

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ СЛЕДОВ ЛАЗЕРНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

Алисин В.В.

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

Ключевые слова: лазерная закалка чугунов, лазерные дорожки упрочнения, износостойкость поверхности, цилиндро-поршневая группа, износ цилиндрических втулок.

Аннотация. Работа посвящена изучению износостойкости поверхности трения высокопрочного чугуна упрочненной лазерной обработкой. Локальность лазерной технологии привела к необходимости изучения влияния конфигурации следов взаимодействия лазерного луча с поверхностью. Приводятся результаты трибологических исследований на лабораторной машине трения в условиях возвратно-поступательного движения. Моделируются условия работы пары трения гильза-поршневое кольцо применительно к тяжелому дизелю. экспериментально исследуется влияние на износостойкость геометрии рисунка, образованного следами лазерной обработки. Методами статистической обработки выполнен анализ воспроизводимости результатов опытов. По результатам экспериментов формулируются рекомендации по лазерной закалке цилиндрических втулок тяжелых дизелей.

THE INFLUENCE OF THE GEOMETRIC SHAPE OF TRACES OF LASER HARDENING SURFACE TREATMENT OF HIGH-STRENGTH CAST IRON ON WEAR RESISTANCE

Alisin V. V.

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

Keywords: laser hardening of cast iron, laser hardening tracks, wear resistance of the surface, cylinder-piston group, wear of cylinder bushings, evaluation of reproducibility of results.

Abstract. The work is devoted to the study of the wear resistance of the friction surface of high-strength cast iron hardened by laser treatment. The locality of laser technology has led to the need to study the influence of the configuration of traces of interaction of the laser beam with the surface. The results of tribological studies on a laboratory friction machine under conditions of reciprocating motion are presented. The working conditions of the sleeve-piston ring friction pair are modeled in relation to heavy diesel. the effect on the wear resistance of the geometry of the pattern formed by traces of laser treatment is experimentally investigated. The analysis of reproducibility of the experimental results was carried out by statistical processing methods. Based on the results of experiments, recommendations are formulated for laser hardening of cylinder bushings in heavy diesel engines

Введение. Лазерные упрочняющие технологии для защиты машин от износа находят применение во многих отраслях промышленности. Большие перспективы имеются для повышения износостойкости сельскохозяйственных машин [1], в транспортных отраслях промышленности, в частности для увеличения ресурса работы дизельных двигателей [2]. Изучению трибологических свойств цилиндро-поршневой группы уделяется много внимания [3, 4]. В тяжелых дизелях применяют цилиндрические втулки из серого чугуна с шаровым графитом. Износостойкость внутренних поверхностей цилиндрических втулок в большой мере определяет ресурс работы дизеля. Повышению износостойкости чугунов уделяется много внимания. К числу эффективных методов упрочнения относится лазерная термообработка. Применение [5] упрочнения деталей из чугуна с помощью волоконного лазера мощностью 600 Вт. Установлено, что второй термический цикл соседней лазерной дорожки с точки зрения как отпуска, так и повторного упрочнения показала, что за счет увеличения перекрытия получается более однородная микроструктура поверхности и твердость. В работе [6] лазерной обработкой сформирована текстура поверхности, которая вызывает образование смазочных карманов и ловушек для частиц износа. Установлено, что лазерная обработка улучшает трибологические характеристики за счет низкого коэффициента трения,

износостойкости и стойкости к заеданию. В работе [7] представлены результаты металлографических и триботехнических исследований образцов черных металлов с лазерной закалкой из жидкого и твердого состояния. На основании проведенного регрессионного анализа получены закономерности изменения глубины и ширины зон термического воздействия. Определены геометрические параметры зон лазерной обработки в зависимости от мощности, скорости обработки и диаметра лазерного луча. Получены закономерности изменения коэффициентов трения от давления и скорости скольжения. В работе [8] исследовался процесс лазерной обработки серого чугуна в струе воды. Установлено, что шероховатость поверхности уменьшается вдвое. В статье [9] отмечается, что изменения в состоянии поверхности после лазерной обработки поверхности является следствием сложных процессов, возникающих в результате новых не равновесных фазовых превращений, происходящих во время лазерного поверхностного плавления с последующим присущим ему быстрым затвердеванием и твердотельным охлаждением. Зона плавления этого градуированного слоя демонстрирует полное растворение хлопьев графита в жидкости. В работах [10, 11] изучалось комбинированное влияние закалки и лазерного упрочнения поверхности на износостойкость серого чугуна. Испытания на износ проводились на триботестере в условиях возвратно-поступательного движения. Исследовались следы лазерной обработки, образующиеся в виде дорожек упрочнения. Определены изменения в структуре чугуна и распределение твердости. Установлены зоны лазерного воздействия. Конфигурация расположения упрочняющих дорожек может быть разнообразной и изучена недостаточно.

Цель работы изучить влияние конфигурации дорожек упрочнения нанесенных лазером на износостойкость поверхности чугуна.

Материалы и оборудование. Объектом исследования были образцы, изготовленные в виде пластин размером 90x30 мм из серого перлитного чугуна АХНММ, применяемом для изготовления цилиндрических втулок тяжелых дизелей. Контртелом служил сегмент поршневого компрессионного кольца (ГОСТ 7133-80) [12]. Образец «кольцо» представляет собой отрезок кольца длиной 35 мм. Его сечение представляет собой трапецию. Лазерная закалка стальных образцов выполнена на CW CO₂-лазере. Образцы чугуна упрочнялись непрерывным лазерным излучением мощностью 2000 Вт. Перед обработкой образцы промывались бензином и высушивались. Поверхность трения для повышения износостойкости упрочнялась нанесением дорожек лазерной закалки. Лазерная обработка поверхностей проводилась с 10-ю группами образцов «гильза» (по 3 в группе). Первая группа была представлена образцами с неупрочненной поверхностью сопряжения. Вторая имела поверхность сопряжения, полностью обработанную лазером. Восемь остальных упрочнялись нанесением лазером дорожек закалки различной геометрии.

Триботехнические испытания проводились на машине трения 77МТ [13] с возвратно-поступательным движением, содержащей шток привода и направляющие штока. Установка была модернизирована с целью улучшения самоустановки образцов (рис. 1).

Для этого направляющая для штока и салазок выполнена в виде отрезка трубы 1. Шток соединен с салазками 2 карданом. Это позволяет салазкам под действием нагрузки автоматически выбирать наиболее выгодный крен для обеспечения правильного прилегания трущихся поверхностей образца пластины 3 и образца сегмента поршневого кольца 4, даже при нарушении соосности образцов.

Результаты. Для определения воспроизводимости данных триботехнических испытаний выполнена серия экспериментов в неизменных условиях опыта. Была изготовлена партия образцов в количестве 7 пар трения по полностью идентичной технологии. эксперименты проведены при нагрузке 66.7 кгс/см² и различной продолжительностью испытаний. Средняя

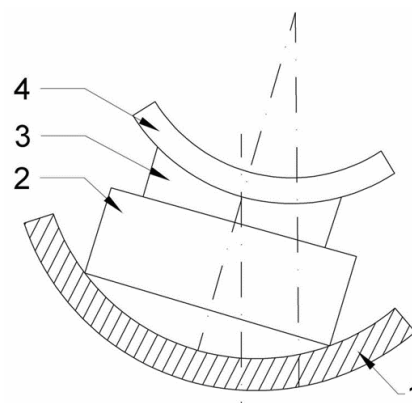


Рис. 1. Схема установки образцов относительно направляющей

скорость относительного движения равна 0,19 м/с, ход подвижного образца 50 мм. В каждом опыте весовым методом определяли износ образцов. Показатели износа пересчитывались в линейную интенсивность изнашивания (I).

Для образца – кольцо $I = h / L$, где h – толщина изношенного слоя (м); L – путь трения (м).

Для образца – гильза $I = h / (L \cdot k)$, где k – коэффициента перекрытия, равный отношению площадей поверхностей трения.

В таблице 1 приведены результаты трибологических испытаний.

Табл. 1. Интенсивности изнашивания образцов

| № опыта | Образец – гильза | Образец – кольцо |
|---------|----------------------|----------------------|
| 1 | $9,90 \cdot 10^{-8}$ | $1,16 \cdot 10^{-7}$ |
| 2 | $10,7 \cdot 10^{-8}$ | $4,13 \cdot 10^{-7}$ |
| 3 | $8,76 \cdot 10^{-8}$ | $4,41 \cdot 10^{-7}$ |
| 4 | $9,61 \cdot 10^{-8}$ | $6,94 \cdot 10^{-7}$ |
| 5 | $1,33 \cdot 10^{-8}$ | $3,14 \cdot 10^{-7}$ |
| 6 | $0,25 \cdot 10^{-8}$ | $1,15 \cdot 10^{-7}$ |
| 7 | $0,45 \cdot 10^{-8}$ | $3,47 \cdot 10^{-7}$ |
| среднее | $5,86 \cdot 10^{-8}$ | $3,48 \cdot 10^{-7}$ |

В соответствие с порядком статистической обработки экспериментальных данных [14] определим абсолютную погрешность измерений интенсивности изнашивания образцов. Определим случайную составляющую погрешностей. Для оценки эффективности нанесения лазером дорожек упрочнения примем среднее арифметическое измеренных интенсивностей изнашивания (I_{cp}), по которому были рассчитаны стандартные отклонения (σ) для всего массива экспериментальных данных. Доверительная случайная погрешность X результатов измерений рассчитывается путем умножения величины среднего квадратичного отклонения (s) на коэффициент Стьюдента (2,45) для числа наблюдений равного 7 и доверительной вероятности 0,95. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Табл. 2. Результаты статистической обработки в прямых измерениях опытов

| Образец | I_{cp} | σ | s | β |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Гильза | $5,86 \cdot 10^{-8}$ | $4,88 \cdot 10^{-8}$ | $1,84 \cdot 10^{-8}$ | $4,51 \cdot 10^{-8}$ |
| кольцо | $3,48 \cdot 10^{-7}$ | $1,77 \cdot 10^{-7}$ | $0,72 \cdot 10^{-7}$ | $1,76 \cdot 10^{-7}$ |

Расчетный оптимальный режим лазерной закалки для толщины закаленного слоя 0,15 мм имеет место при обработке пятном диаметром 2,2 мм со скоростью 4,2 м/мин. При меньших значениях технологических параметров лазерной обработки поверхность сильно оплавляется (рис. 2). В оптимальном режиме лазерной наплавки обрабатываемая поверхность находится на грани оплавления (рис. 3). При больших значениях снижается эффективность упрочнения для повышения износостойкости поверхностей.

Ускоренные сравнительные испытания по определению оптимального расположения упрочняющих дорожек проведены без смазки в условиях нормальных температур. После установки испытуемых образцов в держатели образцы прирабатывались в течение 5-8 часов при нагрузке 0,3-0,5 от испытательной. По завершению приработки образцов измерялся износ образцов, средние значения указанных измерений приведены таблице 3.

По результатам сравнительных испытаний представляется более выгодным упрочнение поверхностей трения нанесением дорожек в виде сетки с шагом 5 мм и наклоном дорожек 45° к вектору скорости скольжения.

Лазерная закалка перспективна как финишная операция. Механизм лазерной закалки состоит в фазовом превращении в твердом состоянии при быстром нагреве и охлаждении поверхности за счет отвода тепла материалом. Основными факторами, определяющими процесс лазерного упрочнения, являются: величина плотности мощности излучения; распределение энергии в световом потоке; отражательная способность поверхности

обрабатываемого металла; теплофизические свойства материала, длительность воздействия лазерного излучения. Общая тенденция такова, что наибольший эффект, имеют при обработке малолегированные черные металлы, особенно чугуны, т.е. материалы, которые широко применяются в двигателестроении.



Рис. 2. Микроструктура чугуна АХНММ (х 100) в зоне оплавления поверхности лазером

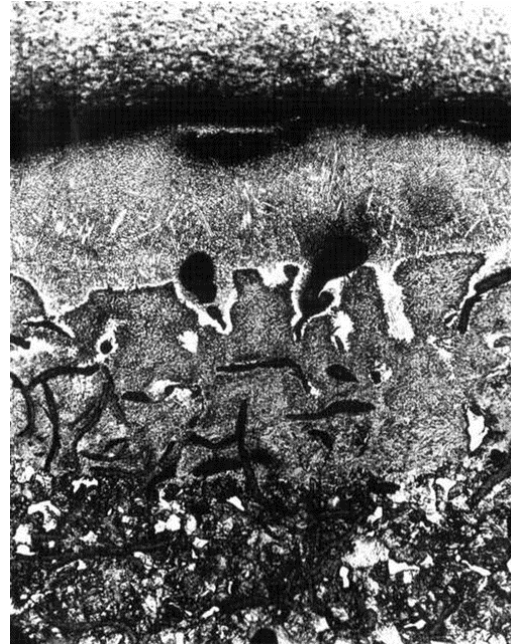


Рис. 3. Микроструктура чугуна АХНММ (х 100) на грани оплавления поверхности лазером

Табл. 3. Интенсивности изнашивания образцов

| Геометрия нанесения упрочняющих дорожек | гильза | кольцо |
|--|----------------------|----------------------|
| Без упрочняющей обработки | $4,21 \cdot 10^{-7}$ | $1,38 \cdot 10^{-7}$ |
| обработка без просветов | $1,02 \cdot 10^{-8}$ | $1,57 \cdot 10^{-7}$ |
| Поперечные дорожки с шагом 5 мм | $1,44 \cdot 10^{-7}$ | $2,68 \cdot 10^{-7}$ |
| Сетка с шагом 5 мм наклон дорожек 45^0 | $6,76 \cdot 10^{-8}$ | $2,83 \cdot 10^{-7}$ |

Выводы

Лазерная термообработка чугунов является эффективной технологической упрочняющей операцией. Воздействие лазерного луча на поверхность локально и охват всей поверхности трения требует повышенных затрат. Нанесение отдельных дорожек упрочнения значительно повышает износостойкость поверхности. Геометрия рисунка образованного следами воздействия лазерного луча на поверхность сильно влияет на интенсивность изнашивания поверхностей. На основе выполненных экспериментов рекомендуется лазерная закалка цилиндрических втулок их высокопрочного чугуна путем нанесения на поверхность зеркала упрочняющих дорожек, геометрическая форма которых образует сетку с шагом 5 мм с наклоном дорожек 45^0 . В соотношении цена-качество такой рисунок является оптимальным. Результаты трибологических испытаний свидетельствуют об удовлетворительном воспроизводстве данных, доверительная случайная погрешность изнашивания цилиндрической втулки составляет $\beta = 4,51 \cdot 10^{-8}$, поршневого кольца $\beta = 1,76 \cdot 10^{-7}$.

Список литературы

1. Бирюков В.П. Повышение износостойкости деталей и почвообрабатывающих орудий в сельхозмашиностроении лазерной наплавкой // Фотоника. – 2021. – Т. 15, №2. – С. 132-143.
2. Асташкевич Б.М. Прочность и износостойкость чугуна для втулок цилиндров двигателей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1987. – №7. – С. 31-34.
3. Li R., Wen C., Meng X., Xie Y. Measurement of the friction force of sliding friction pairs in low-speed marine diesel engines and comparison with numerical simulation // Applied Ocean Research. 2022, vol. 121, p. 103089.
4. Rao X., Sheng C., Guo Z., Yuan C. Review of online condition monitoring and maintenance strategy for cylinder liner-piston rings of diesel engines // Mechanical Systems and Signal Processing. 2022, vol. 165, p. 108385.

5. Malek Ghaini F., Ameri M.H., Torkamany M.J. Surface transformation hardening of ductile cast iron by a 600w fiber laser // *Optik*. 2020, vol. 203, p. 163758.
6. Nagato K., Iseki T., Tomiyama K., Nishikawa G. Seizure-resistance cast-iron surface textured by laser decomposition of graphite phase and hardened by laser quenching // *CIRP Annals*. 2020, vol. 69, no. 1, pp. 521-524.
7. Бирюков В.П. Определение параметров зон лазерного воздействия и триботехнических свойств поверхностей сталей // *Фотоника*. – 2022. – Т. 16, №2. – С. 156-167.
8. Gu J., Luo C., Zhang P., Ma P., Ren X. Laser cavitation peening of gray cast iron: Effect of coverage layer on the surface integrity // *Applied Surface Science*. 2020, vol. 521, p. 146295.
9. Joshi S.S., Choudhuri D., Mantri S.A., Banerjee R., Dahotre N.B., Banerjee S. Rationalizing surface hardening of laser glazed grey cast iron via an integrated experimental and computational approach // *Materials & Design*. 2018, vol. 156, pp. 570-585.
10. Wang B., Pan Y., Liu Y., Lyu N., Barber G.C., Wang R., Cui W., Qiu F., Hu M. Effects of quench-tempering and laser hardening treatment on wear resistance of gray cast iron // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, vol. 9, no. 4, pp. 8163-8171.
11. Wang B., Pan Y., Liu Y., Barber G.C., Qiu F., Hu M. Wear behavior of composite strengthened gray cast iron by austempering and laser hardening treatment // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, vol. 9, no. 2, pp. 2037-2043.
12. Алисин В.В. Повышение износостойкости цилиндрических втулок тяжелых дизелей лазерной обработкой // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. – 2022. – №16. – С. 51-55.
13. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытаний на трение и износ: монография. – М.: Изд-во Интернет Инжиниринг, 2001. – 152 с.
14. Гребенникова И.В. Методы математической обработки экспериментальных данных: учебно-методическое пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 124 с.

References

1. Biryukov V.P. Increasing the wear resistance of parts and tillage tools in agricultural machinery by laser surfacing // *Photonics*. 2021, vol. 15, no. 2, pp. 132-143.
2. Astashkevich B.M. Strength and wear resistance of cast iron for engine cylinder bushings // *Metallurgy and heat treatment of metals*. 1987, no. 7, pp. 31-34.
3. Li R., Wen C., Meng X., Xie Y. Measurement of the friction force of sliding friction pairs in low-speed marine diesel engines and comparison with numerical simulation // *Applied Ocean Research*. 2022, vol. 121, p. 103089.
4. Rao X., Sheng C., Guo Z., Yuan C. Review of online condition monitoring and maintenance strategy for cylinder liner-piston rings of diesel engines // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022, vol. 165, p. 108385.
5. Malek Ghaini F., Ameri M.H., Torkamany M.J. Surface transformation hardening of ductile cast iron by a 600w fiber laser // *Optik*. 2020, vol. 203, p. 163758.
6. Nagato K., Iseki T., Tomiyama K., Nishikawa G. Seizure-resistance cast-iron surface textured by laser decomposition of graphite phase and hardened by laser quenching // *CIRP Annals*. 2020, vol. 69, no. 1, pp. 521-524.
7. Biryukov V.P. Determination of parameters of laser exposure zones and tribotechnical properties of steel surfaces // *Photonics*. 2022, vol. 16, no. 2, pp. 156-167.
8. Gu J., Luo C., Zhang P., Ma P., Ren X. Laser cavitation peening of gray cast iron: Effect of coverage layer on the surface integrity // *Applied Surface Science*. 2020, vol. 521, p. 146295.
9. Joshi S.S., Choudhuri D., Mantri S.A., Banerjee R., Dahotre N.B., Banerjee S. Rationalizing surface hardening of laser glazed grey cast iron via an integrated experimental and computational approach // *Materials & Design*. 2018, vol. 156, pp. 570-585.
10. Wang B., Pan Y., Liu Y., Lyu N., Barber G.C., Wang R., Cui W., Qiu F., Hu M. Effects of quench-tempering and laser hardening treatment on wear resistance of gray cast iron // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, vol. 9, no. 4, pp. 8163-8171.
11. Wang B., Pan Y., Liu Y., Barber G.C., Qiu F., Hu M. Wear behavior of composite strengthened gray cast iron by austempering and laser hardening treatment // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, vol. 9, no. 2, pp. 2037-2043.
12. Alisin V.V. Increasing the wear resistance of cylinder bushings of heavy diesel engines by laser treatment // *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2022, no. 16, pp. 51-55.
13. Kуксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы тестирования на трение и износ: монография. – М.: Publ. house Internet Engineering, 2001. – 152 p.
14. Grebennikova I.V. Methods of mathematical processing of experimental data: an educational and methodical manual. – Yekaterinburg: Publ. house of Ural un-ty, 2015. – 124 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Алисин Валерий Васильевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
vva-imash@yandex.ru

Alisin Valery Vasilievich – candidate of technical sciences, leading researcher

Получена 14.11.2022