



# Лазерное упрочнение сталей прямоугольным пятном для повышения ресурса их работы

В. П. Бирюков<sup>1</sup>, С. А. Шмелев<sup>2</sup>, А. В. Богданов<sup>3</sup>, М. В. Таксанц<sup>3</sup>, В. Г. Штамм<sup>2</sup>, С. А. Успенский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А. А. Благоднравова РАН, Москва, Россия; [laser-52@yandex.ru](mailto:laser-52@yandex.ru)

<sup>2</sup> ООО НТО «ИРЭ-Полюс», г. Фрязино, Моск. обл., Россия

<sup>3</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Стремительное развитие источников лазерного излучения и внешних оптических систем требует совершенствования методов расчета геометрических параметров упрочненных зон. В работе представлен краткий обзор по лазерному упрочнению сталей лазерным пятном прямоугольной формы. Приведены результаты расчета глубины и ширины упрочненных зон колесной стали лазерным пятном прямоугольной формы, полученные по уравнениям регрессии первого порядка, при равной погонной энергии излучения. Показано, что при лазерном упрочнении на различных режимах износостойкость колесной стали повышается в 2,14–3 раза, при этом снижается изнашивание рельсовой стали.

**Ключевые слова:** лазерное упрочнение, микротвердость, интенсивность изнашивания

Статья получена: 03.09.2019. Принята к публикации: 04.10.2019.

## Laser Hardening of Steels with a Rectangular Spot to Increase Their Service Life

V. P. Biryukov<sup>1</sup>, S. A. Shmelev<sup>2</sup>, A. V. Bogdanov<sup>3</sup>, M. V. Taskans<sup>3</sup>, V. G. Shtamm<sup>2</sup>, S. A. Uspenskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal state budgetary Institution of Science A. A. Blagonravova Russian Academy of Machines Sciences, Moscow, Russia; [laser-52@yandex.ru](mailto:laser-52@yandex.ru)

<sup>2</sup> LLC NTO «IRE-Polus», Fryazino, Moscow region, Russia

<sup>3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The rapid development of laser radiation sources and external optical systems requires improvement of methods for calculating the geometric parameters of hardened zones. The paper presents a brief overview of laser hardening steels laser spot rectangular shape. The results of the calculation of the depth and width of the hardened zones of the wheel steel rectangular spot, obtained by the regression equations of the first order, with equal linear radiation energy. It is shown that the wear resistance of the wheel steel increases by 2.14–3 times with a decrease in the wear of the rail steel during laser hardening in different modes.

**Keywords:** laser hardening, microhardness, wear intensity

Received: 03.09.2019. Accepted: 04.10.2019.

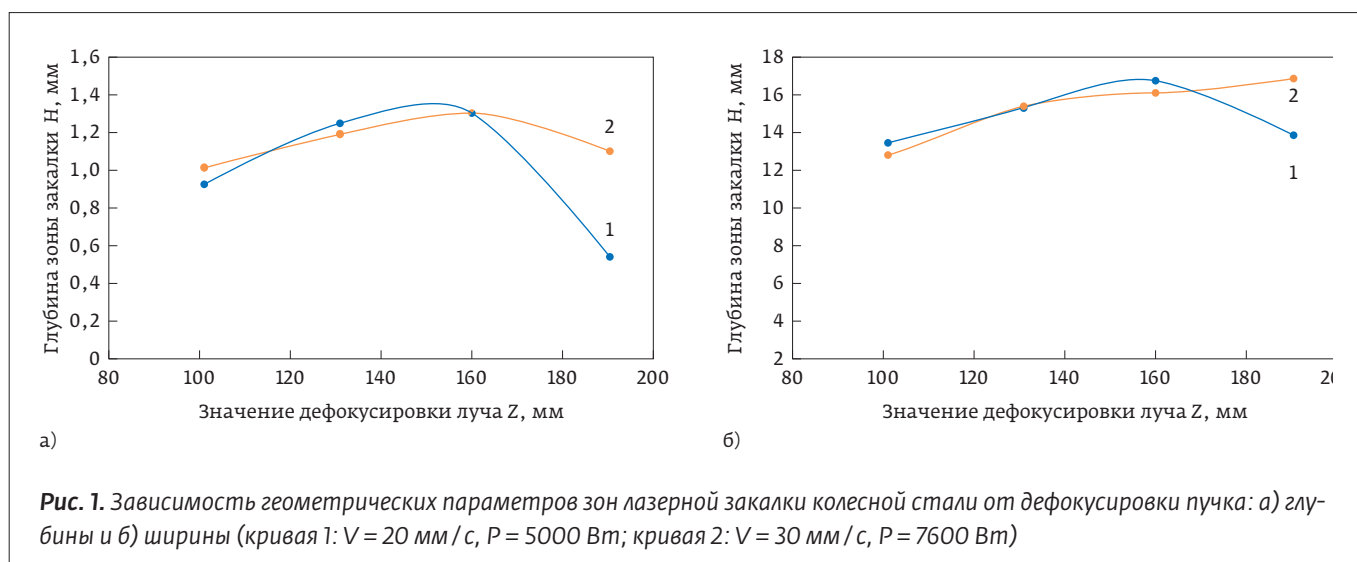
## ВВЕДЕНИЕ

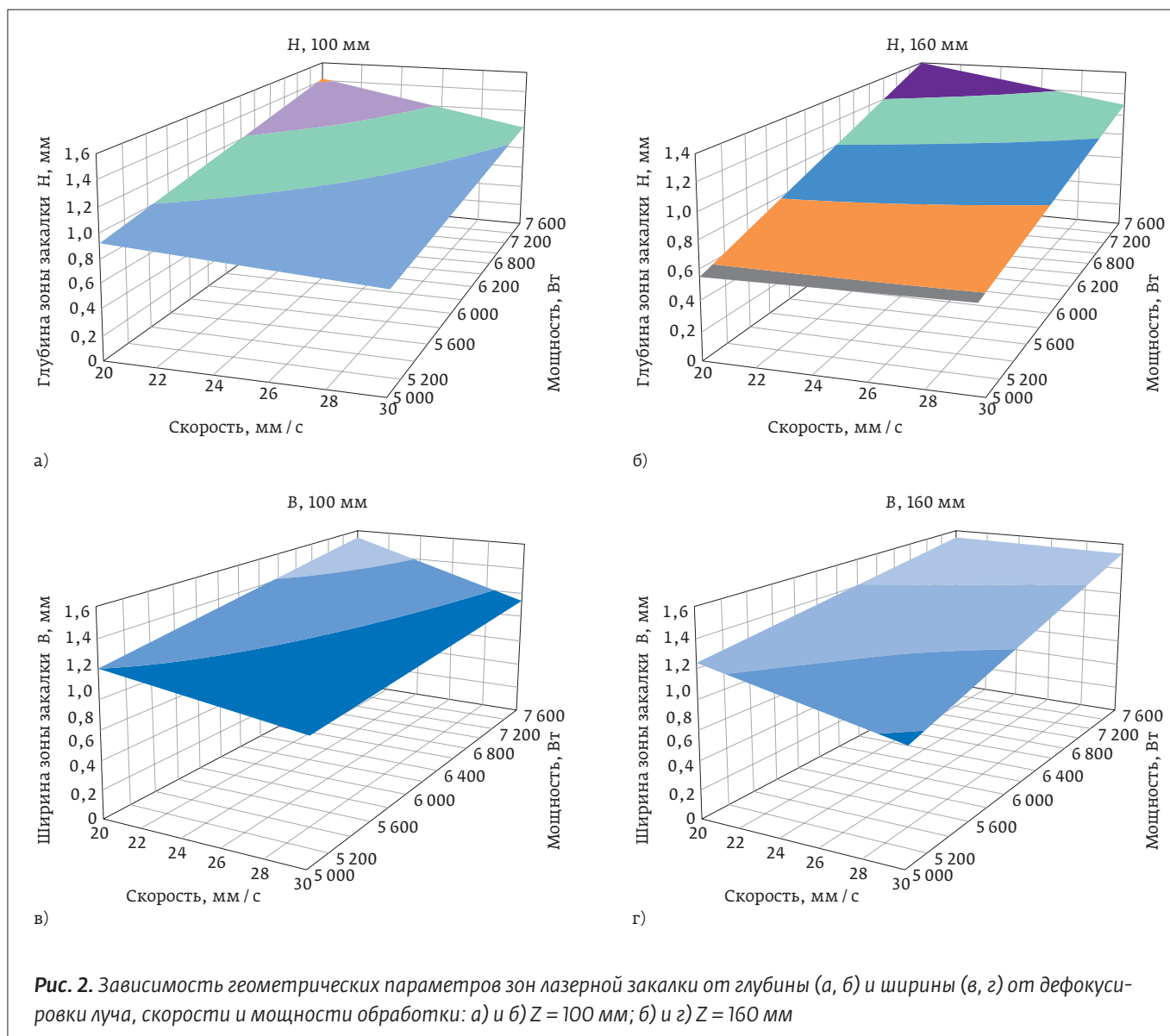
Применение новых технологических процессов с использованием лазерного излучения сдерживается недостаточной изученностью влияния параметров лазерной обработки, мощности, скорости перемещения луча и их взаимного влияния на параметры отклика системы, т.е. на глубину, ширину и твердость упрочненного слоя. Вторым немаловажным фактором является производительность процесса, которая возрастает с появлением новых типов лазерных источников и оптических внешних систем.

Лазерное упрочнение углеродистой стали AISI 4130 проводилось при помощи диодного лазера высокой мощности с использованием методологии расчета на основе поверхности отклика [1]. В качестве входных технологических параметров рассматривалась скорость сканирования поверхности 4–7 мм/с, мощность лазера 1200–1600 Вт и положение фокальной плоскости относительно поверхности образца или дефокусировка 0–20 мм. Размер лазерного пятна в фокальной плоскости составлял 1,5×8 мм. В качестве характеристик, полученных в результате обработки откликов системы, рассматривалась геометрия сечения упрочненной поверхности, средняя микротвердость и процентное содержание ферритной фазы. Было выявлено, что при снижении скорости сканирования и увеличении мощности лазера происходит увеличение геометрических размеров зоны упрочнения и ее твердости. При проведении оптимизации режимов лазерного упрочнения стали AISI 4130 установлено, что скорость сканирования  $V=4,45$  мм/с, мощность лазера  $P=1491$  Вт, положение фокальной плоскости

$F=62$  мм, при этих параметрах плотность мощности составляет  $84$  Вт/мм<sup>2</sup>. При оптимальных режимах обработки твердость повышается до  $798$  HV и в 3 раза превышает твердость основного металла  $265$  HV при глубине  $1,310$  мм и ширине  $9,883$  мм упрочненной зоны. Установлено, что лазерная закалка с перекрытием дорожек 50% имеет более однородную твердость поверхности образца, чем при перекрытии дорожек 30%. Лазерное упрочнение поверхности углеродистой стали AISI 4130 приводит к изменению исходных фаз основного металла на мартенситную фазу. Выявлено, что меньшее процентное содержание феррита в фазах микроструктуры способствует повышению твердости. Изменение положения головки от фокальной плоскости в пределах 20 мм приводит к изменению средней микротвердости в пределах от 700 до 300 HV, что негативно скажется при обработке фасонных поверхностей, имеющих значительное отклонение от горизонтальной плоскости.

Лазерное упрочнение улучшенной стали AISI P20 с размерами образцов  $100 \times 150 \times 15$  мм проводили с использованием диодного лазера с максимальной мощностью 4 кВт лазерным пятном в фокальной плоскости  $24 \times 1$  мм [2]. Скорость сканирования луча лазера составляла 5,0 мм/с, фокусное расстояние 310 мм, плотность лазерной энергии 220, 315 и 420 Дж/мм<sup>2</sup> при температуре поверхности образца 1000, 1200 и 1500 °С. Для испытаний на фреттинг-износ использовали машину возвратно-поступательного трения RFW160, контробразцом был шарик из  $Al_2O_3$  диаметром 10 мм. Размер образцов составлял  $40 \times 40 \times 10$  мм. Испытания выполняли при нормальных нагрузках 10, 20 и 30 Н, количестве циклов 30 000, частоте

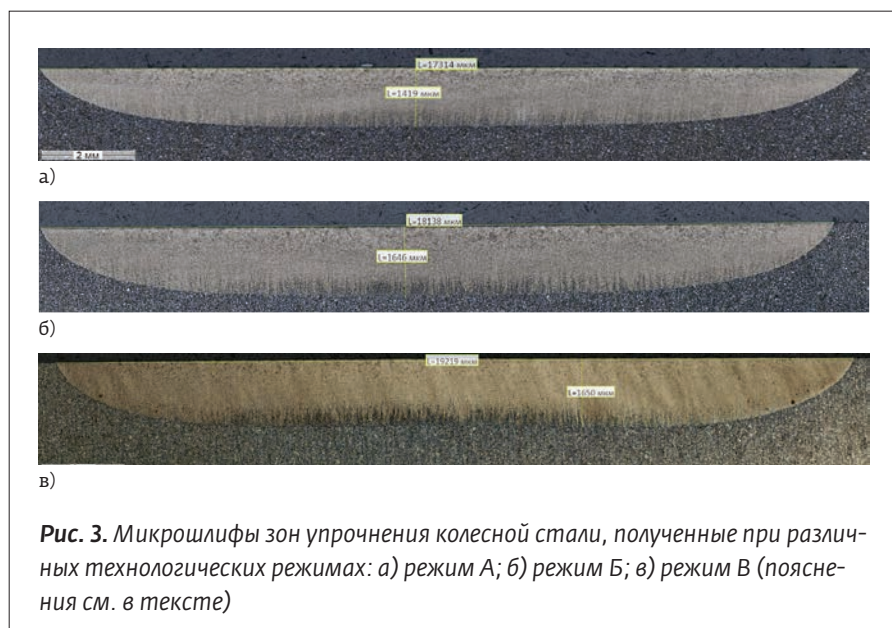




микро перемещений 4 Гц, и амплитуде смещения 300 мкм. Испытание на износ без смазочного материала проводилось по схеме ролик-колодка на машине трения BRW-150. Наружный диаметр ролика из стали S45C составлял 45 мм, тогда как размер колодки  $16 \times 5 \times 10 \text{ мм}$ . Скорость скольжения и расстояние составляло 0,236 м/с и 1300 м соответственно, при нормальной нагрузке 170, 255 и 340 Н. При лазерной обработке с плотностью энергии 420 Дж/мм<sup>2</sup> в среднем глубина зоны закалки составляла  $754 \pm 44 \text{ мкм}$ , тогда как при 220 и 315 Дж/мм<sup>2</sup> глубина зон составляла  $490 \pm 35$  и  $631 \pm 25 \text{ мкм}$  соответственно. Твердость упрочненных слоев составляла 545, 610 и 657 HV при 220, 420 и 315 Дж/мм<sup>2</sup> соответственно, что значительно выше, чем твердость материала основы

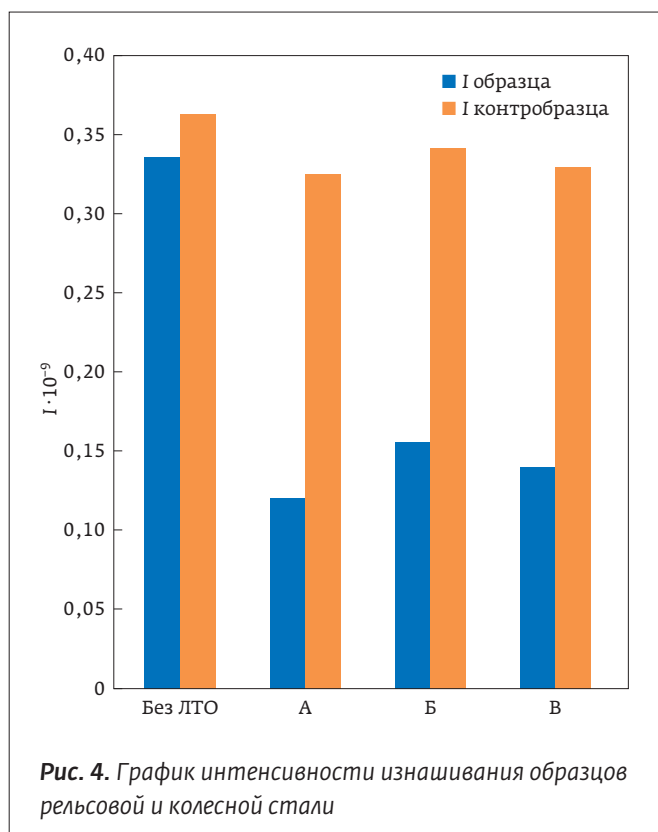
307 HV. При испытании на фреттинг-износ меньшие значения коэффициента трения получены на образцах закаленных с плотностью энергии 315 и 420 Дж/мм<sup>2</sup>. Совокупная потеря массы составляет  $3,76 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$  на 10 000 циклах и  $7,71 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$  на 30 000 циклов. Износ при 30 000 циклов уменьшился на 44,6% по сравнению с материалом основы. Испытания на износ по схеме ролик-колодка показали, что износостойкость повышается при увеличении поверхностной твердости.

Валы диаметром 50 мм из стали 42CrMo4 (AISI 4140) были закалены с использованием гомогенизированного лазерного пятна с размером пятна  $16 \times 4 \text{ мм}^2$  с оптимизированным распределением интенсивности излучения [3]. Обработка на скоростях 400 и 500 мм/мин позволила полу-



чить упрочненные слои толщиной 1 и 0,72 мм соответственно.

Образцы стали 40Х с размерами 10×10×30 мм упрочняли с помощью диодного лазера компании Laserline LDF 6000-100 [4]. Размер лазерного пятна на поверхности образца составлял 25×6 мм. Максимальная микротвердость упрочненного слоя состав



вила  $697 \pm 11$  HV<sub>0,5</sub>. Она получена при мощности излучения 1150 Вт и скорости сканирования луча 8 мм/с, что в 3 раза выше твердости материала основы  $230 \pm 3$  HV<sub>0,5</sub>. Глубина слоя составила 913,5–964,5 мкм. Для испытаний на ударно-абразивное изнашивание использовали машину трения MLD-10. Энергия удара составляла около 2,5 Дж. В качестве контрообразца использовали ролик из стали 40Х с наружным диаметром 59 мм с твердостью 57 HRC. Частота вращения ролика 200 мин<sup>-1</sup>. В зону трения подавался кварцевый песок с размером частиц 2000–4000 мкм с твердостью 800–1200 HV. Его расход был

40 кг/ч. Продолжительность испытаний 20 мин. Испытания на ударно-абразивное изнашивание показали, что износостойкость закаленных лазером образцов в два раза выше материала основы.

Целями работы были задачи определения влияния дефокусировки прямоугольного луча волоконного лазера на глубину и ширину зон лазерного упрочнения, проведение полного факторного эксперимента на линейных участках и определение износостойкости колесной стали.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лазерное упрочнение образцов колесной стали выполняли на фрагментах колеса толщиной 30 мм с помощью лазерного комплекса на основе волоконного лазера LC10, оснащенного оптическим формирователем, состыкованным с коллиматором IPC D50F120 и закрепленными на подвижном фланце руки робота KR120HA. Диаметр транспортного волокна 200 мкм. С помощью цилиндрической линзы и ортогонально ей расположенной призме Френеля получено лазерное пятно в фокальной плоскости 11×1 мм [5]. Обработку выполняли при мощности излучения лазера 5000 и 8600 Вт, скорости перемещения луча 20 и 30 мм/с, дефокусировке луча в пределах 100–190 мм. Металлографические исследования проводили с использованием микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н, цифрового микроскопа AM413ML, металлографического микроскопа Альтами МЕТ 1С. Образцы для испытаний на износ с размерами 12×20×70 мм фрезеровали из фрагментов колесной стали. Испы-

## Уровни факторов эксперимента

Фактор $z_i$	Верхний уровень фактора	Нижний уровень фактора	Центр плана	Интервал варьирования	Зависимость кодированной переменной от натуральной
$P$ (Вт)	7600	5000	6300	1300	$x_1 = \frac{P_i - 6300}{1300}$
$V$ (мм/с)	30	20	25	5	$x_2 = \frac{V_i - 25}{5}$
$Z$ (мм)	160	100	130	30	$x_3 = \frac{Z_i - 130}{30}$

тания на износ проводили на машине трения МТУ-01 по схеме плоскость (колесная сталь)–кольцо (рельсовая сталь). В качестве смазочного материала использовалась пластичная смазка «ПУМА». Удельное давление составляло 1 МПа, скорость скольжения 1,57 м/с.

С помощью метода полного факторного эксперимента (ПФЭ) определяли влияние режимов обработки на параметры упрочненных дорожек [6]. В качестве факторов эксперимента были выбраны мощность излучения  $P$ , Вт, скорость обработки  $V$ , мм/с и дефокусировка луча  $Z$ , мм. Для построения математических моделей в качестве откликов системы рассматривались глубина  $H$  и ширина  $B$  зон лазерной закалки. В таблице представлены уровни факторов эксперимента.

По окончании экспериментов изготавливались шлифы по стандартной методике и производились трехкратные измерения глубины и ширины закаленных зон. В расчете определялись все возможные взаимодействия факторов. Поскольку выполнялся ПФЭ  $2^3$ , количество экспериментов составило 8 в каждой серии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам металлографических исследований упрочненных зон в первой серии экспериментов построены графики зависимости глубины и ширины зон закалки от изменения расстояния до фокальной плоскости  $Z$  при погонной энергии луча 250 Дж/мм на рис. 1 (а, б). Глубина и ширина зоны закалки изменяется линейно в интервале 100–160 мм и, поэтому этот участок можно описать уравнениями регрессии первого порядка [6].

Во второй серии экспериментов получены уравнения регрессии при дефокусировке луча 100–160 мм. Глубина зон упрочнения:

$$H = 0,976255 + 0,26125x_1 + 0,06375x_3 - 0,06875x_1x_2 - 0,07625x_1x_3 - 0,03125x_2x_3, \quad (1)$$

где  $x_1$  – мощность излучения  $P$ (Вт);  $x_2$  – скорость  $V$  (мм/с);  $x_3$  – расстояние до фокальной плоскости  $Z$  (мм).

Ширина зоны упрочнения:

$$B = 14,75 + 1,65x_1 - 1,075x_2 - 0,475x_3 - 0,525x_1x_3 - 0,35x_2x_3 - 0,65x_1x_2x_3. \quad (2)$$

По уравнениям регрессии (1–2) проведены расчеты, и сопоставлены с результатами эксперимента. Расчетные значения отличаются от фактических значений глубины и ширины зон закалки, не более чем на 5%. Регрессионные модели зависимостей типа  $H(P, V)$ ,  $B(P, V)$  введены в табличный редактор MsExcel, и с их помощью построены сравнительные поверхности для визуализации этих функций (рис. 2).

Анализ результатов расчетов показал, что преобладающее влияние на геометрические параметры зон закалки имеет мощность излучения (рис. 2а, б). С увеличением мощности растут ширина и глубина зоны закалки. Экспериментальные результаты и теоретические расчеты подтвердили, что с ростом скорости перемещения глубина и ширина закаленных зон уменьшается, а с увеличением дефокусировки глубина и ширина зон закалки возрастает.

На рис. 3 представлены микрошлифы зон упрочнения колесной стали, полученные при разных



технологических режимах: режим А ( $P=7,6$  кВт,  $V=20$  мм/с,  $Z=130$  мм), режим Б ( $P=8,6$  кВт,  $V=20$  мм/с,  $Z=160$  мм) и режим В ( $P=8,6$  кВт,  $V=20$  мм/с,  $Z=190$  мм). Микротвердость зон лазерной закалки изменялась в пределах 7500–8500 МПа. Обработка при равной погонной энергии излучения 250 Дж/мм дает близкие по микротвердости и геометрическим параметрам зоны лазерной закалки.

По результатам испытаний на изнашивание установлено, что максимальная износостойкость, величина, обратная интенсивности изнашивания, получена при лазерной закалке по режиму А (рис. 4). Она превышает износостойкость материала основы образца в три раза. Следует отметить, что режимы Б и В также имеют достаточную износостойкость, и обеспечивают большую ширину 18138–19212 мкм и глубину закаленного слоя 1646–1650 мкм соответственно, и могут быть использованы для упрочнения гребней колес как для пассажирского, так и для грузового подвижного состава. Меньшая интенсивность изнашивания рельсовой стали, полученная при испытании образцов упрочненных на трех режимах лазерной закалки, приведет к повышению ресурса работ в целом пары колесо–рельс.

Использование прямоугольного лазерного пятна повышает производительность процесса лазерной закалки в 2–3 раза по сравнению с обработкой круглым пятном.

## ВЫВОДЫ

В рамках проекта была найдена зависимость влияния на геометрические параметры зон лазерного упрочнения (глубину и ширину) дефокусировки прямоугольного луча волоконного лазера. Проведенные исследования привели к следующим выводам:

1. Получены линейные уравнения регрессии при дефокусировке луча в диапазоне 100–160 мм, позволяющие рассчитать глубину и ширину зон закалки с погрешностью не более 5%.
2. Построены поверхности, визуализирующие закономерность изменения параметров закаленных зон от режимов обработки.
3. Обнаружено, что интенсивность изнашивания упрочненной лазерным лучом колесной стали в 2,14–3 раза ниже материала основы колеса в зависимости от режимов обработки.

## ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА В РАБОТУ

Идея проведения эксперимента, организация и руководство проектом: В. П. Бирюков и А. В. Богданов; дизайн эксперимента: В. П. Бирюков, М. В. Таксанц; проведение эксперимента: С. А. Шмелев, В. Г. Штамм и С. А. Успенский; обработка результатов: В. П. Бирюков и С. А. Шмелев. Все авторы внесли вклад в написание рукописи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Moradi M., Karami Moghadam M.** High power diode laser surface hardening of AISI 4130; statistical modelling and optimization. *Optics and Laser Technology* 111 (2019) 554–570
2. **Park C., et al.** Influence of laser surface engineering of AISI P20-improved mold steel on wear and corrosion behaviors. *Surface and Coatings Technology*. 2019;377:124852. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.08.006>.
3. **Klocke F., Schulz M. Gräfe S.** Optimization of the Laser Hardening Process by Adapting the Intensity Distribution to Generate a Top-hat Temperature Distribution Using Freeform Optics. *Coatings*. 2017; 7(6): 77; doi:10.3390/coatings7060077.
4. **Chen Z. et al.** Behaviors of 40Cr steel treated by laser quenching on impact abrasive wear. *Optics and Laser Technology*. 2018; 103:118–125.
5. **Богданов А. В., Соколов В. И., Шмелев С. А.** Выбор оптимальных конфигураций оптических схем для задачи лазерной термообработки стальных изделий. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2017; 10:32–37.
6. **Bogdanov A. V., Sokolov V. I., Shmelev S. A.** Vybór optimal'nyh konfiguracij opticheskikh skhem dlya zadachi lazernoj termooobrabotki stal'nyh izdelij. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2017; 10:32–37.
7. **Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И.** Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М: Наука. 1980.
8. **Evdokimov YU. A., Kolesnikov V. I., Teterin A. I.** Planirovanie i analiz eksperimentov pri reshenii zadach treniya i iznosa. – М: Nauka. 1980.



### БАШНЯ ВЫТЯЖКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОЛОКОН

Башня вытяжки OFC 205F компании Некстром предназначена для производства кварцевых волокон, мягкого стекла, стержней и капилляров. Обладая технологиями производства PM, PCF, LMA, тонких волокон, нанесения различных покрытий мы предлагаем нашим заказчикам весь комплекс оборудования для производства волокон специального назначения.

Российское представительство компаний  
Розендаль Машинен ГмБХ & Некстром ОЙ



[www.rosendahlnextrom.com](http://www.rosendahlnextrom.com)



111020 Москва, Россия, Ул. Сторожевая 4, офис 203-206
Тел/факс: +7 499 271 3439
Моб: +7 915 751 6504
[elena.romanova@rosendahlnextrom.com](mailto:elena.romanova@rosendahlnextrom.com)