

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2023-39-8-13>

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ И ПЛОЩАДИ ЗАКАЛКИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПАРЫ ТРЕНИЯ ЧУГУН-СТАЛЬ

Бирюков В.П., Горюнов Я.А.

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

Ключевые слова: лазерное упрочнение, чугун, площадь закалки, микротвердость, интенсивность изнашивания, износостойкость.

Аннотация. Работа посвящена определению влияния режимов лазерного упрочнения и площади упрочненной поверхности образцов специального чугуна марки «С» на триботехнические характеристики при трении по рельсовой стали. Установлено, что повышение площади закаленной поверхности приводит к увеличению износостойкости и снижению интенсивности изнашивания. Наибольшее влияние на ширину зон упрочнения оказывали частота колебаний и скорость сканирования луча. Микротвердость в зонах лазерного оплавления оказалась существенно больше, чем зон упрочнения из твердого состояния.

INFLUENCE OF LASER HARDENING MODES AND QUENCHING AREA ON TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF CAST IRON-STEEL FRICTION PAIRS

Biryukov V.P., Goryunov Ya.A.

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

Keywords: laser hardening, cast iron, quenching area, microhardness, wear intensity, wear resistance.

Abstract. The work is devoted to determining the effect of laser hardening modes and the area of the hardened surface of samples of special cast iron grade "C" on tribotechnical characteristics during friction on rail steel. It is established that an increase in the area of the hardened surface leads to an increase in wear resistance and a decrease in the coefficient of friction. The greatest influence on the width of the hardening zones was exerted by the oscillation frequency and the scanning speed of the beam. The microhardness in the laser reflow zones turned out to be significantly higher than the solidification zones.

При выборе материалов для деталей машин одной из основных характеристик является их износостойкость. Чугун один из наиболее часто встречаемых материалов, применяемых во многих отраслях промышленности, благодаря его литейным, антифрикционным свойствам и хорошей обрабатываемости резанием. Актуальность исследования определяется недостаточной изученностью влияния площади закаленной поверхности на триботехнические характеристики при лазерной поверхностной закалке. Ниже приведены результаты зарубежных исследований, которые также показывают

неполноту знаний о влиянии лазерного упрочнения на триботехнические свойства поверхностей трения чугунов.

Эксперименты проводили с помощью диодного лазера высокой мощности, оснащенного оптической головкой, установленной на руке робота Kuka KR16. В качестве образца был выбран серый чугун [1] марки GG25 (EN-GJL-250) (аналог СЧ25) с габаритами 200×150×70 мм и твердостью 250 HV_{0,3}. Химический состав образца: С – 3,1%; Si – 1,47%; Mn – 0,98%; Fe – 94,45%. Трибологические испытания проводили по схеме «штифт-диск». Максимальная скорость износа наблюдалась у образца №1 и составляла 198·10⁻⁶ мкм³/Нм, при этом объемный износ составил 0,18 мкм³. Меньшей скоростью износа в 140,6·10⁻⁶ мкм³/Нм и объемным износом в 0,13 мкм³ обладал образец №2. Наименьшая глубина закалки наблюдалась у образца №1 и составляла 1 мм. У образца №2 глубина закалки оказалась наибольшей и ставила 1,5 мм. Микротвердость закаленной зоны определяли по методу Виккерса при нагрузке 0,3 кг. Максимальная твердость закаленной зоны составила 850 HV_{0,3}. Лазерная обработка чугуна GG25 увеличила микротвердость поверхности более чем в три раза по сравнению с исходной твердостью материала основы.

В качестве образца выбрали серый чугун [2], диаметром 40 мм и высотой 10 мм. Лазерное упрочнение проводилось с применением Nd:YAG-лазера со следующими параметрами: пиковая мощность лазера 800...2000 Вт; длина волны 1064 нм; диаметр пучка 1,0...1,7 мм; частота импульсов 8...90 Гц; скорость движения лазерной головки 2,4...21,6 мм/с-1. Средняя микротвердость необработанного образца составляла 278,5 HV_{0,1}. Химический состав образца: С – 3,55%; Si – 1,58%; Mn – 0,76%; P – 0,09%; S – 0,08%; Fe – 93,94%. Наибольшую микротвердость в 989 HV_{0,1} получили при мощности 800 Вт и скорости движения лазерной головки 19,2 мм/с-1 при диаметре пучка 1,0 мм. Максимальную глубину проплавления в 132 мкм получили при мощности 1800 Вт и скорости движения 5,7 мм/с-1. Микротвердость поверхностного слоя после лазерной обработки увеличилась более чем в 3 раза.

Эксперименты проводили [3] с помощью лазерной установки Techwin (LiDAR) при следующих режимах: мощность лазера 3,2 кВт, 4 кВт и 5 кВт, диаметр пучка 0,81 мм, 0,72 мм и 0,63 мм, длительность импульса 0,75 нс, 1 нс и 5 нс, соответственно. Для отработки режимов был выбран серый чугун марки ASTM A48-30 (аналог СЧ20) диаметром 10 мм, высотой 10 мм и твердостью 174-210 НВ. Химический состав образца: С – 3,2 %; Si – 2,1%; P – 0,05%; S – 0,06%; Mn – 0,52%; Fe – 94,07%. Максимальная твердость закаленной зоны составила 1025 НВ. Испытания для определения интенсивности изнашивания проводили по схеме «штифт-диск» при нагрузке 1000 г. Скорость скольжения составила 3,5 м/мин. Через каждые 15 минут, с помощью электронных весов, проводили взвешивание для определения потери массы образцов. С повышением мощности и длительности импульса увеличилась глубина и площадь термического воздействия. Увеличение

длительности импульса при фиксированной мощности приводило к снижению микротвердости. С увеличением мощности и длительности импульса снизилась износостойкость. После лазерной обработки скорость изнашивания уменьшилась на 38÷78%. Минимальную потерю массы образца получили при длительности импульса 0,75 нс.

Для лазерной обработки был выбран серый чугун [4] марки ASTM A48-25 (аналог СЧ15) диаметром 10 мм, высотой 20 мм и твердостью 272 HV. Эксперименты проводили с помощью Nd:YAG лазера при следующих режимах: мощность лазера 2,06 кВт, 3,16 кВт и 5,15 кВт, длина волны 1064 нм, энергия лазера 1,48 Дж, 2,31 Дж и 4,21 Дж, длительность импульса 0,8 мс, 1,3 мс и 2 мс, диаметр пучка 0,6 мм. Химический состав образца: С – 3,5%; Si – 2,24%; P – 0,26%; S – 0,12%; Mn – 0,76%; Fe – 93,12%. Максимальная твердость закаленной зоны составляла 1025 HV. Испытания для определения интенсивности изнашивания проводили по схеме «штифт-диск» при нагрузке 1000 г. Скорость скольжения составила 4,2 м/мин. Меньшим массовым износом и скоростью изнашивания обладал образец с длительностью импульса 0,8 мс. С увеличением длительности импульса глубина проплавления увеличивалась, при этом уменьшалась твердость упрочненной зоны. Увеличение длительности импульса при фиксированной мощности приводило к снижению микротвердости. С увеличением мощности и длительности импульса снизилась износостойкость. После лазерной обработки скорость изнашивания уменьшилась на 38÷78%. Наилучшими трибологическими параметрами обладал образец, с длительностью импульса 0,8 мс.

Обработка поверхности образца серого чугуна [5], с размерами 40×10×8 мм и микротвердостью 240...260 HV, велась с помощью Nd:YAG-лазера в среде защитного газа (аргон) с перекрытием 15% при двух режимах, когда плотность мощности лазерного излучения составляла 92 кВт/см² и 106 кВт/см², длительность импульса 10 мс, скорость перемещения пятна 542 мм/мин и 384 мм/мин, длина волны 1,06 мкм, а фокусное расстояние 5,8 и 8,8 мм, соответственно. Элементный состав образцов: С – 3,45%; Si – 2,4%; P – 0,65%; Mn – 0,75%; Cu – 0,66%; Cr – 0,38%; Fe – 91,7%. Наибольшая глубина закаленной зоны составила 190 мкм. Максимальная ширина закаленной зоны составила 880 мкм. Микротвердость закаленной зоны образцов после обработки варьировалась от 650 до 900 HV. С помощью лазерной закалки удалось добиться повышение микротвердости поверхностного слоя образца из серого чугуна в 3÷4 раза, по сравнению с микротвердостью основного металла.

Целью нашей работы было определение влияния режимов лазерной закалки на параметры зон закалки и триботехнические характеристики с различной площадью упрочнения на пары трения специальный чугун марки «С» – колесная сталь марки 2.

Лазерное упрочнение образцов специального серого чугуна марки «С» (238-269 HV_{0,1}) с размерами 12×20×70 мм выполняли на оборудовании

ИМАШ РАН. При проведении лазерной закалки варьируемыми параметрами были: скорость перемещения луча 2-12 м/с, поперечные колебания луча с частотой 180-216 Гц по нормали к вектору скорости обработки. Мощность излучения составляла 800 Вт. Металлографические исследования зон закалки проводились на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой 0,98 Н, металлографическом микроскопе и цифровом микроскопе АМ429. Элементный состав чугуна представлен в таблице 1.

Табл. 1. Элементный состав специального чугуна марки «С»

| Массовая доля элементов в, % | | | | |
|------------------------------|---------|---------|---------|------|
| С | Si | Mn | P | S |
| 2,8-3,5 | 0,7-1,1 | 0,4-1,0 | 0,2-0,4 | 0,18 |

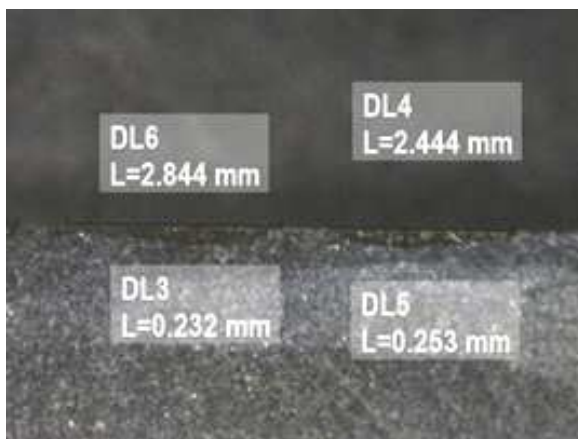
Триботехнические испытания проводились по схеме «широкая сторона плоского образца (специальный чугун марки «С») – торец кольцевого контрообразца (колесная сталь марки 2) с применением полужидкостной смазки «ПУМА». Изменяемым параметром при испытаниях была скорость скольжения, которая изменялась ступенчато в интервале 0,2-0,6 м/с. Постоянным параметром было давление, которое составляло 1,65 Мпа.

На рисунке 1 представлены микрошлифы специального чугуна марки «С», обработанные при разных скоростях перемещения луча. Наибольшая ширина зоны 10 мм получена при минимальной скорости перемещения колеблющегося луча при средней глубине зоны 0,8 мм. Следует отметить, что по краям дорожки закалки в местах остановки луча глубина зоны упрочнения выше, чем в ее середине. При максимальной скорости перемещения глубина и ширина зоны закалки была значительно ниже и составила 0,232-0,263 и 2,444-2,844 мм соответственно. Площадь зоны закалки при обработке колеблющимся лучом составила для образцов №2, 3, 4, 5 и 6 соответственно 20%, 60%, 65%, 80% и 95%.

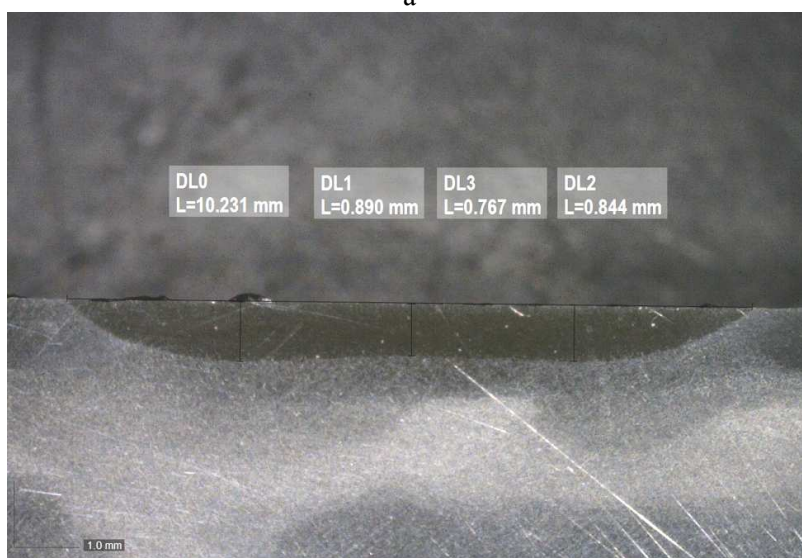
Микротвердость зон лазерного упрочнения составляла 7550-8500 МПа в зависимости от режимов обработки. На рисунке 2 представлен график микротвёрдости по глубине закалённой зоны при мощности 800 Вт и скорости 2 мм/с.

Средние значения интенсивности изнашивания для образцов чугуна марки «С» в исходном состоянии составили $1,97 \times 10^{-9}$. Далее по убывающей следовали значения интенсивности изнашивания полученные на образцах специального чугуна марки «С» в паре с колесной сталью марки 2 при площади закалки 20%, 60%, 70%, 80% и 90%, соответственно. Средняя интенсивность изнашивания образцов специального чугуна марки «С» представлена в таблице 2.

Среднее значение интенсивности изнашивания закаленных образцов варьировалось в диапазоне $0,34-0,92 \times 10^{-9}$. При этом значения интенсивности изнашивания контрообразца, изготовленных из колесной стали марки 2, составляли $0,60-1,73 \times 10^{-9}$.



а



б

Рис. 1. Сечение зоны лазерной заковки специального чугуна марки «С»: а – скорость перемещения луча 12 м/с; б – скорость перемещения луча 2 м/с (×40)

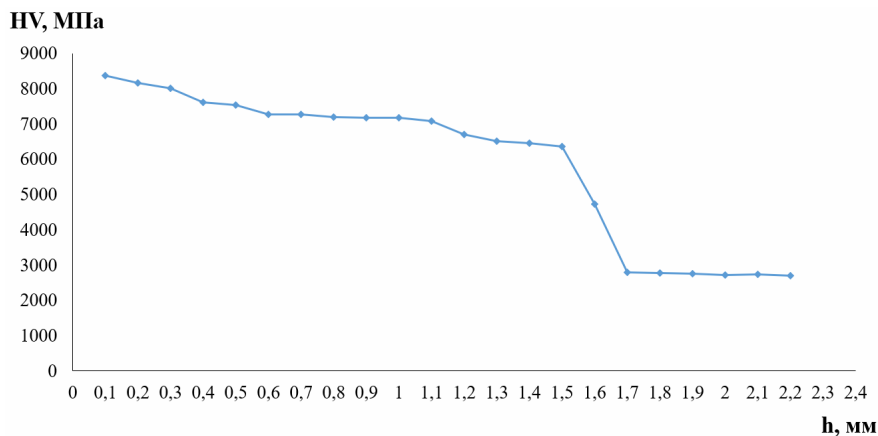


Рис. 2. График микротвёрдости по глубине закалённой зоны специального чугуна марки «С» при мощности 800 Вт и скорости 2 мм/с

Табл. 2. Средняя интенсивность изнашивания образцов специального чугуна марки «С» по трем образцам

| Марка чугуна, № образца | Интенсивность изнашивания образца |
|-------------------------|-----------------------------------|
| | $I_1 \cdot 10^{-9}$ |
| Чугун марки «С» | 1,67 |
| №2 | 0,83 |
| №3 | 0,67 |
| №4 | 0,52 |
| №5 | 0,42 |
| №6 | 0,34 |

Выводы. Определено влияние режимов лазерного упрочнения и площади закалки на интенсивность изнашивания образцов. Определено минимальное значение интенсивности изнашивания упрочненных образцов. Микротвердость упрочненной зоны образцов после лазерной закалки возросла в 2,5-2,83 раза в сравнении с микротвердостью образцов в исходном состоянии.

Список литературы / References

1. Nemecek S. Microstructure and properties of cast iron after laser surface hardening // Materials Engineering. 2013, vol. 20, pp. 153-159.
2. Zulfhishamuddin A.R., Aqida S.N., Rahim E.A. Optimization of Pulsed Nd:YAG Laser Melting of Gray Cast Iron at Different Spot Sizes for Enhanced Surface Properties // AIP Conference Proceedings. 2016, vol. 1769, pp. 030004-1–030004-6. DOI: 10.1063/1.4963420.
3. Abd Ali H.R., Khalid E.A., Alwan A.S., Jaddoa A.A., Effect of Fibre Laser Surface Treatment on Wear Resistance of Gray Cast Iron Astm A48 // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2021, vol. 44, pp. 141-149.
4. Aziz S.S., Alwan A.S., Abed K.A. Influence of Nd-YAG laser beam on microstructure and wear characteristics of gray cast iron // Biochemical and Cellular Archives. 2019, vol. 19, pp. 1587-1592. DOI: 10.35124/bca.2019.19.1.1587.
5. Monteiro W.A., Silva E.M.R., Silva L.V., De Rossi W., Buso S.J. Microstructural and mechanical characterization of gray cast iron and AlSi alloy after laser beam hardening // Materials Science Forum. 2010, vol. 638-642, pp. 769-774. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.769.

| | |
|---|--|
| Бирюков Владимир Павлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник | Biryukov Vladimir Pavlovich – candidate of technical sciences, leading researcher |
| Горюнов Ярослав Алексеевич – младший научный сотрудник laser-52@yandex.ru | Goryunov Yaroslav Alekseevich – junior researcher |

Received 06.12.2023