,82	0,91	1,38	2,17	2,69
2	1.2				1,43		2,53	
3	1.3				1,80		3,39	
4	2.1				3,87	3,66	2,44	4,08
5	2.2				3,47		4,93	
6	2.3				3,66		4,89	
7	3.1				2,60	2,77	9,06	8,78
8	3.2				3,30		7,44	
9	3.3				2,43		9,86	

## Заключение

Разработан новый технологический процесс лазерного упрочнения прямоугольным лучом полупроводникового лазера стали 55 с глубиной закаленного слоя 0,8–1,5 мм. При оптимальных режимах лазерного упрочнения получен мелкодисперсный мартенсит; микроструктура соответствовала баллу зерна № 2. Давление заедания у образцов партии 1 было в 1,5–1,6 раза выше, а износостойкость — в 2 раза выше, чем у образцов стали 18ХГТ после цементации; средние коэффициенты трения при этом оказались значительно ниже. По результатам экспериментальных исследований установлено, что технологический процесс изготовления распределительного вала дизеля из стали 18ХГТ с последующей цементацией может быть заменен на лазерную закалку распределительного вала дизеля тепловоза из стали 55 прямоугольным лучом полупроводникового лазера. При этом значительно снижается энергоемкость и повышается экологическая чистота производственного процесса.

Работа выполнена за счет средств государственного задания. Код (шифр) научной темы, присвоенный учредителем: FFGU-2024-0023.

## Список источников

1. Guarino S. High Power Diode Laser (HPDL) surface hardening of low carbon steel: Fatigue life improvement analysis / S. Guarino, M. Barletta, A. Afilal // Journal of Manufacturing Processes. — 2017, — Vol. 28. — Pp. 266–271.
2. Nemova G. Brief Review of Recent Developments in Fiber Lasers // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14. — P. 2323.
3. Kennedy E. A review of the use of high-power diode lasers in surface hardening / E. Kennedy, G. Byrne, D.N. Collins // Journal of Materials Processing Technology. — 2004. — Vol. 155–156. — Pp. 1855–1860.
4. Tan C. Y. Influence of laser parameters on microstructures and surface properties in laser surface modification of biomedical magnesium alloys / C. Y. Tan, C. Wen, H. Q. Ang // Journal of Magnesium and Alloys. — 2024. — Vol. 12. — Pp. 72–97.
5. Tan S. Progress and prospects in laser additive manufacturing of key materials for aircraft engines / S. Tan, F. Weng, S. Sui, Y. Chew et al. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2021. — Vol. 170. — P. 103804.
6. Homberg D. PID control of laser surface hardening of steel / D. Homberg, W. Weiss // IEEE Transactions on Control Systems Technology. — 2006. — Vol. 14. — Pp. 896–904.
7. Lasota I. Laser surface hardening of engine camshaft cams / I. Lasota, V. Protsenko, A. Matyushkin, M. Kuznetsov et al. // Materials Today: Proceedings. — 2020. — Vol. 30. — Pp. 478–482.
8. Patwa R. Predictive modeling of laser hardening of AISI5150H steels / Patwa R., Shin Y. C. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2007, — Vol. 47. — Pp. 307–320.
9. Maharjan N. Comparative study of laser surface hardening of 50CrMo4 steel using continuous-wave laser and pulsed lasers with ms, ns, ps and fs pulse duration / N. Maharjan, W. Zhou, Y. Zhou, Y. Guan et al. // Surface and Coatings Technology. — 2019 — Vol. 366. — Pp. 311–320.
10. Maharjan N. Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere / N. Maharjan, W. Zhou, N. Wu // Surface and Coatings Technology. — 2020. — Vol. 385. — P. 125399.
11. Frerichs F. Process signature for laser hardening / F. Frerichs, Y. Lu, T. Lübben, T. Radel // Metals. — 2021. — Vol. 11. — P. 465.
12. Naprimerova E. D. Impact of laser hardening on surface properties of billets from structural materials / E. D. Naprimerova, K. Yu. Pashkeev, E. V. Yurasova, K. S. Litvinyuk et al. // Metallurgist. — 2024. — Iss. 11. — Pp. 89–93.
13. Patwa R. Predictive modeling of laser hardening of AISI5150H steels / R. Patwa, Y. C. Shin // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2007. — Vol. 47. — Pp. 307–320.
14. Zhang B. Applications of laser surface treatment in gears: a review / B. Zhang, L. Sun, N. Zhao, J. Li // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2024. — Vol. 34. — Pp. 1–35.

15. Komanduri R. Thermal analysis of the laser surface transformation hardening process / R. Komanduri, Z. Hou // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2001. — Vol. 44. — Pp. 2845–2862.

16. Куксенова Л. И. Методы испытаний на трение и износ: монография / Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева, А. Г. Колмаков, Л. М. Рыбакова — М.: Интермет Инжиниринг, 2001. — 152 с.

17. Патент № 2683600 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Способ измерения износа металлических материалов и покрытий / В. П. Бирюков, Э. Г. Гудушаури, А. А. Фишков. — Заявл. 23.05.2018; опубл. 29.03.2019. — Бюл. № 10.

Дата поступления: 15.06.2025

Решение о публикации: 28.07.2025

#### **Контактная информация:**

БИРЮКОВ Владимир Павлович — канд. техн. наук; laser-52@yandex.ru

МИРЯХА Андрей Николаевич — начальник группы; miryahaan@yandex.ru

ЯКУБОВСКИЙ Антон Алексеевич — аспирант; anton.at444@gmail.com

ГОРЮНОВ Ярослав Алексеевич — аспирант; yarosgorun22112000@gmail.com

КУЛАКОВ Олег Игоревич — аспирант; kulakov@imash.ru

## **The Influence of Laser Hardening on the Metallographic and Tribotechnical Properties of Class 55 Steel Used in Diesel Locomotive Camshafts**

**V. P. Biryukov<sup>1</sup>, A. N. Miryakha<sup>2</sup>, A. A. Yakubovsky<sup>1</sup>, Ya. A. Goryunov<sup>1</sup>, O. I. Kulakov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4, M. Kharitonovskiy per., Moscow, 101990, Russian Federation

<sup>2</sup>INJECT RME LLC, 3A, off. 1, Elmashevskaya str., Saratov, 410033, Russian Federation

**For citation:** Biryukov V. P., Miryakha A. N., Yakubovsky A. A., Goryunov Ya. A., Kulakov O. I. The Influence of Laser Hardening on the Metallographic and Tribotechnical Properties of Class 55 Steel Used in Diesel Locomotive Camshafts. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 167–177. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-167-177

#### **Summary**

**Purpose:** This research investigates the effect of semiconductor laser processing parameters, specifically with a rectangular spot, on the hardening depth, microhardness, microstructure, and tribotechnical properties of Class 55 steel. These properties were evaluated under conditions of friction against hardened Class 45 steel, utilizing a drip oil lubrication system. **Methods:** Laser thermal hardening of the friction surface of Class 55 steel samples was performed using a semiconductor laser with a rectangular spot. Metallographic analysis of the laser-hardened zones was conducted using an MS1000 optical system, an AM419 digital microscope, and a PMT-3 microhardness tester. The microhardness measurements were performed with a load of 0.98 N and recorded using an MS-8.3 S digital camera. The reference sample selected for this study was Class 18XG steel after undergoing carburizing treatment, which demonstrated a hardness level of 56–59 HRC. Tribotechnical tests were carried out according to the scheme that included a flat rectangular block of Class 55 steel and a

ring-shaped counter-plate composed of steel 45, both of which were in the spindle chuck of a friction-testing machine. Continuous measurements of the friction moments and the applied load on the samples were obtained using strain gauges, with the data being displayed on a computer screen in real time. Furthermore, a non-contact inductive sensor was installed on the friction machine to measure the spindle rotational frequency, with the output directed to a tachometer affixed to the top cover of the machine. **Results:** The study have shown that following laser hardening, the microstructure of the hardened zones contains fine-disperse martensite needles. The hardness within these zones varies from 7470 to 10,980 MPa. The adhesive wear pressure at different sliding speeds of the 45 steel counter-plate is 1.5-1.6 times greater, and the wear resistance is twice as high compared to the samples of 18XGT after carburizing. Concurrently, the friction coefficients are significantly lower. **Practical significance:** The technological process for manufacturing a diesel camshaft made of 18XGT steel with subsequent carburizing can be replaced by laser hardening of the camshaft made from Class 55 steel using a semiconductor laser with a rectangular beam. This alternative approach significantly reduces energy consumption and enhances the ecological sustainability of the production process.

**Keywords:** Laser hardening, microhardness, microstructure, coefficient of friction, wear rate, wear resistance.

## References

1. Guarino S., Barletta M., Afilal A. High Power Diode Laser (HPDL) surface hardening of low carbon steel: Fatigue life improvement analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 28, pp. 266–271.
2. Nemova G. Brief Review of Recent Developments in Fiber Lasers. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, p. 2323.
3. Kennedy E., Byrne G., Collins D. N. A review of the use of high-power diode lasers in surface hardening. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 155–156, pp. 1855–1860.
4. Tan C. Y., Wen C., Ang H. Q. Influence of laser parameters on microstructures and surface properties in laser surface modification of biomedical magnesium alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2024, vol. 12, pp. 72–97.
5. Tan S., Weng F., Sui S., Chew Y. et al. Progress and prospects in laser additive manufacturing of key materials for aircraft engines. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, vol. 170, p. 103804.
6. Homberg D., Weiss W. PID control of laser surface hardening of steel. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, vol. 14, pp. 896–904.
7. Lasota I., Protsenko V., Matyushkin A., Kuznetsov M. et al. Laser surface hardening of engine camshaft cams. *Materials Today: Proceedings*. 2020, vol. 30, pp. 478–482.
8. Patwa R., Shin Y. C. Predictive modeling of laser hardening of AISI150H steels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, pp. 307–320.
9. Maharjan N., Zhou W., Zhou Y., Guan Y. et al. Comparative study of laser surface hardening of 50CrMo4 steel using continuous-wave laser and pulsed lasers with ms, ns, ps and fs pulse duration. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 366, pp. 311–320.
10. Maharjan N., Zhou W., Wu N. Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 385, p. 125399.

11. Frerichs F., Lu Y., Lübben T., Radel T. Process signature for laser hardening. *Metals*, 2021, vol. 11, p. 465.
12. Naprimerova E. D., Pashkeev K. Yu., Yurasova E. V., Litvinyuk K. S. et al. Impact of laser hardening on surface properties of billets from structural materials. *Metallurgist*, 2024, Iss. 11, pp. 89–93.
13. Patwa R., Shin Y. C. Predictive modeling of laser hardening of AISI5150H steels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, pp. 307–320.
14. Zhang B., Sun L., Zhao N., Li J. Applications of laser surface treatment in gears: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, vol. 34, pp. 1–35.
15. Komanduri R., Hou Z. Thermal analysis of the laser surface transformation hardening process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, vol. 44, pp. 2845–2862.
16. Kuksanova L. I., Lapteva V. G., Kolmakov A. G., Rybakova L. M. *Metody ispytaniy na trenie i iznos: monografiya* [Friction and Wear Test Methods: monograph]. Moscow: Intermet Inzhiniring Publ., 2001, 152 p. (In Russian)
17. Biryukov V. P., Gudushauri E. G., Fishkov A. A. *Sposob izmereniya iznosa metallicheskikh materialov i pokrytiy* [Method for Measuring Wear of Metallic Materials and Coatings]. Patent RF, no. 2683600, 2019. (In Russian)

Received: June 15, 2025

Accepted: July 28, 2025

**Author's information:**

Vladimir P. BIRYUKOV — PhD in Engineering; [laser-52@yandex.ru](mailto:laser-52@yandex.ru)

Andrey N. MIRYAKHA — Head of Department; [miryahaan@yandex.ru](mailto:miryahaan@yandex.ru)

Anton A. YAKUBOVSKY — Postgraduate Student; [anton.at444@gmail.com](mailto:anton.at444@gmail.com)

Yaroslav A. GORYUNOV — Postgraduate Student; [yarosgorun22112000@gmail.com](mailto:yarosgorun22112000@gmail.com)

Oleg I. KULAKOV — Postgraduate Student; [kulakov@imash.ru](mailto:kulakov@imash.ru)