

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПАРЫ ТРЕНИЯ ЧУГУН-СТАЛЬ

*Бирюков В.П.<sup>1</sup>, Горюнов Я.А.<sup>2</sup>, Двоеглазов А.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия;*

<sup>2</sup>*Российский университет транспорта, Москва, Россия*

**Ключевые слова:** лазерное упрочнение, чугун, коэффициент трения, давление.

**Аннотация.** Работа посвящена определению влияния лазерного упрочнения образцов серого чугуна с различной плотностью энергии на триботехнические характеристики при трении по стали 40Х. Получены закономерности изменения коэффициентов трения от давления. Показано, что применение поперечных колебаний лазерного луча повышает производительность обработки в 1,5-2 раза по сравнению с упрочнением расфокусированным лучом.

## INFLUENCE OF LASER HARDENING MODES ON TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF CAST IRON-STEEL FRICTION PAIRS

*Biryukov V.P.<sup>1</sup>, Goryunov Ya.A.<sup>2</sup>, Dvoeglazov A.A.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

<sup>2</sup>*Russian University of Transport, Moscow, Russia*

**Keywords:** laser hardening, cast iron, coefficient of friction, pressure.

**Abstract.** The work is devoted to determining the effect of laser hardening of gray cast iron samples with different energy densities on tribotechnical characteristics during friction on 40Cr steel. The regularities of the change of friction coefficients from pressure are obtained. It is shown that the use of transverse oscillations of the laser beam increases the processing performance by 1.5-2 times compared with the hardening of the defocused beam.

Поверхностно упрочненные слои были получены на ковком чугуне [1] DCI (3,62%С) методом лазерной поверхностной закалки. Твердость DCI в исходном состоянии составляла  $290 \pm 15$  HV<sub>0,5</sub>. В качестве лазерного источника использовался мощный диодный лазер, имеющий прямоугольный луч в фокальной плоскости с размерами 1,5 × 6,6 мм. Результаты показали, что основным фактором, определяющим толщину упрочненного слоя, является плотность мощности лазера, которая определяет оптимальный диапазон скорости перемещения и, соответственно, максимальную температуру поверхности. Было обнаружено, что глубина упрочнения увеличивается с увеличением плотности мощности. Чтобы избежать расплавления поверхности при увеличении плотности мощности, нижний предел скорости перемещения заметно увеличивается. Полученное в результате увеличение скорости охлаждения привело к подавлению мартенситного превращения и снижению твердости упрочненного слоя. В

исследуемом диапазоне плотности мощности лазера 40,4-80,8 Вт/мм<sup>2</sup> максимальная глубина зон лазерной закалки составляла 200 мкм. Твердость в упрочненном слое была увеличена почти в три раза по сравнению с исходным состоянием.

Для исследования был выбран ковкий чугун [2] EN-GJS-700-2 марки DCI с перлитно-ферритной матрицей и графитовыми включениями со средним диаметром около 30 мкм.

Образцы для лазерного упрочнения изготавливали прямоугольной формы с размерами 25 × 60 × 10 мм с шероховатостью поверхности 0,5 мкм. Обработку выполняли с помощью непрерывного мощного диодного лазера Rofin-Sinar DL 020 лучом прямоугольной формы с размерами пятна 1,5 × 6,6 мм. Для предотвращения окисления обработанной поверхности использовался газ аргон. Лазерное упрочнение проводили при мощности излучения и скорости перемещения 1000 Вт, 1,67 мм/с (1), 1500, 1,25 мм/с (2) и 2000 Вт, 3,33 мм/с (3) соответственно. Погонная энергия при мощности излучения 1000 и 2000 Вт составляла 600 Дж/мм, а при 1500 Вт – 1200 Дж/мм. Было исследовано влияние условий затвердевания на микроструктуру и твердость DCI, расплавленного лазером на поверхности. Тепловые условия в ванне с расплавом были исследованы с помощью ИК-термографии. Результаты показали, что увеличение скорости охлаждения во время затвердевания увеличивало содержание углерода в аустенитной фазе, что ингибировало мартенситное превращение. Кроме того, увеличение скорости охлаждения во время затвердевания улучшило эвтектику ледебурита. На твердость зоны расплава также влияла доля остаточного аустенита как морфология эвтектики ледебурита. Из-за высокой доли ледебурита его морфология оказала значительное влияние на твердость зоны плавления. Кроме того, было обнаружено, что области первичного и эвтектического аустенита содержат сеть пластинчатых вторичных цементитных выделений и нанометрических сферических третичных цементитных выделений. Наиболее высокую среднюю твердость 895 HV0.2 показали образцы, упрочненные по режиму (3), что значительно выше чем 837 HV0.2 полученная по режимам (1) и (2).

Материалом, использованным в эксперименте, был серый чугун [3] с содержанием углерода 3.0-3,2 % с типичной перлитной матрицей и хлопьевидным графитом с твердостью 250 HV0.3. В эксперименте использовался лазер Rofin DL022 с непрерывной мощностью излучения 1000 Вт. Лазерное пятно имело прямоугольную форму с размером 2 × 6 мм.

В зоне лазерного упрочнения получается однородная микроструктура, значения твердости которой варьируются от 700 до 800 HV в поперечном сечении, независимо от температуры и скорости сканирования. Самый глубокий упрочняющий слой составлял 0,4 мм, полученный при 1100°C и скорости 4 мм/с. Область перекрытия, имеющая протяженность примерно от 16,7% до 20,8% от номинальной ширины упрочняющей дорожки, является неизбежным негативным эффектом при исследовании соседних дорожек. В

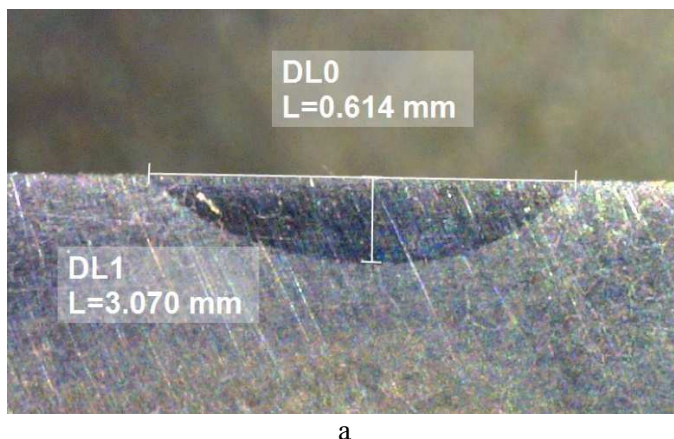
области перекрытия значения микротвердости показывают резкое снижение из-за повторного нагрева ранее полученного мартенсита, который был отпущен. Учитывая производительность и ограничения механических высоких нагрузок, сочетание высокой температуры и высокой скорости сканирования (1100°C, 10 мм/с) является наилучшим условием параметров процесса при глубине упрочненного слоя 0,25 мм.

Целью нашей работы было определение влияния поперечных колебаний луча с различной плотностью энергии на триботехнические характеристики пары трения чугун СЧ20 – сталь 40Х.

Лазерное упрочнение образцов серого чугуна СЧ20 (187-210НВ) с размерами 12×20×70 мм выполняли на оборудовании ИМАШ РАН. В качестве изменяемых параметров удельная плотность энергии 23-50 Дж/мм<sup>2</sup> при диаметре пучка d=3,5-5,5 мм. Для выравнивания мощности на поверхности образца использовали поперечные колебания луча с частотой 214 Гц по нормали к вектору скорости обработки. Металлографические исследования зон закалки проводились на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой 0,98 Н, металлографическом микроскопе и цифровом микроскопе АМ429.

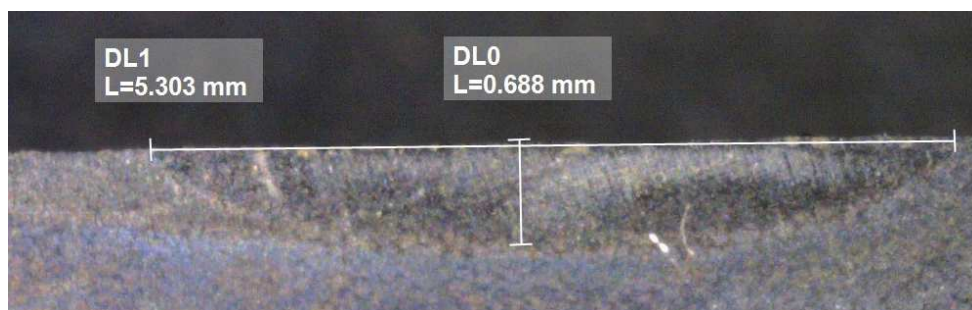
Триботехнические испытания по схеме: «широкая сторона плоского образца (СЧ20) – торец кольцевого контрообразца, сталь 40Х (48-52 HRC). Испытания выполняли на образцах обработанных колеблющимся лазерным лучом с расстоянием между дорожками 1,5 и 2,5 мм. Изменяемыми параметрами при испытаниях были скорость скольжения и давление на образец, которые изменялись ступенчато в интервале 0,2-3,5 м/с и 1-9 МПа соответственно. В качестве смазки использовали масло индустриальное И-20.

На рисунке 1 представлены микрошлифы серого чугуна СЧ20 обработанного рафокусированным лучом (а) и с поперечными колебаниями луча (б). Площадь зоны закалки при обработке колеблющимся лучом в 1,5-2 раза выше, чем при закалке расфокусированным лучом. Микротвердость зон лазерного упрочнения составляла 7670-10680 МПа в зависимости от режимов обработки.



а

Рис. 1. Микрошлифы зон лазерного упрочнения чугуна СЧ20:  
а – расфокусированным лучом



б

Рис. 1. Микрошлифы зон лазерного упрочнения чугуна СЧ20:  
б – колеблющимся лучом

На рисунке 2 представлены закономерности изменения коэффициентов трения от давления в паре трения чугун СЧ20 – сталь 40Х.

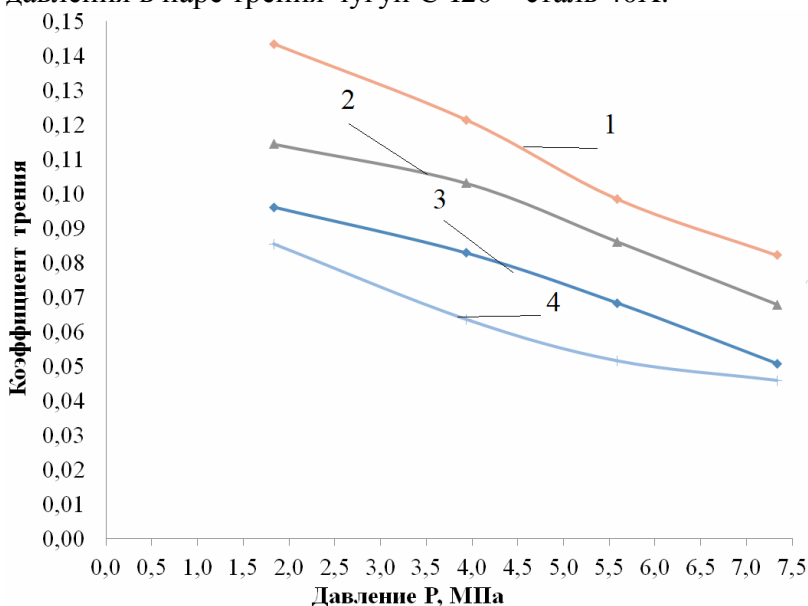


Рис. 2. Зависимость коэффициентов трения от давления в паре трения СЧ20-сталь 40Х: 1 – СЧ20, 2 – ЛУ (50 Дж/мм<sup>2</sup>), 3 – ЛУ (36 Дж/мм<sup>2</sup>), 4 – ЛУ (23 Дж/мм<sup>2</sup>)

Максимальные значения коэффициентов трения получены для образцов чугуна СЧ20 в исходном состоянии, далее по убывающей следовали коэффициенты трения полученные на образцах СЧ20 в паре со сталью 40Х при плотностях энергии излучения лазера 50, 36 и 23 Дж/мм<sup>2</sup> соответственно.

### Выводы

Определено влияние плотности энергии лазерного излучения на коэффициент трения в зависимости от давления при постоянной скорости скольжения. Минимальные коэффициенты трения 0,05-0,085 в 1,5 раза ниже, чем у материала основы СЧ20. Установлено, что производительность процесса лазерной обработки с поперечными колебаниями луча чугуна СЧ20 в 1,5, 2 раза выше, чем расфокусированным лучом.

**Список литературы / References**

1. Czuprynski A., Janicki D., Górka J., Grabowski A., Wygedacz B., Matus K., Karski W. High-Power Diode Laser Surface Transformation Hardening of Ferrous Alloys // Materials. 2022, vol. 15, pp.1915. <https://doi.org/10.3390/ma15051915>.
2. Janicki D., Górka J. Kwasny W., Pakieła W., Matus K. Influence of Solidification Conditions on the Microstructure of Laser-Surface-Melted Ductile Cast Iron // Materials. 2020, vol. 13, 1174 P. doi: 10.3390/ma13051174.
3. Liu A., Previtali B. Laser surface treatment of grey cast iron by high power diode laser // Physics Procedia. 2010, vol. 5, pp. 439-448.

<b>Бирюков Владимир Павлович</b> – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник	<b>Biryukov Vladimir Pavlovich</b> – candidate of technical sciences, leading researche
<b>Горюнов Ярослав Алексеевич</b> – студент	<b>Goryunov Yaroslav Alekseevich</b> – student
<b>Двоглазов Андрей Алексеевич</b> – студент laser-52@yandex.ru	<b>Dvoeglazov Andrey Alekseevich</b> – student

*Received 31.01.2023*