

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗОН ЗАКАЛКИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ УПРОЧНЕНИИ СТАЛИ

*Бiryukov В.П., Соколов С.Н., Савин А.П.*

**Ключевые слова:** лазерное упрочнение, микротвердость, прямоугольное пятно.

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию влияния режимов лазерного упрочнения диодного лазера на геометрические параметры зон закалки, микротвердость упрочненных слоев. По уравнениям регрессии построены поверхности, показывающие взаимное влияние мощности и скорости обработки на глубину и ширину зон лазерной закалки. Результаты расчетов позволяют значительно сократить время при разработке новых технологий лазерного упрочнения деталей, изготовленных из конструкционных сталей.

## DETERMINATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF HARDENING ZONES DURING LASER HARDENING OF STEEL

*Biryukov V.P., Sokolov S.N., Savin A.P.*

**Keywords:** laser hardening, microhardness, rectangular spot.

**Abstract.** The work is devoted to the study of the influence of laser hardening modes of diode laser on the geometric parameters of the hardening zones, micro-hardness of the hardened layers. The regression equations are used to construct surfaces showing the mutual influence of the processing power and speed on the depth and width of the laser hardening zones. The results of calculations can significantly reduce the time in the development of new technologies for laser hardening of parts made of structural steels.

Одной из основных задач при разработке технологических процессов для лазерного упрочнения деталей является определение влияния параметров лазерной обработки, мощности, скорости перемещения луча и их взаимного влияния на параметры отклика системы, т.е. на глубину, ширину зон закалки. Появление новых типов лазерных источников и оптических внешних систем направлено на повышение производительности закалки и качества упрочненных слоев.

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 [1]. Скорость сканирования луча лазера составляла 5,0 мм/с, фокусное расстояние 310 мм, плотности лазерной энергии 220, 315, и 420 Дж/мм<sup>2</sup> при температуре поверхности образца 1000, 1200, и 1500 °С. При лазерной обработке с плотностью энергии 420 Дж/мм<sup>2</sup>, в среднем глубина зоны закалки составляла  $754 \pm 44$  мкм, тогда как при 220 и 315 Дж/мм<sup>2</sup> глубина зон составляла  $490 \pm 35$  и  $631 \pm 25$  мкм соответственно. Твердость упрочненных слоев составляла 545, 610, и 657 НV при 220, 420 и 315 Дж/мм<sup>2</sup> соответственно, что значительно выше, чем твердость материала основы 307HV.

Валы диаметром 50 мм из стали 42CrMo4 (AISI 4140) были закалены с использованием гомогенизированного лазерного пятна с размером пятна  $16 \times 4$  мм<sup>2</sup> с оптимизированным распределением интенсивности излучения [2]. Обработка на скоростях 400 и 500 мм/мин позволила получить упрочненные слои толщиной 1 и 0,72 мм соответственно.

Образцы стали 40X с размерами  $10 \times 10 \times 30$  мм упрочняли с помощью диодного лазера компании Laserline LDF 6000-100 [3]. Размер лазерного пятна на поверхности образца составлял  $25 \times 6$  мм. Максимальная микротвердость упрочненного слоя составила  $697 \pm 11$  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.

Размеры зон лазерной закалки получены по уравнениям регрессии в зависимости от режимов обработки для CO<sub>2</sub> – лазера и параметров поверхностного слоя материала для установки «Комета - М» [4]. Однако подобные исследования необходимо проводить для каждого конкретного типа лазерного оборудования.

Целью настоящей работы является установление влияния режимов лазерной обработки прямоугольным пятном диодного лазера на изменения глубины и ширины зон закалки, микротвердости для стали 40X.

Лазерное упрочнение производилось на автоматизированном лазерном технологическом комплексе, оснащенный диодным лазером мощностью излучения 6 кВт, изготовленном в ООО НПП «ИНЖЕКТ» г. Саратов, на образцах стали марки 40X с размерами  $12 \times 30 \times 50$  мм. Металлографические исследования проводили с использованием цифрового микроскопа AM413ML и металлографического микроскопа Альтами МЕТ 1С, измерения микротвёрдости на ПМТ-3М при нагрузке 0,98 Н.

В экспериментах определяли влияние плотности мощности лазерного излучения на глубину (H), ширину (B) и микротвердость HV упрочняемых дорожек. Изменяемыми параметрами были мощность излучения P= 3200 Вт и 3440 Вт и скорость перемещения луча V 7,5 мм/с и 10 мм/с, дефокусировка лазерного луча составляла – 19 мм. Размер лазерного пятна в фокальной плоскости составлял  $16 \times 4,5$  мм. По окончании эксперимента наплавки производились трехкратные измерения значений откликов.

С помощью математического планирования эксперимента получены уравнения регрессии в натуральных переменных [5].

Глубина зоны закалки:

$$H = 1,17725 + 0,01625 \left( \frac{P_i - 3320}{120} \right) - 0,24675 \left( \frac{V_i - 8,75}{1,25} \right). \quad (1)$$

Ширина зоны закалки:

$$B = 19,521 + 0,9885 \left( \frac{P_i - 3320}{120} \right) - 0,518 \left( \frac{V_i - 8,75}{1,25} \right). \quad (2)$$

На рис. 1 представлены зависимости глубины H и ширины B упрочненных слоев от режимов обработки.

С увеличением мощности луча и уменьшением скорости обработки возрастает глубина и ширина зон закалки. По уравнениям регрессии проведены расчеты, и сопоставлены с результатами эксперимента. Расчетные значения отличаются от фактических значений глубины и ширины зон закалки не более чем на 3,5%.

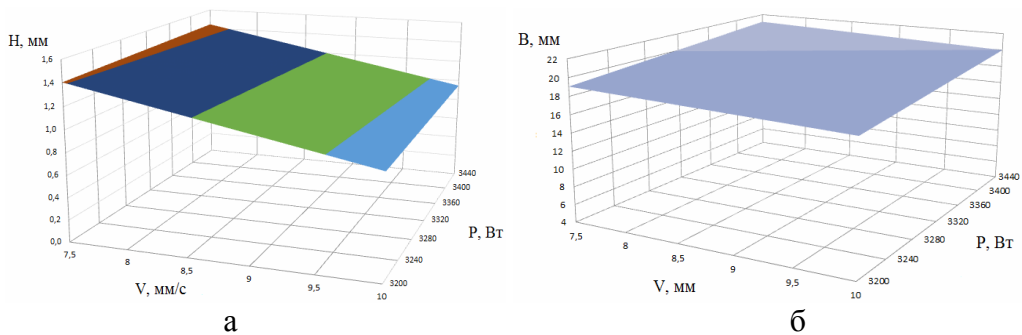


Рис. 1. Зависимость глубины (а) и ширины (б) зон лазерного упрочнения стали 40Х

На рис. 2 представлены зависимости микротвердости от глубины слоя от режимов обработки: 1 –  $P = 3200$  Вт,  $V = 10$  мм/с; 2 –  $P = 3200$  Вт,  $V = 7,5$  мм/с; 3 –  $P = 3440$  Вт,  $V = 7,5$  мм/с; 4 –  $P = 3440$  Вт,  $V = 10$  мм/с. Глубина зон упрочнения изменялась в пределах 0,84-1,46 мм.



Рис. 2. Зависимость микротвердости стали 40Х от глубины слоя и режима обработки

Микротвердость упрочненных зон изменялась в пределах 5520-7620МПа в зависимости от режимов обработки.

Режимы лазерной закалки с глубиной зоны упрочнения до 1 мм можно использовать для замены операции азотирования, а более 1 мм – цементации и объемной закалки деталей.

### Выводы

Получены закономерности изменения глубины и ширины упрочненных зон при дефокусировке лазерного луча прямоугольной формы 19 мм от скорости и мощности лазерного излучения. Отклонение расчетных значений глубины и ширины зон закалки от экспериментальных значений не превышает 3,5%.

### Список литературы

1. Park C. et al. Influence of laser surface engineering of AISI P20-improved mold steel on wear and corrosion behaviors // Surface and Coatings Technology 377 (2019) 124852. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.08.006>
2. 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.
3. Chen Z. et al. Behaviors of 40Cr steel treated by laser quenching on impact abrasive wear // Optics and Laser Technology. 2018. 103. P.118-125.
4. Бирюков В.П. Экспериментальное определение параметров упрочненных зон при лазерной закалке чугунов и сталей // Фотоника. 2017. №2(67). С.22-32.
5. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин П.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М: Наука, 1980. 226с.

### References

1. Park C. et al. Influence of laser surface engineering of AISI P20-improved mold steel on wear and corrosion behaviors // Surface and Coatings Technology 377 (2019) 124852. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.08.006>
2. 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.
3. Chen Z. et al. Behaviors of 40Cr steel treated by laser quenching on impact abrasive wear // Optics and Laser Technology. 2018. 103. P.118-125.
4. Biryukov V.P. Experimental determination of the parameters of hardened zones in laser hardening of iron and steel // Photonics. 2017. No 2(67). P. 22-32.
5. Evdokimov Yu.A., Kolesnikov V.I., Teterin P.I. Planning and analysis of experiments in solving friction and wear problems. M: Science. 1980. 226p.

<b>Бирюков Владимир Павлович</b> – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия, <a href="mailto:laser-52@yandex.ru">laser-52@yandex.ru</a>	<b>Biryukov Vladimir Pavlovich</b> – candidate technical sciences, leading researcher, Institute of mechanical engineering named after A.A. Blagonravov of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, <a href="mailto:laser-52@yandex.ru">laser-52@yandex.ru</a>
<b>Соколов Сергей Николаевич</b> – заместитель генерального директора ООО НПП «ИНЖЕКТ», г. Саратов, Россия, <a href="mailto:s.sokolov@nppinject.ru">s.sokolov@nppinject.ru</a>	<b>Sokolov Sergey Nikolaevich</b> – deputy director general of INJECT RME LLC, Saratov, Russia, <a href="mailto:s.sokolov@nppinject.ru">s.sokolov@nppinject.ru</a>
<b>Савин Александр Петрович</b> – инженер, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия, <a href="mailto:savin.san2010@mail.ru">savin.san2010@mail.ru</a>	<b>Savin Alexander Petrovich</b> – engineer, Institute of mechanical engineering named after A.A. Blagonravov of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, <a href="mailto:savin.san2010@mail.ru">savin.san2010@mail.ru</a>

Received 19.12.2019