



Влияние режимов лазерной обработки чугунов на параметры зон упрочнения и их триботехнические свойства

В. П. Бирюков

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН,
Москва, Россия

Представлены результаты металлографических и триботехнических испытаний чугунов в парах трения со сталью 40Х. Показано, что использование поперечных колебаний лазерного луча при обработке значительно повышает ее производительность, исключает возникновение поверхностных дефектов, возникающих при воздействии излучения расфокусированным лучом на поверхность образцов из чугунов. Установлено, что лазерное термическое упрочнение в зависимости от режимов обработки значительно снижает коэффициенты трения и повышает микротвердость в 4–6 раз и износостойкость модифицированных поверхностей чугунов в 2,5–3,5 раза по сравнению с их исходным состоянием.

Ключевые слова: чугун, термическое упрочнение, коэффициенты трения, микротвердость, износостойкость

Статья получена: 03.04.2023

Статья принята: 25.04.2023

ВВЕДЕНИЕ

Чугуны широко используются в промышленности из-за их превосходных литейных свойств, обрабатываемости, механических свойств и низкой стоимости. Например, высокопрочный и ковкий чугун часто используется для изготовления деталей типа: вал, коленчатый вал, ось, втулка цилиндра двигателя, шестерня и другие на транспорте

Influence of Laser Treatment Modes of Cast Iron on the Parameters of Hardening Zones and Their Tribotechnical Properties

V. P. Biryukov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russia

The paper considers the results of metallographic and tribotechnical tests of cast iron in friction pairs with 40Kh steel. It is shown that the use of transverse oscillations of the laser beam significantly increases the processing performance, eliminates surface defects that occur when radiation is applied to the surface of cast iron samples with a defocused beam. It is established that laser thermal hardening significantly reduces the coefficients of friction and increases microhardness by 4–6 times and wear resistance of modified cast iron surfaces in 2.5–3.5 times compared to their initial state, depending on the processing modes.

Keywords: cast iron, coefficients of friction, microhardness, wear resistance

Received on: 03.04.2023

Accepted on: 25.04.2023

INTRODUCTION

Cast iron is widely used in industry because of its excellent casting properties, machinability, mechanical properties and low cost. For example, high-strength and ductile cast iron is often used to manufacture parts such as shaft, crankshaft, axle, engine cylinder sleeve, gear and others in transport and industrial equipment [1, 2]. Compared to steels and other cast irons, grey cast iron (GI) has a number of excellent mechanical properties, such as good machinability and vibration absorption. The presence



и промышленном оборудовании [1, 2]. По сравнению со сталями и другими чугунами серый чугун (GI) обладает рядом превосходных механических свойств, таких как хорошая обрабатываемость и поглощение вибраций. Наличие графитовых хлопьев в матрице повышает износостойкость GI. Серый чугун часто используется при изготовлении коленчатых валов для компрессоров, направляющих станков, шестерен, поршневых колец и гильз цилиндров для дизельных двигателей [3-5].

Эксперименты по лазерному термическому упрочнению образцов [6] серого чугуна с размерами $20 \times 10 \times 7$ мм проводились на волоконно-оптической лазерной системе непрерывного действия при мощности лазера 250, 300 и 350 Вт, скорости лазерного сканирования 1, 3 и 5 мм/с, диаметр лазерного луча составляет 1,4 мм, фокусное расстояние от заготовки до лазерного сопла составляет 173 мм, а расход защитного газа аргона составляет 10 л/мин. При постоянной скорости лазерного сканирования 1 мм/с и увеличении мощности лазерного луча с 250 Вт, 300 Вт и 350 Вт соответственно, микротвердость закаленных лазером дорожек изменялась с 780, 792 и 819 HV_{0.3} соответственно, что означает, что с увеличением мощности лазерного луча увеличивалось значение микротвердости. При увеличении скорости лазерного сканирования с 1 до 5 мм/с значение микротвердости для образцов, обработанных лазером, уменьшается с 819, 728 и 666 HV_{0.3} соответственно при постоянной мощности лазера 350 Вт.

Образцы серого чугуна [7] с размерами $40 \times 10 \times 8$ мм были вырезаны из автомобильного цилиндра для лазерной термической обработки их поверхности. Обработка поверхности проводилась с использованием импульсного Nd:YAG-лазера ($\lambda = 1,06$ мкм) с многомодовым пространственным распределением луча в защитной атмосфере аргона. Средняя величина коэффициента поглощения для серого чугуна составляло $32,3 \pm 2,0\%$.

Для отдельных импульсов максимальная глубина составляла 190 мкм, а максимальный диаметр 880 мкм. Микротвердость была измерена на глубине 50 мкм, и ее максимальные значения составили 900 HV. Полученная твердость изменялась от 650 до 900 HV, в зависимости от глубины в упрочненном слое.

Исследованию подвергали образцы [8] серого чугуна с размерами $45 \times 20 \times 10$ мм. Лазерную обработку выполняли при токе 120 А, диаметре лазерного пятна 2 мм, скорости сканирования 2 мм/с, с частотой следования импульсов 6 Гц, длительностью 8 мс. Испытание на износ при возвратно-

of graphite flakes in the matrix increases the wear resistance of GI. Grey cast iron is often used in the manufacture of crankshafts for compressors, machine guides, gears, piston rings and cylinder liners for diesel engines [3-5].

Experiments on laser thermal hardening of samples [6] of gray cast iron with dimensions of $20 \times 10 \times 7$ mm were carried out on a continuous fiber-optic laser system with a laser power of 250, 300 and 350 W, laser scanning speeds of 1, 3 and 5 mm/s, the diameter of the laser beam is 1.4 mm, the focal length from the billet to the laser nozzle is 173 mm, and the flow rate of argon protective gas is 10 l/min. With a constant laser scanning speed of 1 mm/s and an increase in the power of the laser beam from 250 W, 300 W and 350 W, respectively, the microhardness of the laser-hardened tracks changed from 780, 792 and 819 HV_{0.3}, respectively, which means that with an increase in the power of the laser beam, the microhardness value increased. With an increase in the laser scanning speed from 1 to 5 mm/s, the microhardness value for laser-treated samples decreases from 819, 728 and 666 HV_{0.3}, respectively, at a constant laser power of 350W.

Samples of gray cast iron [7] with dimensions of $40 \times 10 \times 8$ mm were cut from an automobile cylinder for laser heat treatment of their surface. The surface treatment was carried out using a pulsed Nd:YAG laser ($\lambda = 1.06$ μm) with a multimode spatial distribution of the beam in a protective argon atmosphere. The average value of the absorption coefficient for gray cast iron was $32.3 \pm 2.0\%$. For individual pulses, the maximum depth was 190 μm , and the maximum diameter was 880 μm . Microhardness was measured at a depth of 50 μm , and its maximum values were 900 HV. The resulting hardness varied from 650 to 900 HV, depending on the depth in the hardened layer.

Samples of [8] gray cast iron with dimensions of $45 \times 20 \times 10$ mm were subjected to the study. Laser processing was performed at a current of 120 A, a laser spot diameter of 2 mm, a scanning speed of 2 mm/s, with a pulse repetition frequency of 6 Hz, a duration of 8 ms.

Wear test during reciprocating sliding of a ceramic ball with a diameter of 4 mm on a laser-hardened flat sample using PAO4 oil. The direction of movement of the ball was perpendicular to the laser-hardened tracks. The initial position in the reciprocating motion was located near the edge of the laser-hardened track. The laser treatment area with surface reflow has a high hardness, approximately 67HRC. The wear resistance of laser-hardened samples was significantly



поступательном скольжении керамического шарика диаметром 4 мм по закаленному лазером плоскому образцу с использованием масла PAO4. Направление движения шарика было перпендикулярно дорожкам, закаленным лазером. Начальное положение при возвратно-поступательном движении находилось вблизи края упрочненной лазером дорожки. Зона лазерной обработки с оплавлением поверхности имеет высокую твердость, приблизительно 67HRC. Износостойкость упрочненных лазером образцов была значительно выше, чем серого чугуна в исходном и объемно закаленном состояниях.

В данном исследовании [9] использовали образцы размером 20×10×5 мм аустенитного ковкого чугуна ADI. Параметры лазерной обработки варьировались в пределах мощности луча 800–1500 Вт, скорости сканирования 20–60 мм/с, диаметра луча 1 мм с оплавлением поверхности и с дефокусировкой луча 20 мм при мощности излучения 800–1200 Вт, скорости 60 мм/с без оплавления поверхности образцов соответственно. Чтобы избежать чрезмерного окисления, облучение проводили с использованием защитного газа аргона с расходом 6 л/мин по центру пучка. Испытания на износ выполняли по схеме «штифт – диск (сталь HRC 63)». Глубина зон закалки в режиме оплавления составила 320–500 и 120–300 мкм при мощности 800–1200 Вт и скорости обработки 20 и 40 мм/с соответственно. Микротвердость в зоне оплавления изменялась в широких пределах 500–1000 HV и достигала своих максимальных значений на глубине 150–250 мкм в зависимости от режима облучения. При лазерном упрочнении без оплавления поверхности образцов микротвердость составляла 800–1200 HV и была значительно выше, чем у оплавленных образцов и подложки, имеющей твердость 350–450 HV. Линейный износ образцов составил 28, 57 и 110 мкм на пути трения 200 м без оплавления поверхности, с оплавлением и материала основы соответственно.

Ковкий чугун [10] был изготовлен в виде отливок и разрезан на образцы с диаметром 63 мм толщиной 7,6 мм. Затем эти образцы подвергали аустенитной обработке в течение 20 мин при температуре 832 °С, для перехода микроструктуры перлита в аустенит. При следующем этапе термообработки образцы с микроструктурой аустенита быстро помещали в печь с более низкой температурой при 232 °С, 288 °С, 398 °С для проведения процесса аустенизации в течение 120 мин для преобразования микроструктуры аустенита в микроструктуру бейнита. Твердость образцов после

higher than that of gray cast iron in the initial and volumetrically hardened states.

In this study [9], samples of 20×10×5 mm austenitic ductile iron ADI were used. Laser processing parameters varied within the limits of beam power 800–1500 W, scanning speed 20–60 mm/s, beam diameter 1 mm with surface reflow and beam defocusing 20 mm at radiation power 800–1200 W, speed 60 mm/s without surface reflow samples, respectively. To avoid excessive oxidation, irradiation was carried out using argon shielding gas with a flow rate of 6 l/min in the center of the beam. Wear tests were carried out according to the “pin-disc (steel NRC63)” scheme. The depth of the quenching zones in the reflow mode was 320–500 and 120–300 μm at a power of 800–1200 W, and processing speeds of 20 and 40 mm/s, respectively. The microhardness in the reflow zone varied within a wide range of 500–1000 HV and reached its maximum values at a depth of 150–250 μm, depending on the irradiation mode. With laser hardening without melting the surface of the samples, the microhardness was 800–1200 HV, and was significantly higher than that of the melted samples and the substrate having a hardness of 350–450 HV. Linear wear of the samples was 28, 57 and 110 μm on the friction path of 200 m without melting the surface, with melting and the base material, respectively.

Ductile iron [10] was made in the form of castings and cut into samples with a diameter of 63 mm and a thickness of 7.6 mm. Then these samples were subjected to austenitic treatment for 20 minutes at a temperature of 832 °C, for the transition of the microstructure of perlite to austenite. At the next stage of heat treatment, samples with an austenite microstructure were quickly placed in a furnace with a lower temperature at 232 °C, 288 °C, 398 °C to carry out the austenization process for 120 minutes to convert the austenite microstructure into a bainite microstructure. The hardness of the samples after heat treatment was 52 (232 °C), 48 (288 °C) and 33 (398 °C) HRC. Laser hardening of the surface was performed using a laser spot with a diameter of 2 mm. The distances between the quenching tracks were 1.5 mm, 3 mm and 4 mm. For testing, a UMT3 friction machine was used when a ball (diameter 4 mm, 75HRC) was moving along a disk with a stroke length of 10 mm. The tests were carried out at a normal load of 400 N, a frequency of reciprocating movements of 2 Hz, for 50 minutes with the sample completely immersed in PAO4 oil. The samples with a distance between the tracks of 4 mm with hardness after



термообработки составила 52 (232 °C), 48 (288 °C) и 33 (398 °C) HRC. Лазерное упрочнение поверхности выполняли с использованием лазерного пятна диаметром 2 мм. Расстояния между дорожками закалки были 1,5 мм, 3 мм и 4 мм. Для испытаний использовали машину трения UMT3 при движении шарика (диаметром 4 мм, 75HRC) по диску с длиной хода 10 мм. Испытания проводили при нормальной нагрузке 400 Н, частоте возвратно-поступательных движений 2 Гц, в течение 50 мин при полном погружении образца в масло PAO4. Наибольшей износостойкостью обладали образцы с расстоянием между дорожками 4 мм с твердостью после объемной термической обработки при 232 °C.

Образцы ковкого чугуна [11] GJS-400-18 (основная ферритная структура) и GJS-700-2 (основная перлитная структура) были получены путем резки отливок с размерами 50×40×30 мм. Процесс лазерного упрочнения выполняли на установке Laserline, LDF-3000-100, Германия. Фокусное расстояние лазера до поверхности образца составляет 195 мм. Интенсивность лазерного излучения составляла 5,69–6,28 Дж/мм³. Испытания на износ при сухом скольжении выполняли по схеме «шар – плоскость» в режиме возвратно-поступательного линейного перемещения при комнатной температуре в соответствии со стандартом ASTM G133-05. Самое высокое значение твердости 1054 HV было получено при обработке GJS-700-2 излучением лазера с интенсивностью 6,28 Дж/мм³. Максимальная твердость образца GJS 400 составляла 924 HV при той же интенсивности излучения. Это можно объяснить тем фактом, что процентное содержание перлита в GJS-400 в пять раз ниже, чем в GJS-700. Значения потерь объема при износе образцов GJS 400 и GJS 700 при нагрузке 5 Н очень близки друг к другу, и они составили 4,82×10⁻³ мм³ и 4,72×10⁻³ мм³ соответственно. Объемные потери образцов закаленных лазерным лучом при нагрузке 5Н составили 3,54×10⁻³ мм³ и 3,27×10⁻³ мм³ для GJS 400 и GJS соответственно.

Образцы высокопрочного чугуна [12] с шаровидным графитом GGG-60 упрочняли лучом волоконного лазера модели YFL-600 с максимальной мощностью 600 Вт с подачей для защиты от окисления газообразного аргона с расходом 25 л/мин. Металлографические исследования показали, что структура мартенсита имела твердость выше 1000 HV. Глубина и ширине дорожек закалки при мощности излучения 500 Вт составила 0,80 мм и 4,3 мм соответственно. Установлено, что диапазон изменения твердости

volumetric heat treatment at 232 °C had the greatest wear resistance.

Malleable cast iron samples [11] GJS-400-18 (main ferritic structure) and GJS-700-2 (main pearlite structure) were obtained by cutting castings with dimensions of 50×40×30 mm. The laser hardening process was performed by the Laserline installation, LDF-3000-100, Germany. The focal length of the laser to the sample surface is 195 mm. The intensity of the laser radiation was 5.69–6.28 J/mm³. Dry slip wear tests were performed according to the “ball-plane” scheme in the mode of reciprocating linear displacement at room temperature in accordance with the ASTM G133-05 standard. The highest hardness value of 1054 HV was obtained by treating GJS-700-2 with laser radiation with an intensity of 6.28 J/mm³. The maximum hardness of the GJS 400 sample was 924 HV at the same radiation intensity. This can be explained by the fact that the percentage of pearlite in GJS-400 is five times lower than in GJS-700. The values of volume losses during wear of the GJS 400 and GJS 700 samples at a load of 5 N are very close to each other, and they amounted to 4.82·10⁻³ mm³ and 4.72·10⁻³ mm³ accordingly. The volume losses of samples hardened by a laser beam at a load of 5N were 3.54·10⁻³ mm³ and 3.27·10⁻³ mm³ for GJS 400 and GJS, respectively.

Samples of high-strength cast iron [12] with spherical graphite GGG-60 were strengthened with a fiber laser beam of the YFL-600 model with a maximum power of 600 W, with a supply of argon gas with a flow rate of 25 l/min to protect against oxidation. Metallographic studies have shown that the structure of martensite had a hardness above 1000 HV. The depth and width of the quenching tracks at 500 W radiation power was 0.80 mm and 4.3 mm, respectively. It was found that the range of variation in the hardness of the sample by the overlap of the tracks is 50% less than that of the sample by the overlap of 20%.

Laser hardening of ductile iron ADI [13] was performed on a continuous CO₂-laser with a different pattern of quenching spots: individual spots (the distance between the spots is equal to the diameter of one spot) (LS), adjacent (non-overlapping) spots (LA) overlapping spots with an overlap of approximately 50% (LO). Wear tests were carried out according to the scheme “pin (diameter 5 mm)-disc (steel AISI D2, 60 HRC)”. The tests were carried out with boundary lubrication using AGIP Rotra LSX 75W-90 oil, at the pressure is 10 MPa and the rotation speed is 1450 min⁻¹. Contact fatigue tests were performed on a modified four-ball tester (ball steel 100Cr6 with a diameter of



образца перекрытием дорожек 50% меньше, чем у образца перекрытием 20%.

Лазерное упрочнение ковкого чугуна ADI [13] выполнялась на непрерывном CO₂-лазере с различным рисунком пятен закалки: отдельные пятна (расстояние между пятнами равно диаметру одного пятна) (LS), смежные (неперекрывающиеся) пятна (LA), перекрывающиеся пятна с перекрытием приблизительно 50% (LO). Испытания на износ проводились по схеме «штифт (диаметр 5 мм) – диск (сталь AISI D2,60 HRC)». Испытания проводились при граничной смазке с использованием масла AGIP Rotra LSX 75W-90, при давлении 10 МПа и частоте вращения 1450 мин⁻¹. Испытания на контактную усталость выполняли на модифицированном четырехшариковом тестере (шар сталь 100Cr6 диаметром 12,7 мм) при нагрузке 300 Н и контактным давлением по Герцу 2,5 ГПа. Отдельные пятна, закаленные лазером, имели мартенситную структуру с твердостью 770 HV глубиной 150 мкм. Твердость перекрывающихся пятен варьировалась от 450 до 650 HV. Испытания на износ при граничной смазке показали, что образцы, закаленные лазером, показали лучшие результаты, чем образцы без лазерной обработки. Образцы ADI, с упрочненными лазером пятнами, отделенными друг от друга, выдержали $2,7 \times 10^4$ цикла, а поверхности образцов из смежных пятен показали усталостную долговечность контакта при качении $6,9 \times 10^5$ циклов.

Материалом образцов, использованных в исследовании [14], был серый чугун ASTM A48 – класс 30 с размерами 10×10×10 мм, который применяется в автомобильном производстве для изготовления цилиндров, тормозных барабанов и поршней. Лазерное упрочнение выполняли на волоконном лазере мощностью 10 кВт, с энергией импульса 100 мкДж, частотой повторения 3–500 кГц. Для испытаний на износ по схеме «диск – палец» по стандарту ASTM-F732-82 использовалась машина трения с частотой вращения двигателя 490 мин⁻¹. Путь трения по диску составлял 82 мм, скорость скольжения 3,5 мм/мин, время испытаний 15, 20, 35, 50 и 65 мин. Глубина слоя расплава была измерена по среднему из пяти значений, составляла 0,3456, 0,462 и 0,5728 мм для различных длительностей импульсов 0,75, 1 и 1,5 нс соответственно. Было установлено, что микротвердость уменьшалась с увеличением длительности импульса. Наименьшие потери массы закаленных образцов наблюдались при использовании импульса длительностью 0,75 нс. Снижение скорости износа

(12.7 mm) at a load of 300N and a contact pressure of Hertz 2.5 GPa. Individual spots hardened by laser had a martensitic structure with a hardness of 770 HV and a depth of 150 μm. The hardness of the overlapping spots varied from 450 to 650 HV. Wear tests with boundary lubrication showed that laser-hardened samples showed better results than samples without laser treatment. ADI samples with laser-hardened spots separated from each other withstood $2.7 \cdot 10^4$ cycles, and the surfaces of samples from adjacent spots showed a rolling fatigue life of $6.9 \cdot 10^5$ cycles.

The sample material used in the study [14] was grey cast iron ASTM A48- Class 30 with dimensions of 10×10×10 mm, which is used in automotive production for the manufacture of cylinders, brake drums and pistons. Laser hardening was performed on a fiber laser with a power of 10 kW, with a pulse energy of 100 μJ, a repetition frequency of 3–500 kHz. For wear tests according to the “disk-finger” scheme according to the ASTM-F732-82 standard, a friction machine with an engine speed of 490 min⁻¹ was used. The friction path on the disc was 82 mm, the sliding speed was 3.5 mm/min, the test time was 15, 20, 35, 50 and 65 min. The depth of the melt layer was measured by the average of five values was 0.3456, 0.462 and 0.5728 mm for different pulse durations of 0.75, 1 and 1.5 ns, respectively. It was found that the microhardness decreased with increasing pulse duration. The smallest mass losses of hardened samples were observed when using a pulse with a duration of 0.75 ns. The decrease in the wear rate was 38–78%. The wear resistance after laser treatment has doubled.

Two samples of nickel-chromium alloy made of white cast iron [15] were cast into molds in the form of rods with dimensions of 15×15×80 mm and 10×10×55 mm. The surface treatment was performed on an Nd:YAG, Rofin-Sinar diode laser with a power of 0.6, 0.8 and 1.0 kW, a beam travel speed of 3, 4 and 5 mm/s at a radiation power density of 6–17 J/mm². The wear test was performed according to the “pin-ring” scheme without lubrication for samples after volumetric thermal hardening (VTH) and laser hardening (LH) at room temperature. The depth of the hardening zones was 25–500 μm at a radiation power density of 6,17 J/mm², respectively. The microhardness of the zones after laser quenching increased almost three times from 580 to 1455 HV. Optimal conditions for increasing wear resistance correspond to the highest energy density of the laser.

The purpose of our work was to determine the influence of processing modes on the parameters of

составило 38–78%. Износостойкость после лазерной обработки увеличилась в два раза.

Два образца никель-хромового сплава из белого чугуна [15] были отлиты в формы в виде стержней с размерами размером 15×15×80 мм и 10×10×55 мм. Обработку поверхности выполняли на диодном лазере Nd:YAG, Rofin-Sinar мощностью 0,6, 0,8 и 1,0 кВт, скоростью перемещения луча 3, 4 и 5 мм/с при плотности мощности излучения 6–17 Дж/мм². Испытание на износ выполняли по схеме «штифт – кольцо» без смазки для образцов после объемного термического упрочнения (ОТУ) и лазерного упрочнения (ЛУ) при комнатной температуре. Глубина зон упрочнения составляла 25–500 мкм при плотности мощности излучения 6, 17 Дж/мм² соответственно. Микротвердость зон после лазерной закалки повысились почти в три раза с 580 до 1455 НВ. Оптимальные условия для повышения износостойкости соответствуют наибольшей плотности энергии лазера.

Целью нашей работы было определение влияния режимов обработки на параметры упрочненных зон и триботехнические характеристики модифицированных слоев.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для лазерного упрочнения использовали образцы серого СЧ20 и ковкого КЧ чугунов с размерами 15×20×70 мм. Обработку образцов проводили на автоматизированном лазерном технологическом комплексе ИМАШ РАН. Для определения параметров упрочненных зон плотность и мощность излучения изменяли в пределах 20–60 Дж/мм² (СЧ20) и 24–120 Дж/мм² (КЧ60-3), скорость перемещения 7–10 мм/с и 2–9 мм/с, диаметр пятна 3,5–5,5 мм соответственно. Лазерное упрочнение проводили расфокусированным и с поперечными колебаниями луча с частотой 216 Гц. Металлографические исследования проводили с использованием цифрового микроскопа, металлографической системы ОМОС М1000 и микротвердомера ПМТ-3.

Испытания на трение и износ проводили по схеме: «широкая сторона чугунного образца (СЧ20) – торец вращающейся втулки сталь 40Х, 49–53 HRC)». Скорость скольжения изменяли ступенчато в пределах 0,25–3,5 м/с при нагрузке 2 МПа. В зону трения подавали масло индустриальное И20 капельным способом.

Построение поверхностей отклика системы выполняли по уравнениям регрессии полученным с помощью полного факторного эксперимента по линейному уравнению [16].

hardened zones and tribotechnical characteristics of modified layers.

EQUIPMENT AND RESEARCH METHODS

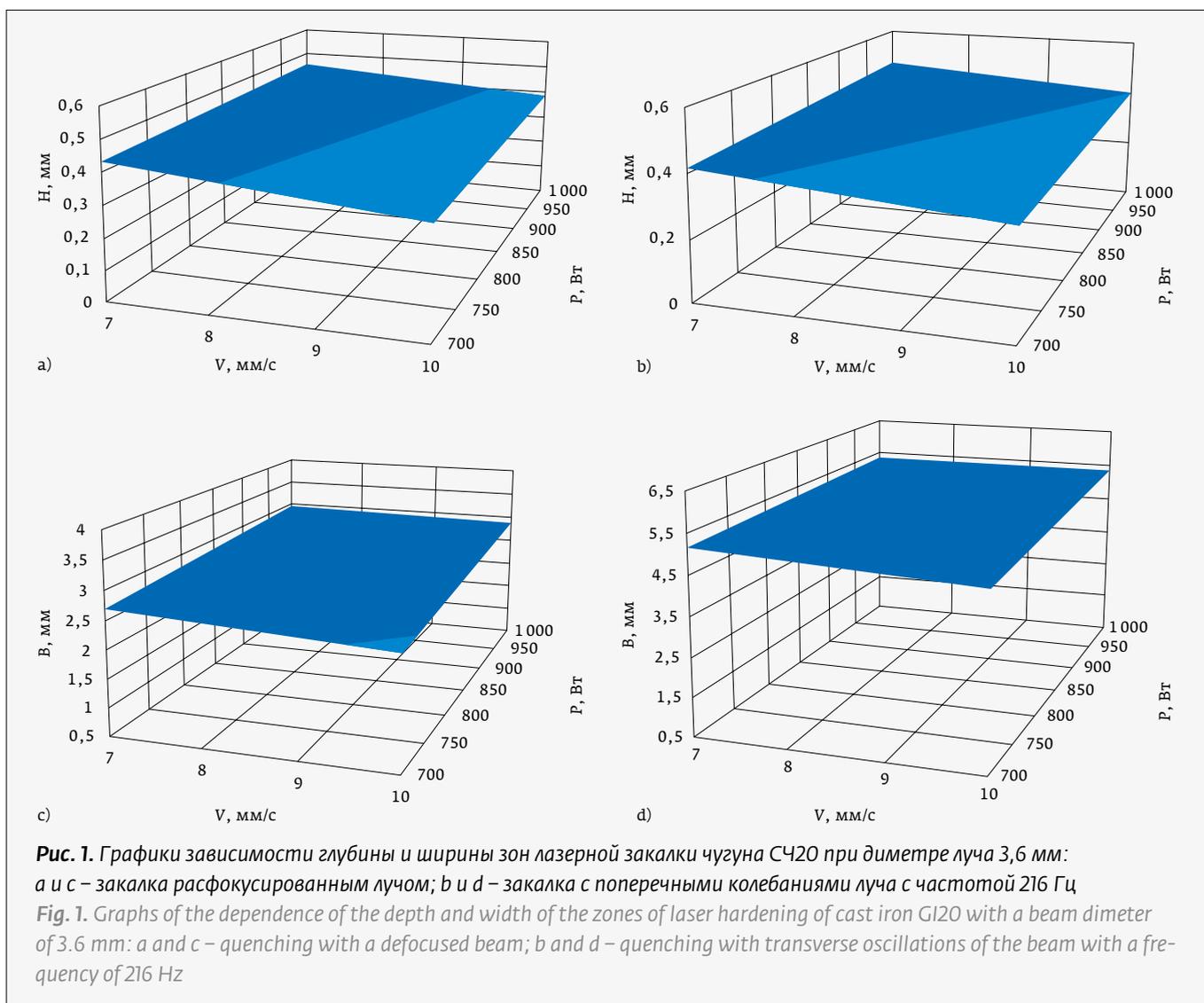
For laser hardening, samples of gray GI20 and malleable DI cast iron with dimensions of 15×20×70 mm were used. The samples were processed at the automated laser technological complex of IMASH RAS. To determine the parameters of the hardened zones, the radiation power density was changed in the range of 20–60 J/mm² (GI20) and 24–120 J/mm² (DI 60–3). The movement speed is 7–10 mm/s and 2–9 mm/s, the spot diameter is 3.5–5.5 mm, respectively. Laser hardening was carried out unfocused and with transverse oscillations of the beam with a frequency of 216 Hz. Metallographic studies were carried out using a digital microscope, the OMOS M1000 metallographic system and the PMT-3 microhardness meter.

Friction and wear tests were carried out according to the scheme: “The wide side of the cast-iron sample (GI20) is the end of the rotating sleeve steel 40Kh, 49–53 HRC)”. The sliding speed was changed stepwise in the range of 0.25–3.5 m/s at a load of 2 MPa. Industrial I20 oil was supplied to the friction zone by drip method.

The construction of the response surfaces of the system was carried out according to regression equations obtained using a complete factorial experiment using a linear equation [16].

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES

The depth and width of the zones of alloying hardening of gray cast iron with a defocused and oscillating beam varied widely and is shown in Fig. 1. The maximum width of 6.5 mm and depth of 0.62 mm were obtained with transverse vibrations of the beam when treated with a beam with a diameter of 5.5 mm. The analysis of the geometric parameters of the cast iron quenching zones showed an increase in processing performance with transverse beam vibrations by 1.5–2 times compared with hardening with a defocused beam. The microhardness of the SCH20 samples varied in the range of 6890–11760 MPa, its large values were observed at the surface of the samples. Fig. 2 shows the cross-section of the hardening zones of cast iron DI60-3 obtained by processing modes with a defocused beam with a diameter of 5.5 mm and with transverse beam oscillations. Laser hardening of ductile iron with a defocused beam at a scanning speed of less than 7 mm/s led to defects such as shells and swellings on the surface of the samples. The transverse oscillations of the beam made it possible to exclude such defects and vary the depth of the quenching zones from the

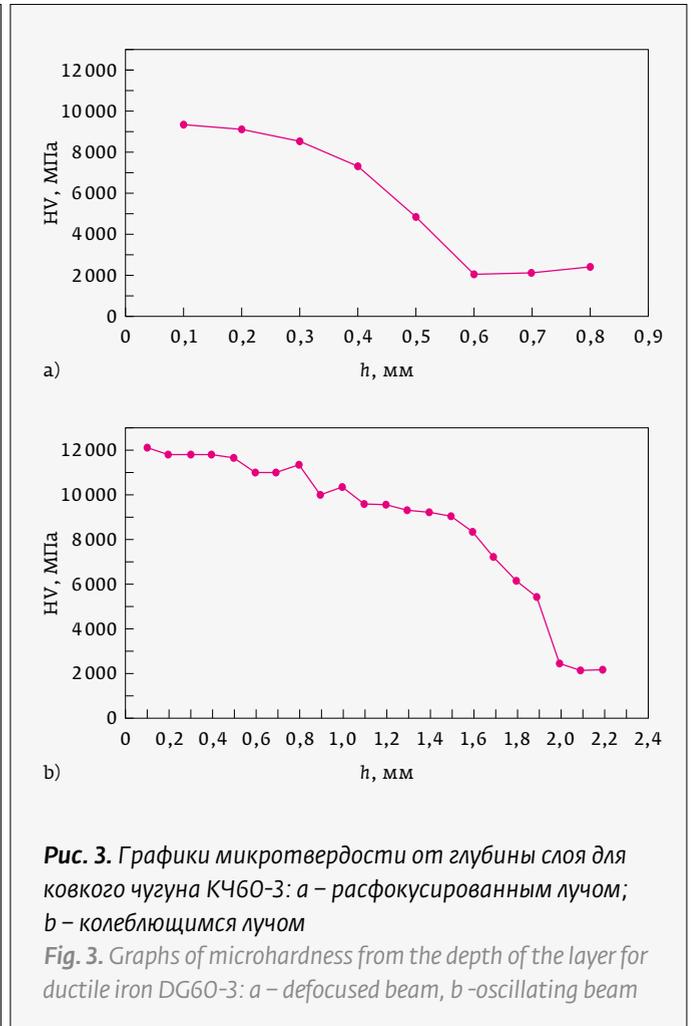


РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Глубина и ширина зон легирования упрочнения серого чугуна СЧ20 расфокусированным и колеблющимся лучом изменялась в широких пределах и представлена на рис. 1. Максимальная ширина 6,5 мм и глубина 0,62 мм получена при поперечных колебаниях луча при обработке лучом диаметром 5,5 мм. Анализ геометрических параметров зон закалки чугуна показал повышение производительности обработки с поперечными колебаниями луча в 1,5-2 раза по сравнению с упрочнением расфокусированным пучком. Микротвердость образцов СЧ20 изменялась в пределах 6890-11760 МПа, большие ее значения наблюдались у поверхности образцов. На рис. 2 представлены микрошлифы зон упрочнения чугуна КЧ60-3, полученные на режимах

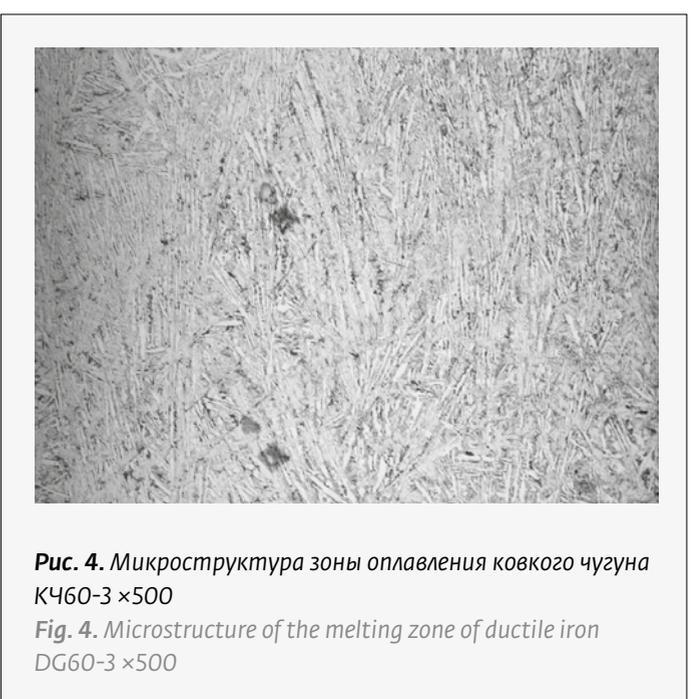
liquid state within 10-790 μm . The maximum depth and width of the quenching zones DI60-3 were 1.8 mm and 11.703 mm, respectively. The microhardness of the laser hardening zones DI60-3 is shown in Fig. 3. The maximum microhardness values of 12100 MPa were obtained in the reflow zone during processing with transverse beam vibrations. The microstructure of the melting zone is shown in Fig. 4. It is an austenite-martensitic mixture.

The results of determining the friction coefficients from the sliding speed of the friction pairs steel 40Kh-G120 are shown in Fig. 5. The maximum friction coefficients of 0.13-0.145 are obtained for the base material of G120 with a hardness of 180-210 HV. A decrease in friction coefficients was observed for all samples up to a sliding speed of 1.5 m/s. The minimum values of the friction coefficients



обработки расфокусированным пучком диаметром 5,5 мм и с поперечными колебаниями луча. Лазерная закалка ковкого чугуна расфокусированным лучом при скорости сканирования меньше 7 мм/с приводила к дефектам типа раковин и наплывов на поверхности образцов. Поперечные колебания луча позволяли исключить подобные дефекты и варьировать глубину зон закалки из жидкого состояния в пределах 10–790 мкм. Максимальная глубина и ширина зон закалки КЧ60-3 составили 1,8 мм и 11,703 мм соответственно. Микротвердость зон лазерного упрочнения КЧ60-3 представлена на рис. 3. Максимальные значения микротвердости 12100 МПа получены в зоне оплавления при обработке с поперечными колебаниями луча. Микроструктура зоны оплавления представлена на рис. 4. Она представляет собой аутенитно-мартенситную смесь.

Результаты определения коэффициентов трения от скорости скольжения пар трения сталь 40Х-СЧ20 представлены на рис 5. Максимальные



коэффициенты трения 0,13–0,145 получены для материала основы СЧ20 с твердостью 180–210 НВ. Для всех образцов до скорости скольжения 1,5 м/с наблюдалось снижение коэффициентов трения. Минимальные значения коэффициентов трения 0,07–0,09 получены на образцах, обработанных при плотности энергии 46 Дж/мм².

На рис. 6 представлены зависимости изменения интенсивности изнашивания образцов материала основы и упрочненных лазерным лучом. Износостойкость образцов возрастала с повышением плотности энергии в 2,5–3,5 раза по сравнению с материалом основы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты показали, что при лазерной обработке чугунов микротвердость упрочненных слоев значительно возрастает по сравнению с материалом основы. Разработанная технология лазерного упрочнения с использованием поперечных колебаний луча имеет большую производительность, чем при закалке расфокусированным лучом. Процесс упрочнения с использованием лазерного излучения может быть применен к деталям типа шейки вала, коленчатым, кулачковым валам, втулкам цилиндров дизелей и другим деталям, выполненным из серых и ковких чугунов для увеличения ресурса их работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология лазерного упрочнения серого чугуна СЧ20 и ковкого чугуна КЧ60-3 с применением поперечных колебаний лазерного луча, что позволило повысить производительность обработки в 1,5–2,0. Повышение плотности энергии при лазерном упрочнении повышало износостойкость в 2,5–3,5 раза и снижало потери на трение в паре со сталью 40Х на 30–60% при смазке индустриальным маслом И20.

REFERENCES

1. Aliakbari K., Nejad R. M., Mamaghani T. A., Pouryamout P., Asiabarak H. R. Failure analysis of ductile iron crankshaft in compact pickup truck diesel engine. *Structures*. 2022; 36:482–492. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.12.034.
2. Artola G., Gallastegi I., Izaga J., Barrena M., Rimmer A. Austempered ductile iron (ADI) alternative material for high-performance applications. *International Journal of Metalcasting*. 2017; 11 (1):131–135. DOI: 10.1007/s40962-016-0085-8.
3. Suh A., Patel J., Polycarpou A., Corny T. Scuffing of cast iron and Al390-T6 materials used in compressor applications. *Wear*. 2006; 260(7–8):735–44. DOI: 10.1016/j.wear.2005.04.013.
4. Keller J., Fridrici V., Kapsa P., Vidaller S., Huard J. Influence of chemical composition and microstructure of gray cast iron on wear of heavy duty diesel engines cylinder liners. *Wear*. 2007; 263 (7–12): 1158–64. DOI: 10.1016/j.wear.2007.01.091.
5. Truhan J., Qu J., Blau P. A rig test to measure friction and wear of heavy duty diesel engine piston rings and cylinder liners using realistic lubricants.

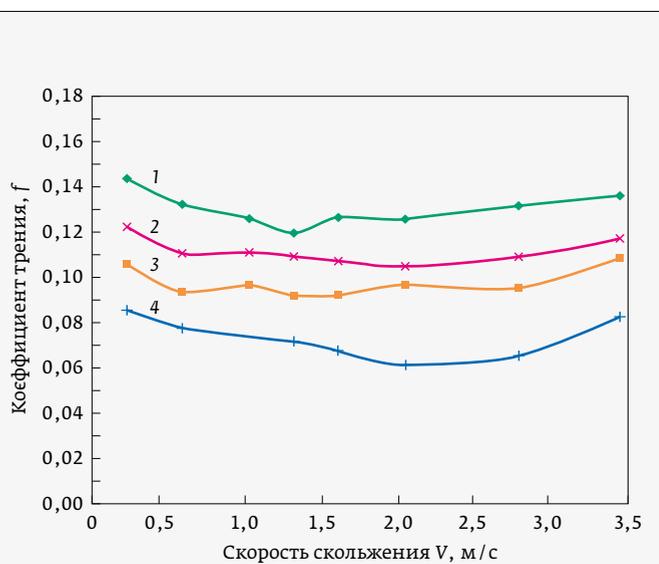


Рис. 5. Зависимость коэффициентов трения скольжения от скорости в паре трения СЧ20 – сталь 40Х: 1 – СЧ20 (180–210 НВ), 2 – ЛУ-25 Дж/мм², 3 – 32 Дж/мм², 4 – 46 Дж/мм²

Fig. 5. The dependence of the sliding friction coefficients on the speed in the friction pair G120–steel 40X: 1 – G120 (180–210 NV), 2 – LH, 25 J/mm², 3 – LH, 32 J/mm², 4 – LH, 46 J/mm²

0.07–0.09 were obtained on samples treated at an energy density of 46 J/mm².

Fig. 6 shows the dependences of the change in the wear intensity of the samples of the base material and hardened by a laser beam. The wear resistance of the samples increased with an increase in energy density by 2.5–3.5 times compared to the base material.

DISCUSSION OF THE RESULTS

The results obtained showed that during laser treatment of cast iron, the microhardness of the hardened layers increases significantly compared to the base material. The developed laser hardening technology using transverse beam vibrations has a higher performance than quenching with a defocused beam. The hardening process using laser radiation can be applied to shaft neck type parts, crankshafts, camshafts, diesel cylinder bushings and other parts made of gray and ductile cast iron to increase their service life.

CONCLUSION

The technology of laser hardening of gray cast iron G120 and ductile cast iron DI60-3 with the use of transverse

rosmould & 3D-TECH

rosmould.ru

Международная выставка
пресс-форм и штампов,
оборудования
и технологий для
производства изделий

6–8 июня 2023

МВЦ «Крокус Экспо», Москва

3D-TECH

Специализированная
экспозиция аддитивных
технологий и 3D-печати



Промокод для получения
бесплатного билета
RM23-HV4RV

GA GEFERA MEDIA

- Tribol. Int.* 2005; 38 (3): 211–218. DOI:10.1016/j.triboint.2004.08.003.
6. **Wagh, S.V., Ingole, S., Bhatt, D.V., Menghani, J.V., Rathod, M. J.** Effect of Process Parameters on Surface Properties of Laser-Hardened Cast Iron. In: TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. *The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham.* 2019; 733–743. DOI: 10.1007/978-3-030-05861-6_72.
 7. **Monteiro W. A., Silva E. M. R., Silva L.V, Rossi W., Buso S. J.** Microstructural and mechanical characterization of gray cast iron and AISi alloy after laser beam hardening. *Mater. Sci. For.* 2010; 638–642; 769–774. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.769
 8. **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. *J. Mater. Res. Technol.* 2020; 9 (2):2037–2043. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.12.036 2238–7854.
 9. **Roy A., Manna I.** Laser surface engineering to improve wear resistance of austempered ductile iron. *Materials Science and Engineering.* 2001; 297: 85–93.
 10. **Han X., Zhang Z., Pan Y, Barber G. C. Yang H., Qiu F.** Sliding wear behavior of laser surface hardened austempered ductile iron. *Journal of Materials Research and Technology.* 2020; 9 (6): 14609–14618. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.050.
 11. **Küçük Y., Altas E., Topcu M. E.** A comparative analysis of the effect of laser surface treatment on the dry sliding wear behavior of ductile cast irons with different microstructures. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics.* 2023; 274:170540. DOI: 10.1016/j.ijleo.2023.170540.
 12. **Ghaini F. M., Ameri M. H., Torkamany M. J.** Surface transformation hardening of ductile cast iron by a 600w fiber laser. *Optik.* 2019; 163758. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163758.
 13. **Zammit A., Abela S., Betts J. C., Michalczewski R., Kalbarczyk M., Grech M.** Scuffing and rolling contact fatigue resistance of discrete laser spot hardened austempered ductile iron. *Wear.* 2019; 422–423: 100–107. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.061.
 14. **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; 44(2): 141–149.
 15. **Al-Sayed S.R., Elshazli A. M., Hussein A. H. A.** Laser Surface Hardening of Ni-hard White Cast Iron. *Metals.* 2020; 10:795. DOI: 10.3390/met10060795.
 16. **Biryukov V. P., Isakov V. V., Fedotov A. Y., Baulin D. A.** Assessing the effect of laser processing modes on the parameters of hardened zones of steels and their wear resistance. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability.* 2020; 49(7): 604–610. DOI: 10.3103/S1052618820070043.
 17. **Бирюков В. П., Исаков В. В., Федотов А. Ю., Баулин Д. А.** Оценка влияния режимов лазерной обработки на параметры зон закалки сталей и их износостойкость. *Проблемы машиностроения и автоматизации.* 2020; 1: 28–35.

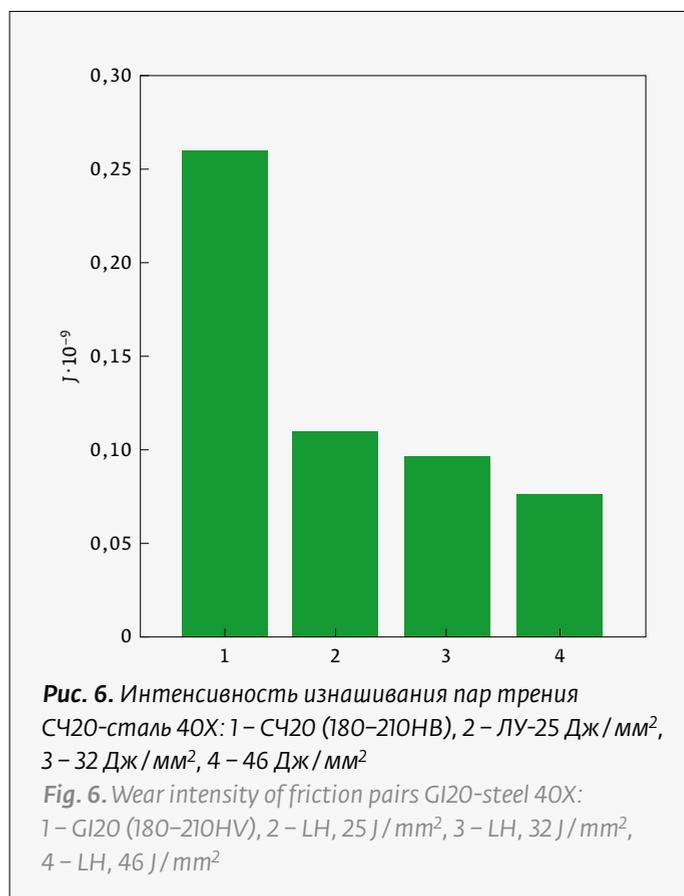


Рис. 6. Интенсивность изнашивания пар трения С420-сталь 40Х: 1 – С420 (180–210HV), 2 – ЛУ-25 Дж/мм², 3 – 32 Дж/мм², 4 – 46 Дж/мм²

Fig. 6. Wear intensity of friction pairs G120–steel 40X: 1 – G120 (180–210HV), 2 – LH, 25 J/mm², 3 – LH, 32 J/mm², 4 – LH, 46 J/mm²

vibrations of the laser beam has been developed, has allowed to increase the processing performance by 1.5–2.0. The increase in energy density during laser hardening increased wear resistance by 2.5–3.5 times and reduced friction losses paired with 40Kh steel by 30–60% when lubricated with industrial oil I20.

ABOUT AUTHOR

Biryukov V. P., Cand. of. Eng., Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-9278-6925

ОБ АВТОРЕ

Бирюков В. П., к. т. н., Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-9278-6925





МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВОЕННО-МОРСКОЙ САЛОН-2023

Организатор



Выставочный
оператор



МКВ

При поддержке



21–25 июня

Кронштадт
Конгрессно-выставочный центр
Музея военно-морской славы

FLEET-EXPO.RU