

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2022-17-8-12>

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ СТАЛЕЙ

Бирюков В.П.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Москва, Россия*

Ключевые слова: лазерное упрочнение, микротвердость, абразивный износ.

Аннотация. Работа посвящена определению влияния режимов лазерной закалки на размеры упрочненных зон, их микротвердость и абразивную стойкость при трении по незакрепленному абразивному зерну. Получены закономерности изменения параметров зон упрочнения от режимов обработки. При увеличении мощности и уменьшении скорости лазерной закалки глубина и ширина слоя возрастают. Увеличение диаметра лазерного пятна в исследованном диапазоне приводит к росту глубины и ширины зон закалки. Абразивная износостойкость образцов, с наложением дорожек закалки 12% и без наложения дорожек, была выше в 2,36-3,26 раза по сравнению с исходной сталью.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF LASER HARDENING MODES ON THE MECHANICAL AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF FRICTION SURFACES OF STEELS

Biryukov V.P.

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

Keyword: laser hardening, microhardness, abrasive wear.

Abstract. The work is devoted to determining the effect of laser quenching modes on the size of hardened zones, their microhardness and abrasive resistance to friction on loose abrasive grain. The regularities of changes in the parameters of the hardening zones from the processing modes are obtained. As the power increases and the laser quenching speed decreases, the depth and width of the layer increase. An increase in the diameter of the laser spot in the studied range leads to an increase in the depth and width of the quenching zones. The abrasive wear resistance of the samples, with the imposition of hardening tracks of 12% and without the imposition of tracks, was higher by 2.36-3.26 times compared to the original steel.

В экспериментах по лазерному упрочнению [1] использовали стальные образцы 40CrNiMo (320 HV_{0,5}) с размерами 50×40×8 мм. Обработку выполняли волоконным лазером ZKSX-3000-D01, Китай, при скорости сканирования лазера 700 и 800 мм/мин, мощности луча составляла 2010 Вт, и размере лазерного пятна составлял 1×14 мм. Твердость поверхности образцов после лазерной закалки по Виккерсу составила 753±7 HV_{0,5} и 797±8 HV_{0,5} при скоростях обработки 700 и 800 мм/мин соответственно, или в переводе по Роквеллу 62,2±0,4 HRC и 63,8±0,5 HRC. Испытание проводилось при возвратно-поступательном движении между шариком GCr15 (63HRC) с радиусом 6,25 мм с шероховатостью 0,32 мкм и образцом проводилось с

использованием машины трения CFI-1. Стальной шарик был зафиксирован и удерживался неподвижно, а образец стали 40CrNiMo после лазерной закалки был закреплен в нижней подвижной пластине. Во время эксперимента образцы погружали в смазочное синтетическое масло Wall 4011. Диапазон температур испытаний составлял 20-200°C, скорость скольжения 300, 400, 500 мм/мин, нагрузка 20Н. Минимальная скорость изнашивания и коэффициент трения получены на образцах при 20°C, скорости обработки 800 мм/мин и трении скольжения 300 и 500 мм/мин соответственно. С увеличением температуры испытаний скорость изнашивания и коэффициент трения возрастали.

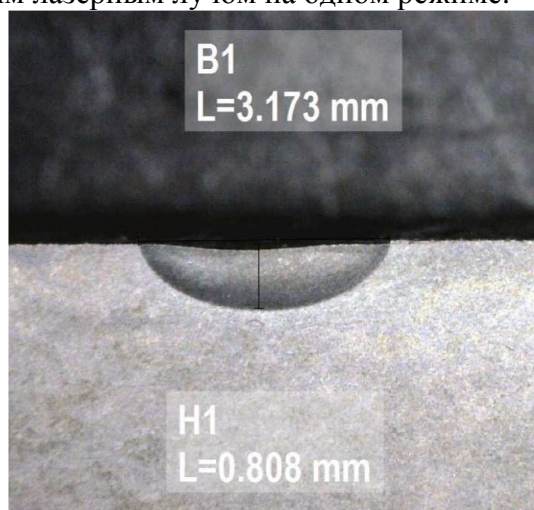
Образцы для лазерного упрочнения [2] были вырезаны из головки рельса и обода колеса подвижного состава сталей U71Mn (0,65-0,76 %C) и CL 60 (0,57-0,60 %C) соответственно, чтобы гарантировать соответствие материалов и конструкций реальной паре трения качения рельс-колесо. Лазерную закалку выполняли волоконным лазером (YLR-6000, IPG) с максимальной мощностью 6 кВт и длиной волны 1,07 мкм. Лазерный луч пропусклся по волокну с сердцевинной диаметром 200 мкм и фокусировался линзой, формирующей его, для получения сглаженного профиля интенсивности излучения. Обработку выполняли отдельными круглыми пятнами и дорожками с различной площадью лазерной закалки 0; 28; 48,6; 49,8 и 100% диаметром луча 1, 2, 3, 4 мм и мощностью излучения 200, 350, 550, 1200 с глубиной зон упрочнения 0,095; 0,45; 0,64; 0,74 соответственно. Испытания на трение качения проводили по схеме «ролик-ролик» диаметром 60 мм шириной 10 мм с погонной нагрузкой 60 кг/м на машине для определения износа и контактной усталости WTY-1. Проскальзывание составляло 2%. Образцы из колесной стали были закалены до HRC50-55 с помощью токов высокой частоты (ТВЧ). Твердость образцов в зоне лазерной закалки составляла HV750~850, переходной зоны HV400 ~ HV500, а средняя твердость подложки была около HV300. Относительная износостойкость образцов была выше, чем у материала основы, и составила 40,3; 9,7; 2,5 и 1,2 соответственно, уменьшаясь с уменьшением соотношения глубины закалки и площади упрочнения. Благодаря эффекту высокой твердости мартенситных зон лазерной закалки и высокой ударной вязкости рельсовой стали возможно увеличение срока службы рельсов в 2,2-3,5 раза без значительной потери их контактной усталостной прочности.

Для лазерной закалки использовали образцы [3] стали 40X с размерами 12×20×70 мм. Плотность энергии изменяли в пределах 39,2-84,9 Вт·с/мм². Определяли влияние скорости перемещения луча и частоты его поперечных колебаний 78-230 Гц на геометрические размеры зон закалки и их триботехнические характеристики. При частоте колебаний луча 214 Гц получены максимальные значения упрочненных зон. Проведенные испытания на трение и износ на образцах, упрочненных с перекрытием лазерных дорожек 10%, показали, что коэффициенты трения 0,065-0,08, полученные на закаленных лазерным лучом образцах значительно ниже, чем образцов стали 40X, а износостойкость выше материала основы в 4 раза.

Целями настоящей работы было определение влияния режимов лазерной закалки на размеры упрочненных дорожек и абразивной стойкости закаленных лазерным лучом образцов.

Экспериментальные работы по лазерному упрочнению проводили на автоматизированном комплексе ИМАШ РАН. Лазерную закалку образцов стали 70Г с размерами $12 \times 20 \times 70$ мм выполняли при изменении мощности излучения в пределах 700-1000 Вт, скорости перемещения 5-10 мм/с, диаметре пятна 3,5-5,4 мм. Кроме того, лазерную закалку выполняли с поперечными колебаниями луча с частотой 216 Гц. Металлографические исследования выполняли с применением цифровых и металлографических микроскопов. Шлифы изготавливали по стандартной методике. Измерение микротвердости проводили микротвердомере ПМТ-3. Испытания на абразивный износ выполняли по схеме плоский образец с лазерной закалкой – образующая поверхность резинового диска. В зону трения подавали кварцевый песок с размером частиц 200-600 мкм. Продолжительность испытаний составляла 10 минут при нагрузке 15 Н. Результаты испытаний оценивались, как среднее арифметическое потери массы по трем исследованным образцам, упрочненным лазерным лучом на одном режиме.

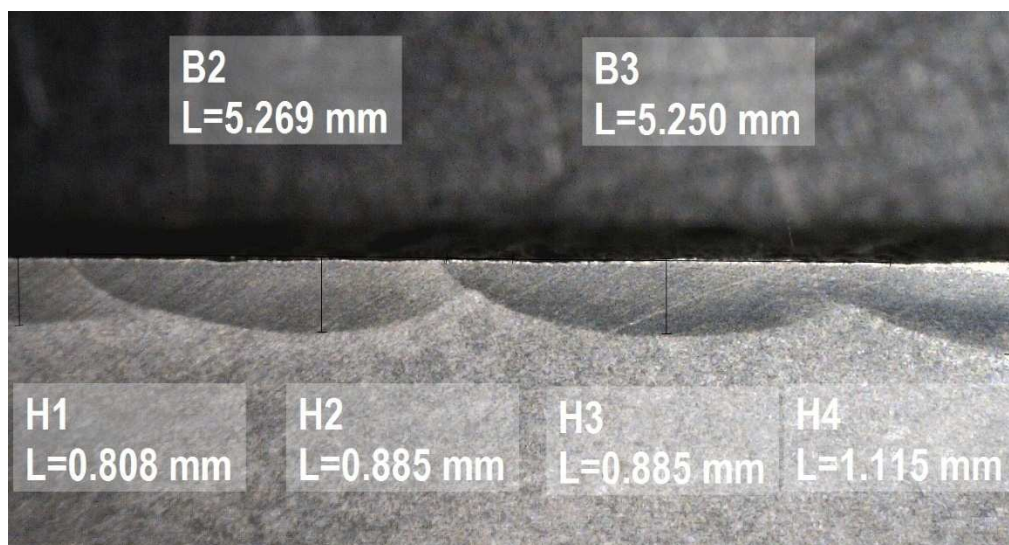
По результатам металлографических исследований установлено, что ширина и глубина зон закалки расфокусированным и колеблющимся лучом изменялась в пределах 2,8-3,4; 4,8-6,9 мм и 0,75-0,96; 0,76-1,18 мм соответственно. Площадь зон закалки и производительность обработки при использовании поперечных колебаний луча возрастали в 1,56-2,25 раза по сравнению с упрочнением расфокусированным лучом. На рисунке 1 представлены микрошлифы зон лазерной закалки расфокусированным (рис. 1, а) и колеблющимся лучом с наложением дорожек (рис. 1, б).



а

Рис. 1. Микрошлифы зон лазерной закалки стали 70Г расфокусированным (а) лучом

При увеличении мощности лазерного излучения и уменьшении скорости обработки глубина и ширина зон закалки возрастает. Увеличение диаметра лазерного луча в исследованном диапазоне приводит к росту глубины и ширины зон упрочнения лазерным лучом. Микротвердость зон закалки, измеренная по их глубине, изменялась в широких пределах от 6780 до 10560 МПа в зависимости от режимов обработки. Чем медленнее скорость обработки, а значит больше продолжительность термического цикла, тем ниже микротвердость в закаленном лазерным лучом слое.



б

Рис. 1. Микрошлифы зон лазерной закалки стали 70Г колеблющимся лучом с наложением дорожек (б)

Образцы для испытаний на абразивное изнашивание обрабатывали на оптимизированных режимах по микротвердости, глубине и ширине зон лазерной закалки. Результаты испытаний при трении по незакрепленному абразивному зерну приведены в таблице 1. При наложении лазерных дорожек количество отпущенных зон увеличивается и это показывают результаты испытаний. Наибольшая износостойкость получена при 87% площади поверхности закаленного лазерным лучом образца.

Табл. 1. Результаты испытаний на абразивный износ стали 70Г

Вид обработки, материал основы	Микротвердость, МПа	Потеря массы, кг·10 ⁻⁴	Среднее значение, кг·10 ⁻⁴	Коэффициент износостойкости, <i>K</i>
С наложением дорожек	7850-9640	0,187	0.174	2,36
С наложением дорожек	7670-9790	0,164		
С наложением дорожек	7560-9860	0,171		
Площадь закалки 87% %	7780-10450	0,138	0,126	3,26
Площадь закалки 87% %	7960-10340	0,127		
Площадь закалки 87% %	7890-10560	0,114		

Табл. 1. Продолжение

Вид обработки, материал основы	Микротвердость, МПа	Потеря массы, $\text{кг} \cdot 10^{-4}$	Среднее значение, $\text{кг} \cdot 10^{-4}$	Коэффициент износостойкости, K
Материал основы	2570-2810	0,426	0,411	1
Материал основы	2760-2930	0,396		
Материал основы	25620-2890	0,412		

Выводы

В результате проведенных исследований определены геометрические параметры зон лазерной закалки в зависимости от режимов обработки.

Обработка образцов на оптимальных режимах лазерной закалки повысила микротвердость упрочненных зон в 3-4,5 раза, абразивную износостойкость в 2,36-3,26 раза при наложении дорожек и без него по сравнению с материалом основы.

Список литературы

1. 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 // Coatings. 12 (2022) 604. <https://doi.org/10.3390/coatings12050604>.
2. Zheng Y., Hu Q., Li C., Wang D., Meng L., Luo J., Wang J., Zeng X. A novel laser surface compositing by selective laser quenching to enhance railway service life // Tribol. Int. 106 (2017) 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.020>.
3. Бирюков В.П. Определение параметров зон лазерного воздействия и триботехнических свойств поверхностей сталей // Фотоника. 2022. №2. С. 156-167. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.2.156.166.

References

1. 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 // Coatings. 12 (2022) 604. <https://doi.org/10.3390/coatings12050604>.
2. Zheng Y., Hu Q., Li C., Wang D., Meng L., Luo J., Wang J., Zeng X. A novel laser surface compositing by selective laser quenching to enhance railway service life // Tribol. Int. 106 (2017) 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.020>.
3. Biryukov V.P. Determination of Parameters of Laser Impact Zones and Tribotechnical Properties of Steel Surfaces // Photonics Russia. 2022. No. 2. P. 156-167. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.2.156.166.

Бирюков Владимир Павлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник	Biryukov Vladimir Pavlovich – candidate of technical sciences, leading researcher
laser-52@yandex.ru	

Received 25.07.2022