



Повышение эксплуатационных свойств железнодорожных колес лазерным поверхностным упрочнением

В.И. Криворотов^{1✉}, А.В. Завитков², И.С. Печников³, Н.А. Марков⁴

¹ООО «Инженерно-технологический центр «Альянс сварщиков Санкт-Петербурга и Северо-Западного региона», Санкт-Петербург, Российская Федерация

²ООО «ИЦ при ВлГУ», Владимир, Российская Федерация

²⁻⁴Владимирский государственный университет, Владимир, Российская Федерация

Резюме. Целью работы является оценка качества и структуры металла поверхностного слоя железнодорожных колес при лазерном упрочнении с применением устройства формирования пространственного профиля интенсивности лазерного пучка. Экспериментальные исследования выполнены на роботизированном комплексе, включающем манипулятор FANUC M710iC-50, волоконный лазер IPG LC-10 (диаметр активного волокна – 200 мкм), оптическую систему IPG FLW D50, обеспечивающую точное наведение и стабилизацию параметров пучка, и устройство формирования пространственного профиля интенсивности лазерного пучка, построенное по оптической схеме с цилиндрической и взаимно перпендикулярной к ней линзой Френеля. Опытные образцы вырезаны из фрагментов колесной пары тележек подвижного состава. Микроструктура материала образцов исследована с помощью металлографического микроскопа LEICA DM ILM. Микротвердость определяли на приборе DuraScan 20 вдоль направления упрочнения с шагом 0,05 и 0,1 мм по глубине упрочненного слоя. В ходе исследований было установлено влияние режимов упрочнения на качество и структурное состояние поверхностного слоя железнодорожных колес. Глубина упрочненного слоя составила 1,42–1,65 мм, что соответствует требованиям к термообработке колесных пар. Выявлено формирование поверхности специфической металлографической структуры в зоне упрочнения. Установлено, что наличие специфической структуры в результате воздействия на поверхность лазерного излучения с линейным профилем обеспечивает достижение уровня заданных эксплуатационных свойств по показателям износостойкости и контактной прочности, по сравнению с обработкой круглым пятном. Разработанная технология лазерного упрочнения обеспечивает получение характеристик упрочненного слоя колесной стали, полностью соответствующих требованиям, предъявляемым к термообработанным колесным парам.

Ключевые слова: лазерное поверхностное упрочнение, закалка железнодорожных колес, устройство формирования пространственного профиля интенсивности лазерного пучка, управление параметрами структуры

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, тема FZUN – 2024-0020, госзадания ВлГУ).

Для цитирования: Криворотов В.И., Завитков А.В., Печников И.С., Марков Н.А. Повышение эксплуатационных свойств железнодорожных колес лазерным поверхностным упрочнением // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 2. С. 208–220. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-2-208-220>. EDN: SQHXZB.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Enhancing railway wheel service characteristics by laser surface hardening

Valery I. Krivorotov^{1✉}, Aleksey V. Zavitkov², Ilya S. Pechnikov³, Nikita A. Markov⁴

¹Engineering and Technology Center LLC “Alliance of Welders of St. Petersburg and North-Western Region”, St. Petersburg, Russian Federation

²Engineering Center at Vladimir State University LLC, Vladimir, Russian Federation

²⁻⁴Vladimir State University, Vladimir, Russian Federation

Abstract. In this study, we evaluate the quality and microstructure of the surface layer of railway wheels subjected to laser hardening using a device for shaping the spatial intensity profile of a laser beam. Experiments were

carried out using a robotic processing system comprising a FANUC M710iC-50 manipulator, an IPG LS-10 fiber laser with an active fiber diameter of 200 μm , an IPG FLW D50 optical system providing precise beam positioning and stabilization of processing parameters, and a device for shaping the spatial intensity profile of the laser beam based on an optical configuration incorporating a cylindrical lens and a perpendicularly arranged Fresnel lens. Test specimens were cut from wheelset fragments of railway rolling stock bogies. The microstructure of the specimens was examined using a LEICA DM ILM metallographic microscope. Microhardness measurements were performed with a DuraScan 20 tester along the hardening direction at intervals of 0.05 and 0.1 mm through the depth of the hardened layer. The study established the influence of hardening parameters on the quality and structural condition of the railway wheel surface layer. The depth of the hardened layer ranged from 1.42 to 1.65 mm, meeting the requirements specified for wheelset heat treatment. The formation of a distinctive metallographic structure within the hardened area was identified. The presence of this specific structure, resulting from laser irradiation with a linear beam profile, ensures the required service characteristics in terms of wear resistance and contact fatigue strength compared to treatment using a conventional circular laser spot. The developed laser hardening technology enables the production of a hardened layer in wheel steel whose characteristics fully satisfy the requirements imposed on heat-treated railway wheelsets.

Keywords: laser surface hardening, hardening of railway wheels, device for forming laser beam spatial intensity profile, control of structure parameters.

Funding. The work was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2024-0004, theme FZUN-2024-0020, state assignments of Vladimir State University).

For citation: Krivorotov V.I., Zavitkov A.V., Pechnikov I.S., Markov N.A. Enhancing railway wheel service characteristics by laser surface hardening. *iPolytech Journal*. 2026;30(2):208-220. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-2-208-220>. EDN: SQHXZB.

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностное упрочнение без расплавления (закалку) колесной стали проводят традиционными способами с помощью высокотемпературной плазменной струи, токами высокой частоты, а также с использованием различных типов лазеров [1–7]. Эффективность применения такого лазерного оборудования для поверхностной обработки металлических материалов в значительной мере определяется рациональным использованием инструмента (оптических головок, насадок) и строгим соблюдением заданных условий режимов и параметров обработки, заданных технологическими приемами [8–13]. При отработке режимов лазерного упрочнения, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики деталей и изделий, целый ряд исследовательских и практических задач успешно решается с применением компьютерного моделирования [8, 13–16].

Известно, что при термической обработке поверхности (с нагревом без расплавления или с расплавлением) под воздействием лазерного излучения (ЛИ) формирование структуры металла направлено в сторону преимущественного теплоотвода. В равной степени этот процесс идет в сторону движения лазерного луча. Такой факт необходимо учитывать при отработке методов лазерной обработки колесной стали, поскольку лазер-

ное упрочнение является эффективным методом дифференцированной поверхностной обработки, повышающей износостойкость и контактно-усталостную прочность железнодорожных колес. В частности, это важно для такой детали колеса, как реборда (гребень), удерживающий колесо на рельсах в нужном положении и исключаящий его смещение (сход) с колеи. Прежде всего, потому что физико-механическое, напряженное и структурное состояния области гребня и поверхности катания в значительной мере определяют безопасность движения на железнодорожном транспорте [3, 4, 17, 18]. Поэтому поиск рациональных способов дифференцированного упрочнения поверхностных элементов колес является весьма актуальной задачей.

Целью работы является оценка качества и структуры металла поверхностного слоя при лазерном упрочнении без расплавления колесной стали марки 2 с применением устройства формирования пространственного профиля интенсивности лазерного пучка. Научная новизна работы заключается в установлении закономерностей формирования упрочненного слоя и мезоструктуры поверхности при лазерном термоупрочнении железнодорожных колес излучением прямоугольного сечения. Показана возможность формирования прямоугольного лазерного пятна с выровненным распределением ин-

тенсивности вдоль его длинной стороны, что обеспечивает более однородное распределение энерговклада в зоне обработки. Предложен количественный подход к анализу формирующейся пилообразной мезоструктуры, основанный на определении геометрических характеристик ее элементов, включая высоту, ширину основания и площадь поперечного сечения. Предложен подход к установлению взаимосвязи между параметрами фокусировки и геометрическими характеристиками мезоструктуры поверхности. Разработана и экспериментально верифицирована нестационарная трехмерная модель теплопереноса, учитывающая движение источника тепла, температурную зависимость теплофизических свойств материала, а также конвективный и лучистый теплообмен, что обеспечивает прогнозирование глубины упрочненного слоя при различных режимах лазерной обработки.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследования и испытания проводились на заготовках в виде сектора колеса, полученных механической резкой из колесной пары тележек подвижного состава (рис. 1). В качестве основных показателей процесса упрочнения приняты микротвердость, глубина и ширина упрочненного слоя. Были выбраны технологические параметры и режимы лазерной закалки без расплавления поверхности.

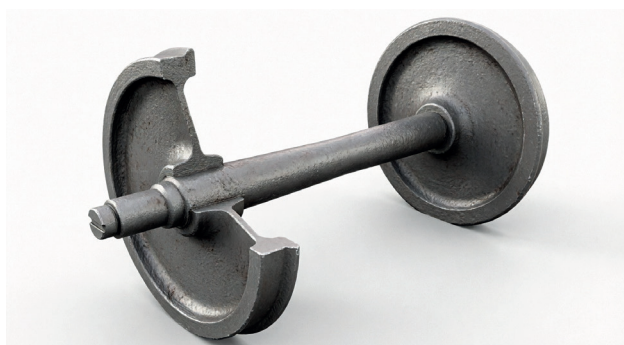


Рис. 1. Колесная пара подвижного состава с вырезанным сектором гребня для исследований

Fig. 1. Wheelset of rolling stock with a cut out flange sector for research purposes

Лазерная обработка проводилась на разработанном роботизированном комплексе, включающем в себя промышленный манипулятор FANUC M710iC-50, волоконный

иттербиевый лазер IPG LC-10, а также оптическую головку IPG FLW D50. Для придания требуемого пространственного распределения интенсивности излучения использовалось устройство формирования профиля пучка, построенное по оптической схеме с цилиндрической и взаимно перпендикулярной к ней линзой Френеля [19, 20], обеспечивающей формирование линейного сечения лазерного пятна.

Полотно и ступицу удаляли, оставляя фрагменты обода (гребень и поверхность катания) колеса и получали образцы размером 130×70×10 мм для последующих исследований.

Обработка выполнялась непрерывным режимом излучения в один технологический проход при фокусировании лазерного пятна шириной около 18 мм перпендикулярно к поверхности образца. Основные параметры процесса указаны в табл. 2.

Численное моделирование выполнялось в пакете COMSOL Multiphysics.

Для оптической системы IPG FLW D50 рассчитаны распределения интенсивности на выходе: с гауссовым профилем и с равномерным (плоским волновым фронтом). Решение получено методом конечных элементов.

Расчетная область – прямоугольный параллелепипед 30×25×10 мм (x – направление сканирования, y – поперечное, z – глубина). Начало координат – в центре верхней грани. Неструктурированная тетраэдральная сетка сгущена в зоне лазерного воздействия ($|x - x_c| < 5$ мм, $|y - y_c| < 10$ мм, $z < 2$ мм): размер ячеек – 0,1–0,2 мм; в остальной области – 0,5–1 мм. Проверка сходимости: удвоение числа ячеек (с $2,5 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^5$) изменяет расчетную глубину закалки не более чем на 3 %. Временная дискретизация – адаптивная, шаг от 10^{-5} с (при проходе лазера) до 0,01 с. Общее расчетное время – 2 с (1,5 с – проход луча, 0,5 с – последующее охлаждение). Решатель – прямой MUMPS. Время одного расчета на рабочей станции с 16 ядрами – 4–5 ч.

Теплофизические свойства колесной стали марки 2 зависят от температуры. В расчетах использованы зависимости из справочника. Для интерполяции в диапазоне 20–1200 °С применяются следующие аппроксимации (табл. 1).

Таблица 1. Теплофизические свойства стали марки 2
Table 1. Thermal properties of grade 2 steel

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	$k, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
20	7850	460	52
200	7830	500	48
400	7790	560	42
600	7740	650	36
800	7680	800	30
1000	7600	620	28
1200	7550	650	27

Коэффициент конвективной теплоотдачи h принят равным 15 Вт/(м²·К) (свободная конвекция на воздухе). Излучательная способность шлифованной поверхности стали $\varepsilon = 0,8$ (степень черноты для окисленной поверхности при высоких температурах). Постоянная Стефана–Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴). Согласно литературным данным, коэффициент поглощения стали для излучения 1,07 мкм составляет 0,30–0,40; в расчетах принято среднее значение $A = 0,35$.

Разработанная нестационарная модель основана на решении нелинейного уравнения теплопроводности в твердом теле. Поскольку обработка ведется без оплавления, объемное тепловыделение отсутствует ($Q_V = 0$) формула (1):

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T)\nabla T), \quad (1)$$

где $c_p(T)$ – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); $\rho(T)$ – плотность, кг/м³; $k(T)$ – теплопроводность материала, Вт/(м·К) (см. табл. 1). Все теплофизические свойства зависят от температуры и заданы для стали марки 2 в диапазоне 20–1200 °С.

Начальное условие: $T(x, y, z, 0) = 293,15$ К (20 °С). Граничные условия на облучаемой поверхности заданы с учетом конвективного и лучистого теплообмена с окружающей средой при температуре T_0 (2):

$$-k(T)\nabla T \cdot \mathbf{n} = Q_L - h(T - T_0) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

где $\mathbf{n}$ – внешняя нормаль; Q_L – поверхностная плотность мощности лазерного излучения Вт/м²; h – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); ε – излучательная способность стали; σ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴). На всех внешних гранях образца

заданы одинаковые условия конвективного и лучистого теплообмена с окружающей средой при температуре T_0 . Тестовые расчеты с увеличением размеров области на 50 % показали изменение максимальной температуры менее 2 %, поэтому влияние граничных условий признано несущественным.

Для эквивалентного описания распределенного тепловложения вдоль направления сканирования введена эффективная длина взаимодействия $L = 2$ мм, определенная из экспериментального времени воздействия $\tau = 0,1$ с. Данная величина используется только для вычисления поверхностной плотности мощности и не интерпретируется как фактический оптический размер лазерного пятна, ширина $W = 18$ мм соответствует характерному размеру зоны воздействия в поперечном направлении. Поглощательная способность лазерного излучения A для неокисленной стали при длине волны 1,07 мкм принята равной 0,35. В расчетах используется поглощенная мощность $P_{абс} = A \cdot P$, где P – полная мощность лазерного излучения, Вт. Поверхностная плотность мощности (3) задается как

$$Q_L(x, y, t) = \frac{P_{абс}}{L \cdot W} \cdot 1_{|x-x_c(t)| \leq L/2} \cdot 1_{|y-y_c(t)| \leq W/2}, \quad (3)$$

где 1 – индикаторная функция (равна 1 внутри пятна и 0 вне его). Интеграл $\iint Q_L dx dy = P_{абс}$ (поглощенная мощность лазера).

Параметры обработки соответствуют экспериментальным режимам (табл. 2): мощность $P = 7600$ –8600 Вт, скорость сканирования $V = 20$ мм/с. Пусть $x_c(t)$, $y_c(t)$ – координаты центра лазерного пятна. Движение источника задается соотношениями (4):

$$x_c(t) = x_0 + Vt; y_c(t) = y_0 = const, \quad (4)$$

где $V = 20$ мм/с – скорость сканирования; x_0 , y_0 – начальные координаты центра. Начальные координаты центра пятна: $x_0 = -15$ мм, $y_0 = 0$. Область моделирования по оси x располагается в диапазоне от -15 до $+15$ мм, полное время движения центра пятна от одной границы области до другой составляет $t_{\max} = 30/20 = 1,5$ с. Время прохода лазерного пятна через расчетную область составляет 1,5 с. Для учета процесса охлаждения после завершения нагрева расчет продлен до $t = 2$ с.

Для каждого из экспериментальных режимов (см. табл. 2) проведен расчет температурных полей. Глубина упрочненного слоя определялась по изотерме $t = 820^\circ\text{C}$, соответствующей температуре полной аустенизации стали в условиях высокоскоростного нагрева. Сравнение расчетной глубины $h_{\text{расч}}$ и экспериментальной $h_{\text{эксп}}$ выполнено с использованием средней абсолютной ошибки (5):

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{h_{\text{эксп},i} - h_{\text{расч},i}}{h_{\text{эксп},i}} \right| \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $n = 4$ – число режимов; полученное значение $\delta = 4,6\%$ (индивидуальные расхождения см. в табл. 2). Все параметры модели (теплофизические свойства, h , ε , A) взяты из независимых литературных источников и не калибровались по представленным экспериментальным данным. Таким образом, расхождение является мерой предсказательной способности модели, что подтверждает ее адекватность.

Для оценки структурных превращений материала, а также толщины закаленного слоя в поверхностном слое образцов после лазерной обработки проводили металлографические исследования.

На рис. 2 представлен профиль поперечного сечения образца для металлографических исследований, подготовленный электроэрозионным методом (для сохранения исходной структуры и исключения термического воздействия) с последующей прецизионной шлифовкой, полировкой и травлением.

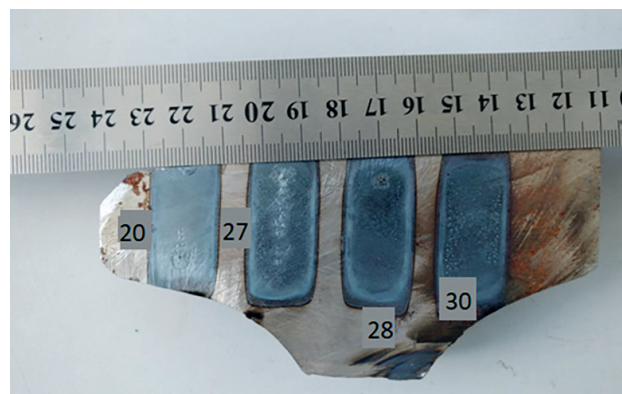


Рис. 2. Внешний вид образцов после лазерной термообработки с использованием устройства формирования пространственного профиля интенсивности лазерного пучка

Fig. 2. External view of samples after laser heat treatment using a device for forming laser beam spatial intensity profile

Микроструктурный анализ проводился с использованием металлографического микроскопа LEICA DM ILM при увеличении от 100 до 1000 раз. Измерения микротвердости выполнялись по стандарту ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78)⁵ на приборе DuraScan 20 при нагрузке 0,98 Н и выдержке, установленной нормативом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведения операций лазерного термоупрочнения на опытных образцах

Таблица 2. Технологические режимы термообработки образцов

Table 2. Technological modes of heat treatment of samples

№ образца	Мощность	Скорость	Фокус	Глубина упрочняющего слоя		Ширина зоны лазерного воздействия	Твердость, HV
				эксп.	расч.		
	Вт	мм/с	усл. ед.	мм			
20	7600	20	1	1,61	1,52	18,5	788
27	8600		0,92	1,65	1,71	18,1	841
28	8600		1	1,65	1,58	19,2	794
30	8600		0,84	1,42	1,35	17,3	861

⁵ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78). Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Введ. 01.01.1977. М.: Изд-во стандартов, 1978.

из исследуемой колесной стали марки 2 было получено несколько технологических режимов обработки с использованием устройства формирования пространственного профиля интенсивности (УФППИ) лазерного пучка. Для сравнения также были обработаны образцы лазерным пучком с гауссовым распределением интенсивности.

По данным табл. 2 сравнение режимов 27 и 30 (мощность 8600 Вт, фокус 0,92 и 0,84 усл. ед.) показывает, что изменение фокуса (и, как следствие, эффективной плотности мощности) приводит к уменьшению глубины упрочнения с 1,65 до 1,42 мм при сохранении микротвердости (841–861 НВ). Влияние скорости в данной работе не исследовалось независимо (все образцы обработаны при $V = 20$ мм/с).

Ключевым результатом является формирование в упрочненном слое специфической «пилообразной» мартенситной структуры (рис. 3), что объясняется воздействием лазерного пучка с линейным профилем [20].

Микроструктурный анализ показал, что лазерная обработка с использованием УФППИ приводит к образованию на глубине до 1,65 мм характерной зональной структуры (см. рис. 3). Данная структура имеет пилообразный морфологический рельеф, образованный чередующимися встречно-направленными светлыми и темными полосами. Это свидетельствует о процессе кристаллизации, при котором

направление роста структуры определяется не только преимущественным теплоотводом, но и вектором сканирования лазерного пучка.

Для количественного анализа геометрических параметров пилообразного профиля в зависимости от режимов лазерного упрочнения (табл. 3) использован подход физической мезомеханики для анализа структуры как фрагментов мезомодели на основе микрошлифов (рис. 4), что позволило установить корреляцию между технологическими параметрами и геометрией элементов.

В табл. 3 представлены средние значения геометрических размеров элементов «пилообразной» структуры (см. рис. 4).

Границы упрочненного слоя поверхности глубиной 1,4...1,65 мм отнесены к макроструктуре, размеры (балл) зерна 4 мкм...20 мкм – к микроструктуре, а профиль, пронизывающий пилообразные упрочненные слои, основываясь на теории физической мезомеханики, – к мезоструктуре. Исследования микроструктуры выполняли на микрошлифах, изготовленных из образцов после лазерной обработки. Оценка среднего размера зерна на микрошлифах проводилась с применением программы SIAMSA, а также метода подсчета пересечений границ зерен отрезками прямых, в соответствии с ГОСТ 5639-82⁶.

Микроструктурный анализ выявил градиент размера зерна: от ~20 мкм в зоне

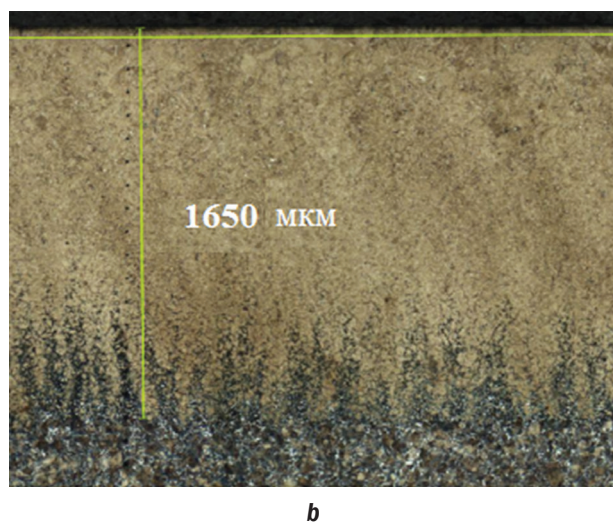
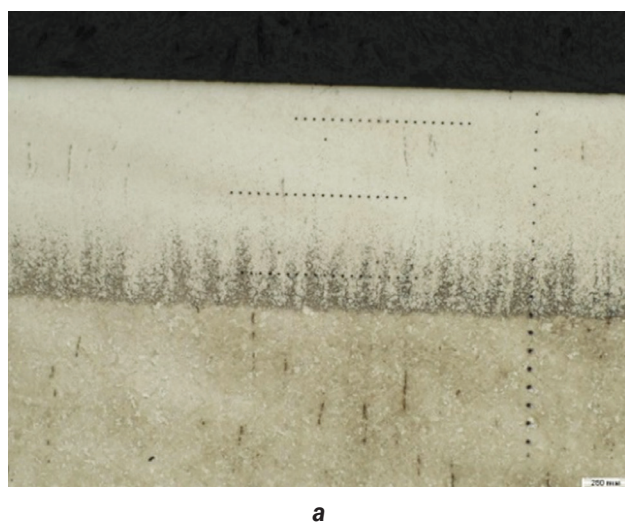


Рис. 3. Макроструктура образцов 27 (x50) (а) и 28 (x75) (б) на расстоянии от поверхности упрочнения
Fig. 3. Macrostructure of samples 27 (x50) (a) and 28 (x75) (b) at a distance from the hardening surface

⁶ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Введ. 01.01.1983. М.: Изд-во стандартов, 1983; 2003.

Таблица 3. Геометрические размеры элементов «пилообразной» структуры исследуемых образцов
Table 3. Geometric dimensions of the elements of the “sawtooth” structure of the studied samples

№ образца	Глубина упрочняющего слоя	Ширина зоны лазерного воздействия	Средние значения элементов модели мезоструктуры		
			A_{cp} – высота	B_{cp} – основание	Площадь
			мм		
20	1,61	18,5	0,35	0,17	0,0298
27	1,65	18,1	0,37	0,13	0,0240
28	1,65	19,2	0,367	0,14	0,0257
30	1,42	17,3	0,372	0,127	0,0236

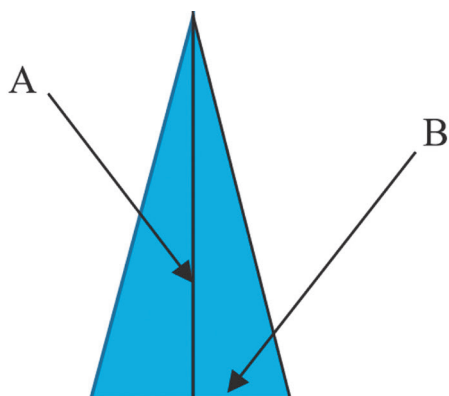


Рис. 4. Модель элемента мезоструктуры (A – высота, B – основание треугольника; A_{cp} и B_{cp} – средние значения по результатам измерений)

Fig. 4. Model of the mesostructural element: A – height of the triangular element, B – base; A_{avg} and B_{avg} – average values obtained from measurements

упрочнения (глубина ~0,4 мм) до ~4 мкм на границе с основным металлом (глубина ~1,4-1,65 мм). Формирование мелкозернистой структуры является следствием «жесткого» термического цикла лазерной обработки. В результате такого воздействия в металле формируется мелкозернистая и в отдельных случаях – равноосная, равномерно сориентированная по поверхности обработки, микроструктура (рис. 5).

Вполне очевидно, что такие факторы, как минимальный средний размер и равноосная конфигурация зерна, а также зарождение и формирование в матричных слоях «пилообразной» структуры и определяют высокие эксплуатационные характеристики упрочненного металла. Следует также отметить

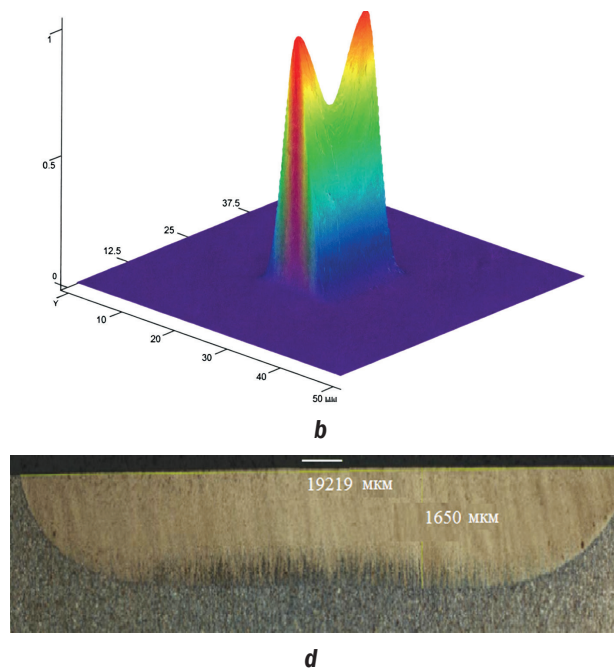
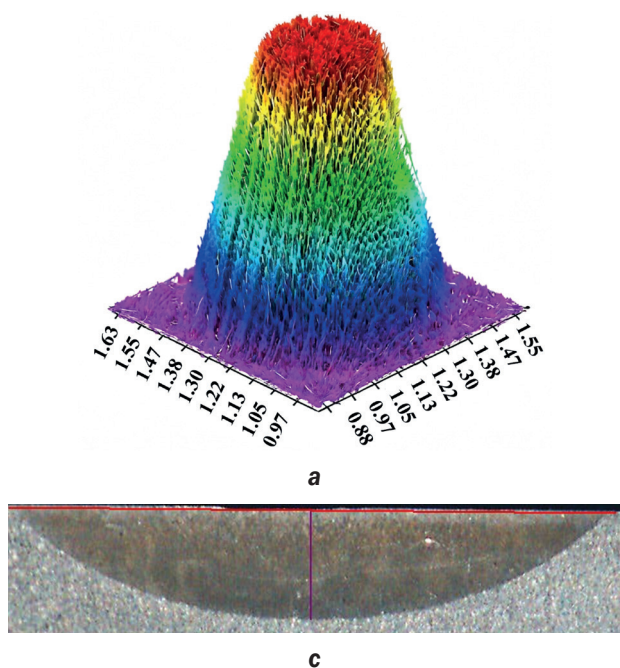


Рис. 5. Микрошлифы поверхностей, упрочненных круглым (а) и плоским (б) пятном, а также микрошлифы поверхностей, упрочненных с использованием оптической головки IPG FLW D50 (х25) (с) и устройства формирования пространственного профиля интенсивности лазерного пучка (х25) (д)

Fig. 5. Microsections of surfaces hardened with round (a) and flat (b) spots, as well as microsections of surfaces hardened using an IPG FLW D50 optical head (x25) (c) and a device for forming the laser beam spatial intensity profile (x25) (d)

относительно равномерное распространение (развитие) фрагментов «пилообразной» структуры из глубины упрочненного слоя вверх к поверхности, то есть в направлении преимущественного теплоотвода.

Измерения микротвердости (рис. 6, 7) подтвердили повышение твердости с HV 280–350 (основной металл) до HV 780–861 (упрочненный слой).

Микротвердость определяли на приборе DuraScan 20 вдоль направления упрочнения с шагом 0,05 и 0,1 мм по глубине упрочненного слоя. Глубина упрочненного слоя составила 1,42–1,65 мм, что соответствует требованиям к термообработке колесных пар.

Сравнение микроструктур после упрочнения пятном с гауссовым распределением и с использованием УФППИ (см. рис. 5) выявило ключевые преимущества последнего.

Неоднородный нагрев круглым пятном требует 20 % перекрытия зон, что приводит к образованию областей отпуска. Одновременно работа с расфокусированным лазерным лучом, направленная на повышение производительности, неизбежно требует увеличения мощности лазера.

В то же время использование УФППИ формирует зону воздействия, близкую к прямоугольной, и создает однородную мелкодисперсную мартенситную структуру по всему упрочненному слою.

Микроструктурный анализ (см. рис. 5 d, 7) подтверждает формирование при использовании УФППИ мартенситных структур с чередующимися полосами разной микротвердости (рис. 7).

В переходной зоне наблюдаются мартенситные превращения, а у границ бывших аустенитных зерен – структура, близкая к трооститу. Подложка состоит из пластинчатого перлита с ферритной сеткой. Микротвердость в зонах упрочнения достигает 840 HV (см. рис. 7).

Для количественной оценки преимуществ «пилообразной» структуры был проведен анализ ее геометрии (рис. 8).

Ключевым преимуществом «пилообразной» конфигурации (профиль 1 на рис. 8) является увеличение протяженности контактной границы в 3,2 раза по сравнению со сглаженным профилем (профиль 2), что улучшает адгезию и снижает концентрацию напряжений. Это повышает сопротивление деформации и усталостную прочность.

Сформированная структура представляет собой мартенсит с чередованием твердых (30–50 мкм) и пластичных участков, обеспечивающий повышенную вязкость при сохранении требуемой твердости. Такая архитектура благоприятно влияет на распределение напряжений при циклическом нагружении.

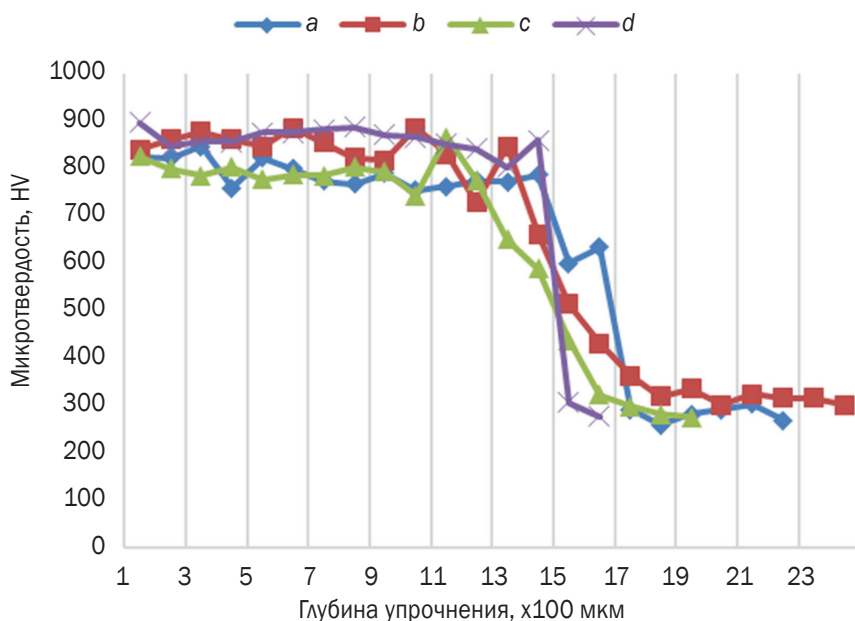


Рис. 6. Зависимость микротвердости от глубины упрочненного слоя на рабочих режимах для образцов 20 (a), 27 (b), 28 (c) и 30 (d)

Fig. 6. Microhardness vs hardened layer depth in the operating modes for samples 20 (a), 27 (b), 28 (c) and 30 (d)

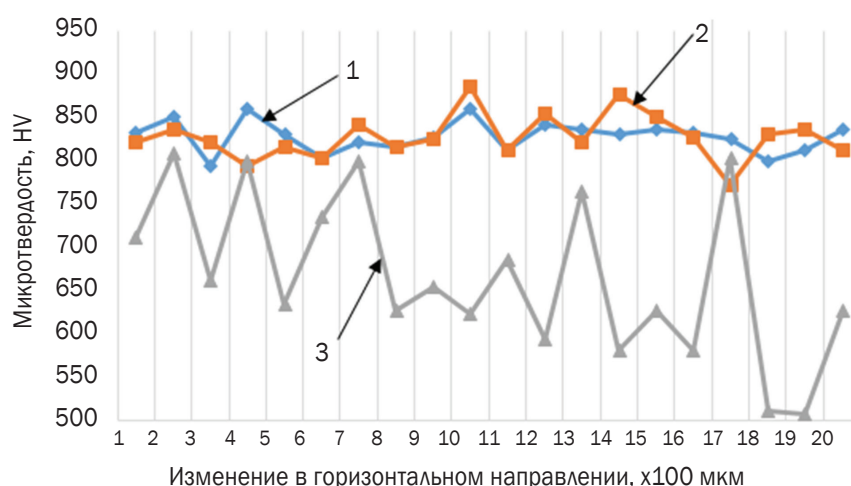
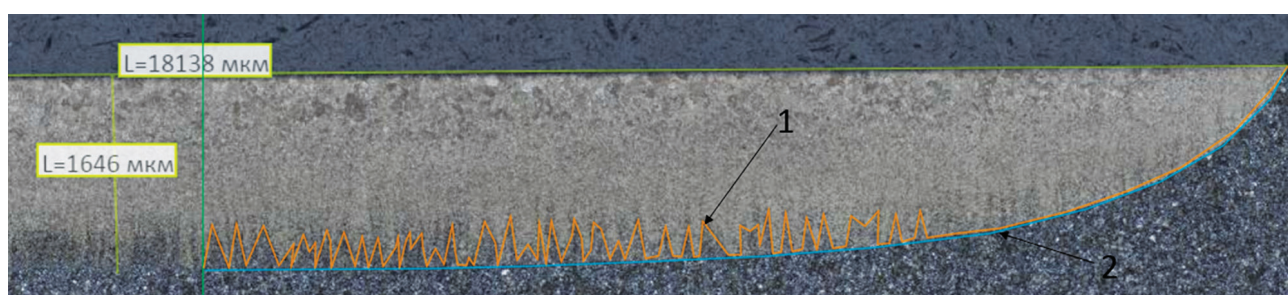
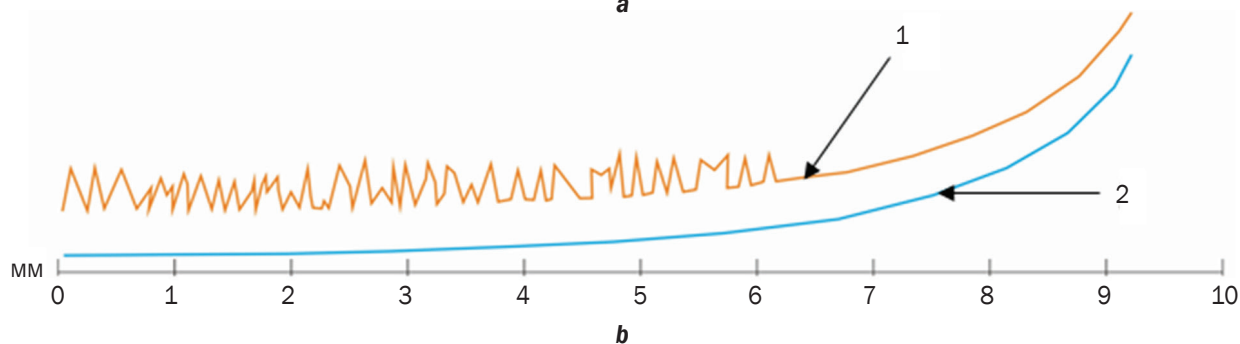


Рис. 7. Изменение значений микротвердости в горизонтальном направлении по 20-ти измерениям с шагом 50 мкм на расстоянии от поверхности упрочнения: 1 – 0,5 мм; 2 – 1 мм; 3 – 1,5 мм

Fig. 7. Change of microhardness values in the horizontal direction for 20 measurements with the step of 50 μm at a distance from the hardening surface: 1 – 0.5 mm; 2 – 1 mm; 3 – 1.5 mm



a



b

Рис. 8. Контуры границ перехода между слоями «упрочненный участок» и «основной металл» для образца № 27: 1 – пилообразная конфигурация, характерная для обработки с использованием устройства формирования пространственного профиля интенсивности; 2 – сглаженный вариант без выраженных экстремумов

Fig. 8. Contours of the transition boundaries between the “hardened section” and “base metal” layers for the sample no. 27: 1 – sawtooth configuration typical for the processing by a device for forming a spatial intensity profile; 2 – smoothed version without pronounced extremes

Лазерная закалка позволяет управлять геометрией структуры через технологические параметры, обеспечивая заданный уровень механических и эксплуатационных свойств. Для высокоуглеродистых сталей оптимальным является формирование «пилообразной» структуры с минимальным отноше-

нием высоты треугольника к основанию, что предотвращает образование трещин и хрупкое разрушение в контактной зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что лазерное упрочнение без расплавления

ния с использованием волоконного лазера и устройства формирования пространственного профиля интенсивности является высокоэффективной альтернативой традиционным методам закалки. Ключевым результатом является формирование в поверхностном слое специфической «пилообразной» мартенситной структуры, архитектуру которой можно целенаправленно управлять через технологические параметры обработки.

Установлено, что именно такая структура, в отличие от упрочнения круглым пятном с

гауссовым распределением, обеспечивает достижение требуемых показателей износостойкости и контактной прочности. Равномерная исходная структура материала способствует стабильности получаемых свойств, снижая риск отслоения упрочненного слоя и хрупкого разрушения.

Таким образом, разработанная технология лазерного упрочнения обеспечивает получение характеристик упрочненного слоя колесной стали, полностью соответствующих требованиям, предъявляемым к термообработанным колесным парам.

Список источников

1. Бирюков В.П., Шмелев С., Богданов А.В., Таксанц М.В., Штамм В.Г., Успенский С.А. Лазерное упрочнение стальных прямоугольным пятном для повышения ресурса их работы // Фотоника. 2019. Т. 13. № 6. С. 532–537. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FROS.2019.13.6.532.537>. EDN: SJIFKC.
2. Якубовский А.А., Бирюков В.П., Миряха А.Н. Оптимизация режимов лазерного упрочнения стальных для повышения их механических и триботехнических свойств // XXXV Междунар. инновационная конф. молодых ученых и студентов: сб. тр. конф. (г. Москва, 13–14 ноября 2023 г.). М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2023. С. 248–253. EDN: JBCZQE.
3. Nascimento E.J.G., dos Santos Magalhães E., dos Santos Paes L.E. A literature review in heat source thermal modeling applied to welding and similar processes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. Vol. 126. Iss. 7-8. P. 2917–2957. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11253-z>. EDN: TQELPN.
4. Криворотов В.И., Шмелев С.А., Богданов А.В., Муратов Р.Ч., Грезев Н.В., Зайцев Л.В. Применение метода коэрцитиметрии для оценки уровня остаточных напряжений при термической обработке железнодорожных колес // Сварочное производство. 2021. № 6. С. 42–50. <https://doi.org/10.34641/SP.2021.1039.6.028>. EDN: QUCDWI.
5. Ren D., Zhang P., Yu J., Yao Y., Li X. Study on the quenching depth and surface hardness of metal materials by laser quenching variable parameters // Frontiers in Physics. 2023. Vol. 10. P. 1115447. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1115447>. EDN: HJQPJO.
6. 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. Iss. 1-3. P. 1855–1860. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.276>. EDN: KLQSLX.
7. Yang K., Zhang T., Zhu Zh., Xu L., Lin S., Kou S., et al. Review of laser cladding coating on wear and fatigue of railway wheels/rails // Materials Science and Technology. 2024. Vol. 40. Iss. 9. P. 651–664. <https://doi.org/10.1177/02670836241236051>. EDN: LJLMXO.
8. Родионов Д.В., Люхтер А.Б., Прокошев В.Г. Расчет точек технологической траектории лазерного роботизированного комплекса относительно инструмента и оснастки в CAM // Научно-технические ведомости СПб-ГПУ. Информатика, телекоммуникации, управление. 2019. Т. 12. № 4. С. 123–135. <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.12410>. EDN: KWFENW.
9. Печников И.С., Завитков А.В., Люхтер А.Б. Лазерное упрочнение рабочей поверхности цилиндра двигателя внутреннего сгорания // Двигателестроение. 2024. № 3. С. 21–27. EDN: CRAJKC.
10. Локтев А.С., Завитков А.В., Печников И.С., Люхтер А.Б. Исследование влияния лазерного термоупрочнения на показатели упрочненного слоя и радиальное биение вала // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 11. С. 24–31. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2025-11-24-31>. EDN: CWZWJN.
11. Завитков А.В., Печников И.С., Локтев А.С., Фролов К.А., Люхтер А.Б. Исследование влияния лазерного термоупрочнения на износостойкость контактных поверхностей распределительных валов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева. 2023. № 2. С. 90–96.
12. Jiménez-Xamán M., Hernández-Hernández M., Tariq R., Landa-Damas S., Rodríguez-Vázquez M., Aranda-Arizmendi A., et al. Numerical simulations and mathematical models in laser welding: a review based on physics and heat source models // Frontiers in Mechanical Engineering. 2024. Vol. 10. P. 1325623. <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1325623>. EDN: QHZUEU.
13. Рафиков Р.Х., Шинкарук А.С., Кульков А.А., Горюнов Н.А. Упрочнение бандажей колесных пар локомотивов и моторвагонного подвижного состава // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1. С. 42–48. EDN: SKQEYT.

14. Lach L. Recent advances in laser surface hardening: techniques, modeling approaches, and industrial applications // *Crystals*. 2024. Vol. 14. Iss. 8. P. 726. <https://doi.org/10.3390/cryst14080726>. EDN: HCONTMS.
15. Хриптович Е.В., Шиганов И.Н., Пономаренко Д.В., Шмелев С.А., Ишкиняев Э.Д. Сравнительный анализ характеристик бандажей колесных пар, закаленных с использованием лазерного и плазменного источника тепла // *Мир транспорта*. 2022. Т. 20. № 3. С. 6–12. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-3-1>. EDN: KBCSPC.
16. Журавель В.М., Чирков А.М., Евстунин Г.А., Корякин Д.В., Шмелев С.А., Аракелян С.М. Технологии лазерного термоупрочнения сталей: монография. Владимир: ВлГУ, 2021. 159 с.
17. Звелто О. Принципы лазеров / пер. с англ.; под ред. Т.А. Шмаонова. 4-е изд. СПб.: Лань, 2008. 719 с. EDN: QMTDPJ.
18. Пат. № 2725685, Российская Федерация, С1. Перестраиваемый оптический формирователь масштабируемого плоского однородного лазерного пучка / В.И. Соколов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полюс». Заявл. 27.08.2019; опубл. 03.07.2020.
19. Королев С.А., Богданов А.В., Шмелев С.А., Бирюков В.П. Получение композитных структур при упрочнении колесной стали линейным профилем излучения иттербиевого волоконного лазера // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2020. № 5. С. 42–48. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-5-42-48>. EDN: XIGTHR.
20. Садовский В.Д., Табатчикова Т.И., Умова В.М., Осинцева А.А. 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. EDN: WQJTNZ.

References

1. Biryukov V.P., Shmelev S.A., Bogdanov A.V., Taskans M.V., Shtamm V.G., Uspensky S.A. Laser hardening of steels with a rectangular spot to increase their service life. *Photonics Russia*. 2019;13(6):532-537. (In Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FROS.2019.13.6.532.537>. EDN: SJIFKC.
2. Yakubovsky A.A., Biryukov V.P., Miriaha A.N. Optimization of laser hardening modes of steels to improve their mechanical and tribological properties. In: *35th International Innovative Conference of Young Scientists and Students: collected papers*. 13–14 November 2023, Moscow. Moscow: Mechanical Engineering Research Institute of the RAS; 2023, p. 248-253. (In Russ.). EDN: JBCZQE.
3. Nascimento E.J.G., dos Santos Magalhães E., dos Santos Paes L.E. A literature review in heat source thermal modeling applied to welding and similar processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;126(7-8):2917-2957. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11253-z>. EDN: TQELPN.
4. Krivorotov V.I., Shmelev S.A., Bogdanov A.V., Muratov R.Ch., Grezev N.V., Zaitsev L.V. Application of the method of coercimetry for assessing the level of residual stresses arising during the heat treatment of railway wheels. *Welding International Welding Production*. 2021;6:42-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.34641/SP.2021.1039.6.028>. EDN: QUCDWI.
5. Ren D., Zhang P., Yu J., Yao Y., Li X. Study on the quenching depth and surface hardness of metal materials by laser quenching variable parameters. *Frontiers in Physics*. 2023;10:1115447. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1115447>. EDN: HJQPJO.
6. 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;155-156(1-3):1855-1860. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.276>. EDN: KLQSLX.
7. Yang K., Zhang T., Zhu Zh., Xu L., Lin S., Kou S., et al. Review of laser cladding coating on wear and fatigue of railway wheels/rails. *Materials Science and Technology*. 2024;40(9):651-664. <https://doi.org/10.1177/02670836241236051>. EDN: LJLMXO.
8. Rodionov D.V., Lyukhter A.B., Prokoshev V.G. Calculation of the points of the technological trajectory of the laser robotic complex relative to the tool and tooling in the cam. *St. Petersburg Polytechnic University. Series: Computing, Telecommunications and Control*. 2019;12(4):123-135. (In Russ.). <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.12410>. EDN: KWFEHW.
9. Pechnikov I.S., Zavitkov A.V., Luchter A.B. Working surface laser hardening of the internal combustion engine cylinder. *Dvigatelsestroyeniye*. 2024;3:21-27. (In Russ.). EDN: CRAJKC.
10. Loktev A.S., Zavitkov A.V., Pechnikov I.S., Lyukhter A.B. Investigation of laser thermal hardening effect on the hardened layer parameters and radial shaft runout. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2025;11:24-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2025-11-24-31>. EDN: CWZWJN.
11. Zavitkov A.V., Pechnikov I.S., Loktev A.S., Frolov K.A., Lyukhter A.B. Study of the effect of laser thermo-hardening on the wear resistance of camshaft contact surfaces. *Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tehnologičeskoj akademii imeni P.A. Solov'eva*. 2023;2:90-96. (In Russ.). EDN: AAMJZL.
12. Jiménez-Xamán M., Hernández-Hernández M., Tariq R., Landa-Damas S., Rodríguez-Vázquez M., Aranda-Arizmendi A., et al. Numerical simulations and mathematical models in laser welding: a review based on physics and heat source models. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024;10:1325623. <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1325623>. EDN: QHZUEU.

13. Rafikov R.K., Shinkaruk A.S., Kulkov A.A., Goryunov N.A. Strengthening of wheelset bandages of locomotives and motor car rolling stock. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya*. 2024;1:42-48. (In Russ.). EDN: SKQEYT.
14. Lach L. Recent advances in laser surface hardening: techniques, modeling approaches, and industrial applications. *Crystals*. 2024;14(8):726. <https://doi.org/10.3390/cryst14080726>. EDN: HCONTMS.
15. Khriptovich E.V., Shiganov I.N., Ponomarenko D.V., Shmelev S.A., Ishkinyayev E.D. Comparative analysis of wheelsets tyres, hardened using a laser or plasma heat source. *World of Transport and Transportation*. 2022;20(3)66-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-3-1>. EDN: KBCSPC.
16. Zhuravel V.M., Chirkov A.M., Evstyunin G.A., Koryakin D.V., Shmelev S.A., Arakelyan S.M. *Laser thermal hardening technologies for steels: monograph*. Vladimir: Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs; 2021, 159 p. (In Russ.).
17. Zvelto O. Principles of lasers. (Russ. ed.: Zvelto O. *Principy lazerov*. St. Petersburg: Lan'; 2008, 719 p. EDN: QMTDPJ.
18. Sokolov V.I. *Tunable optical shaper of a scalable flat uniform laser beam*. Patent RF, no. 2725685; 2020. (In Russ.).
19. Korolyov S.A., Bogdanov A.V., Shmelyov S.A., Biryukov V.P. Composite structure manufacturing at wheel steel strengthening with linear radiation profile of ytterbium fiber laser. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2020;5:42-48. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-5-42-48>. EDN: XIGTHR.
20. Sadovsky V.D., Tabatchikova T.I., Umova V.M., Osintseva A.L. Phase and structural transformations under laser heating of steel. II. Effect of hardened steel tempering on the recrystallization process during laser heating. *Physics of Metals and Metallography*. 1984;58(4):812-817. (In Russ.). EDN: WQJTNZ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Криворотов Валерий Иванович,

кандидат технических наук,
советник генерального директора,
ООО «Инженерно-технологический центр
«Альянс сварщиков Санкт-Петербурга и
Северо-Западного региона»,
192289, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Софийская, д. 66, литера Б, помещ. 35
✉ kvi151149@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-6520-7500>

Завитков Алексей Викторович,

начальник конструкторско-технологического отдела,
ООО «Инжиниринговый центр при
Владимирском государственном университете»,
600014, Российская Федерация, г. Владимир,
ул. Белоконской, д. 3, корп. 4, литера А, помещ. 3;
научный сотрудник,
Научно-образовательный центр внедрения
лазерных технологий,
Владимирский государственный университет,
600000, Российская Федерация, г. Владимир,
ул. Белоконской, д. 3Б, корп. 4, ауд. 116, 117,
118 а, 118 б
zavitkov@laser33.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4323-5398>

Печников Илья Сергеевич,

начальник опытно-экспериментального производства,
Научно-образовательный центр внедрения
лазерных технологий,
Владимирский государственный университет,
600000, Российская Федерация, г. Владимир,
ул. Белоконской, д. 3Б, корп. 4, ауд. 116, 117,
118 а, 118 б
pechnikov@laser33.ru
<https://orcid.org/0009-0003-6727-8525>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery I. Krivorotov,

Cand. Sci. (Eng.),
Advisor to the General Director,
Engineering and Technology Center LLC
“Alliance of Welders of St. Petersburg
and North-Western Region”,
66/B Sofiyskaya St., office 35,
St. Petersburg 192289, Russian Federation
✉ kvi151149@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-6520-7500>

Aleksey V. Zavitkov,

Head of the Design and Technology Department,
Engineering Center at Vladimir State University LLC,
3A Belokonskaya St., block 4, office 3;
Researcher,
Scientific and Educational Center
for the Implementation of Laser Technologies,
Vladimir State University,
3B Belokonskaya St., block 4, offices 116, 117,
118a, 118b,
Vladimir 600000, Russian Federation
zavitkov@laser33.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4323-5398>

Ilya S. Pechnikov,

Head of the Experimental Production,
Scientific and Educational Center
for the Implementation
of Laser Technologies,
Vladimir State University,
3B Belokonskaya St., block 4, offices 116, 117,
118a, 118b,
Vladimir 600000, Russian Federation
pechnikov@laser33.ru
<https://orcid.org/0009-0003-6727-8525>

Марков Никита Алексеевич,

инженер опытно-экспериментального производства,
Научно-образовательный центр
внедрения лазерных технологий,
Владимирский государственный университет,
600000, Российская Федерация, г. Владимир,
ул. Белоконской, д. 3Б, корп. 4, ауд. 116, 117,
118 а, 118 б
mnikita.markovm@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-5180-7352>

Nikita A. Markov,

Pilot Production Engineer,
Scientific and Educational Center for the
Implementation of
Laser Technologies,
Vladimir State University,
3B Belokonskaya St., block 4, offices 116, 117,
118a, 118b,
Vladimir 600000, Russian Federation
mnikita.markovm@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-5180-7352>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку публикации.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный ва-
риант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all
the co-authors.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.02.2026 г.; одобрена
после рецензирования 06.04.2026 г.; принята к пу-
бликации 18.04.2026 г.

Information about the article

The article was submitted 27.02.2026; approved
after reviewing 06.04.2026; accepted for publication
18.04.2026.