



Повышение ресурса работы инструментальных сталей при лазерной закалке

В. П. Бирюков, Я. А. Горюнов
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН,
Москва, Россия

В работе рассмотрены результаты металлографических и триботехнических испытаний инструментальной стали X12 в паре трения с объемно закаленной сталью 40X при смазке индустриальным маслом И20. Показано, что применение поперечных колебаний лазерного луча значительно повышает производительность обработки. Установлено, что качественное лазерное термическое упрочнение кромок образцов возможно только с применением поперечных колебаний луча при воздействии непрерывным лазерным излучением. При оптимальных режимах лазерной обработки и упрочнении 50% поверхности трения образцов износостойкость повышалась в 1,6 раза по сравнению с объемной закалкой.

Ключевые слова: лазерное упрочнение, микротвердость, кромка образца, интенсивность изнашивания, износостойкость

Статья получена: 29.03.2024

Статья принята: 12.04.2024

ВВЕДЕНИЕ

Инструментальная сталь – один из важных материалов в машиностроении: он широко используется для изготовления штампов, пресс-форм, режущего инструмента и других компонентов, которые подвергаются высоким нагрузкам, для обеспечения требуемой износостойкости. Однако низкие триботехнические свойства поверхности и недостаточная износостойкость могут сократить срок службы деталей при интенсивном износе на производстве. Соответственно, растет интерес к улучшению

Increasing the Operational Life of Chisel Steels in the Case of Laser Hardening

V. P. Biryukov, Ya. A. Goryunov
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The paper examines the results of micrographic and tribotechnical tests of chisel steel X12 in a friction pair with the through hardened steel 40X when lubricated with the industrial oil И20. It is shown that the use of lateral oscillations of the laser beam significantly increases the processing productivity. It has been established that the high-quality laser thermohardening of sample edges is possible only by applying lateral oscillations of the beam when exposed to the continuous laser radiation. In the case of optimal laser processing conditions and hardening of 50% of the sample friction surface, the wear resistance properties have been increased by 1.6 times compared to the through hardening.

Key words: laser hardening, microhardness, sample edge, wear intensity, wear resistance

Article received: March 29, 2024

Article accepted: April 12, 2024

INTRODUCTION

The chisel steel is one of the important materials in mechanical engineering: it is widely used for the production of dies, molds, cutting tools and other components that are subject to the high loads in order to ensure the required wear resistance. However, the low tribological properties of the surface and insufficient wear resistance can reduce the operational life of parts in the case of intense production wear. Accordingly, there is growing interest in improving the surface properties due to various surface modifications. The use of surface hardening by the laser radiation is a current solution to the issue of

свойств поверхности за счет различных модификаций поверхности. Использование упрочнения поверхности лазерным излучением является актуальным решением задачи продления срока эксплуатации деталей и инструментов в машиностроении [1-3].

Известны результаты проведенных исследований с образцами сталей T1 (0,81% C) и D2 (1,6% C) (AISI), которые были подвергнуты объемной термообработке до твердости 820-830 HV (T1) и 770-780 HV (D2) [2,3]. Поверхностное упрочнение проводилось CO₂-лазером в режиме, обеспечивавшем плавление поверхности. Мощность излучения составляла 1000 Вт, плотность мощности $9,5 \cdot 10^3$ Вт/см² и скорость сканирования лучом 6 мм/с. Структура для сплава T1, образовавшаяся после быстрой кристаллизации, состояла из высокоуглеродистого мартенсита, остаточного аустенита и карбид-аустенит-мартенситной эвтектики вдоль границ дендритов. Установлено, что основная карбидная фаза относится к типу M₆C. Основным структурным компонентом расплавленного слоя стали D2 является структурно свободный аустенит, выделяющийся из расплава. Также присутствовало минимальные количества эвтектики аустенит-карбид с карбидными фазами типа M₇C₃. Твердость стали T1 увеличивалась до 980-1000 HV, в то время как у стали D2 она снижалась до 450 HV.

Инструментальные ванадиевые стали обладают очень однородной микроструктурой и равномерным распределением зерен по размеру по сравнению с другими обычными инструментальными сталями. и широко используются в операциях вырубки, штамповки, глубокой вытяжки [4]. Образцами материалов, использованных в эксперименте, были Vanadis 4 (1,35% C) и Vanadis 10 (2,45% C). Поверхности образцов были обработаны диодным лазером модели REIS P. 203 HPDL при мощности излучения лазера 3 кВт, скорости сканирования лазерного луча 4 мм/с. Температура на поверхности стали варьировалась в пределах 1100-1300 °C. Испытания на износ выполняли по схеме «штифт (закаленный лазером образец) – диск (сталь 62 HRC) по стандарту ASTM G 99-95a. Нагрузка на образцы составляла 10 Н, а частота вращения диска 310 мин⁻¹. Для обоих образцов стали марки Vanadis увеличение микротвердости и, следовательно, износостойкости, объясняется более мелким размером зерен. Образцы Vanadis 10 показали повышение износостойкости более, чем в три раза, по сравнению с материалом основы.

extending the operational life of parts and tools in mechanical engineering [1-3].

The results of studies with the samples of steels T1 (0.81% C) and D2 (1.6% C) (AISI) subjected to the through heat treatment to a hardness of 820-830 HV (T1) and 770-780 HV (D2), are well-known [2, 3]. The surface hardening was performed by a CO₂ laser in a mode that ensured the surface melting. The emission power was 1000 W, the power density was $9.5 \cdot 10^3$ W/cm² and the beam scanning speed was 6 mm/s. The structure for the T1 alloy generated after rapid crystallization consisted of the high-carbon martensite, retained austenite, and carbide-austenite-martensitic eutectic along the dendrite boundaries. It has been established that the main carbide constituent belonged to the M₆C type. The basic structural component of the molten D2 steel layer is structurally free austenite that precipitates from the liquid alloy. The minimal amounts of austenite-carbide eutectic with carbide phases of the M₇C₃ type were also available. The T1 steel hardness was increased to 980-1000 HV, while for D2 steel it was decreased to 450 HV.

The vanadium chisel steels have a very uniform microstructure and uniform grain size distribution compared to other conventional chisel steels and are widely used in the cutting, stamping, and deep drawing operations [4]. The samples of materials used in the experiment were Vanadis 4 (1.35% C) and Vanadis 10 (2.45% C). The sample surfaces were processed by a diode laser REIS P. 203 HPDL at a laser radiation power of 3 kW and a laser beam scanning speed of 4 mm/s. The temperature on the steel surface varied between 1100 °C and 1300 °C. The wear tests were performed according to the pin (laser-hardened sample) – disk (steel 62 HRC) scheme according to ASTM G 99-95a. The sample load was 10 N, and the disk rotation speed was 310 min⁻¹. For both Vanadis steel samples, the increased microhardness and, consequently, wear resistance was explained by the smaller grain size. The Vanadis 10 samples demonstrated an increased wear resistance by more than three times compared to the base material.

The laser surface treatment can be considered as a possible solution for modifying the surfaces of various solid materials [5], since the ability of a high-energy laser beam allows for rapid heating and cooling rates (10^3 - 10^6 °C/s) that leads to the significant changes in their surface properties.

In the paper [6], AISI H13 chisel steel in a heat-treated condition (austenitization at 1030 °C for 10 minutes, followed by quenching and double tempering at a temperature of 620 °C for 2 hours to obtain a hardness of 46-48 HRC) was used as a substrate. The



Лазерная обработка поверхности может рассматриваться как возможное решение для модификации поверхностей различных твердых материалов [5], поскольку способность высокоэнергетического лазерного луча позволяет обеспечивать быстрые скорости нагрева и охлаждения (10^3 – 10^6 °C/c), что приводит к значительным изменениям в свойствах их поверхности.

В работе [6] инструментальную сталь AISI H13 в термообработанном состоянии (аустенитизация при 1030 °C в течение 10 мин с последующей закалкой и двойным отпуском при температуре 620 °C в течение 2 ч для получения твердости 46–48 HRC) использовали в качестве подложки. Лазерная обработка поверхности проводилась диодным лазером при постоянной скорости обработки 4 мм/с. Мощность лазера в этой работе варьировалась от 1250 Вт до 2000 Вт. Износостойкость обработанной лазером поверхности определяли с использованием схемы «шар (оксид алюминия диаметром 8 мм) – диск». При выбранных плотностях лазерной энергии 62,5 и 75 Дж/мм² зарегистрированные пиковые температуры поверхности составили 1200 ± 50 °C и 1450 ± 50 °C соответственно. При плотности приложенной лазерной энергии 100 Дж/мм² температура поверхности превысила предел пирометра и предположительно превышала температуру плавления (1450 °C) инструментальной стали AISI H13. Испытание на износ показало значительное уменьшение объема износа образцов, обработанных лазером с приложенной плотностью энергии лазера 75 Дж/мм². Лазерная обработка поверхности позволила добиться уменьшения износа при фреттинге с точки зрения снижения скорости износа и коэффициента трения по сравнению образцами исходной стали.

Процесс лазерной модификации поверхности [7] инструментальной стали AISI H13 проводили для достижения максимальной твердости и минимальной шероховатости поверхности. Для обработки образцов использовали CO₂-лазер Rofin DC-015 с диффузионным охлаждением при варьировании мощности излучения в пределах 760–1500 Вт. Образцы диаметром 10 мм были разрезаны на части длиной 100 мм для обработки по заранее определенной площади по окружности. Глубина модифицированной лазером поверхности составляла 37–150 мкм. Средняя шероховатость поверхности была 1,8 мкм. Максимальная достигнутая твердость составила от 728 до 905 HV0.1 на различных режимах обработки

Для исследования [8] использовалась инструментальная сталь ICD-5. Образцы находились

laser surface treatment was performed by a diode laser at a constant processing speed of 4 mm/s. The laser power in this paper varied from 1250 W to 2000 W. The wear resistance of the laser-treated surface was determined using a ball (aluminum oxide with a diameter of 8 mm) and disk scheme. At the selected laser energy densities of 62.5 and 75 J/mm², the registered peak surface temperatures were 1200 ± 50 °C and 1450 ± 50 °C, respectively. At an applied laser energy density of 100 J/mm², the surface temperature exceeded the pyrometer limit and was believed to exceed the melting point (1450 °C) of AISI H13 chisel steel. The wear test demonstrated a significant reduction in the wear scope of the samples treated by a laser with an applied laser energy density of 75 J/mm². The laser surface treatment made it possible to achieve a wear reduction during fretting in terms of the decreased wear rate and friction coefficient compared to the original steel samples.

The laser surface modification process [7] of AISI chisel steel H 13 was carried out to achieve the maximum hardness and minimum surface roughness. A Rofin DC-015 CO₂ laser with the diffusion cooling was used to process the samples when varying the radiation power within the range of 760–1500 W. The samples with a diameter of 10 mm were cut into pieces with the length of 100 mm for processing a predetermined area in a circular motion. The laser-modified surface depth was 37–150 μm. The average surface roughness was 1.8 μm. The maximum hardness achieved was 728–905 HV0.1 in various processing modes.

For the study [8], the chisel steel ICD-5 was used. The samples were in a completely annealed condition and had a predominantly pearlite microstructure with an average hardness of 340 HV. This material is suitable for cutting the parts of molding dies during the production of car body parts. The laser hardening process was performed by a YFL-600 optical fiber laser, with a radiation power of 500 W, a spot diameter of 4.2 mm and a moving speed of 1.5–7 mm/s. At an energy density of 35 W/mm² a martensite area with a hardness of 780–800 HV was obtained. Increase in the energy density to 59 W/mm² made it possible to obtain two areas in the hardening track: the first martensitic area with a hardness of 800–960 HV and the second area of incomplete hardening with a hardness of 600–790 HV. A further increase in the energy density up to 81 W/mm² resulted in three hardening areas: the first hardening area from the liquid state with a hardness of 830–940 HV, the second hardening area from the solid state with a hardness of 690–820 HV and the third area of

в полностью отожженном состоянии и имели преимущественно перлитную микроструктуру со средней твердостью 340 HV. Этот материал применим для обрезки деталей формовочных матриц при производстве деталей кузова автомобиля. Лазерное упрочнение на волоконном лазере YFL-600, при мощности излучения 500 Вт, диаметре пятна 4,2 мм и скорости перемещения 1,5 до 7 мм/с. При плотности энергии 35 Вт/мм² получена зона мартенсита с твердостью 780–800 HV. Увеличение плотности энергии до 59 Вт/мм² позволило получить две зоны в дорожке упрочнения первую мартенситную зону с твердостью 800–960 HV и вторую зону неполной закалки с твердостью 600–790 HV. Дальнейшее повышение плотности энергии до 81 Вт/мм² привело к получению трех зон упрочнения, первой закалки из жидкого состояния с твердостью 830–940 HV, второй зоны закалки из твердого состояния с твердостью 690–820 HV и третьей зоны неполной закалки с твердостью 490–680 HV.

Для лазерного упрочнения [9] использовали образцы инструментальной стали AISI M2 с размерами 30×20×10 мм в отожженном состоянии с твердостью 220 HV. Обработку выполняли с использованием Nd:YAG-лазера при мощности излучения 400, 800, 1200, 1600 и 1800 Вт, диаметром пятна 1, 2, 3 и 4 мм и скорости обработки 4, 2, 1 и 0,5 м/мин соответственно. Для защиты от окисления использовался газ аргон с расходом 10 л/мин. Зона закалки глубиной 1,25 мм с твердостью поверхности 996 HV была получена при мощности лазера 1800 Вт, размера лазерного пятна 4 мм и скорости лазерного излучения 0,5 м/мин. Износостойкость образца, обработанного лазером, на 30% выше, чем у образца, подвергнутого обычной термообработке, и на 90% выше, чем у исходного материала.

Материалом, использованным в исследовании [10], стала инструментальная сталь X12, которая была поставлена в отожженном состоянии. Образцы представляли собой диски диаметром 31 мм и толщиной 5 мм. Для лазерной обработки использовали импульсный Nd:YAG-лазер с энергией импульса 12 Дж, частотой 15 Гц, фокусным расстоянием 20 мм, длительностью импульса 6 мс и скорости лазерного сканирования 5,6 мм/с. Испытания на износ проводили на машине трения по схеме «Шар (диаметром 6 мм Al₂O₃ с твердостью 1500 HV) – диск (упрочненный лазером образец с шероховатостью 0,2 мкм) при нагрузке 50 Н, с частотой вращения 400 мин⁻¹ на пути трения 228 м. Ширина и средняя глубина расплавленной ванны составили около 1450 и 200 мкм соответ-

incomplete hardening with a hardness of 490–680 HV.

The AISI M2 chisel steel samples with the dimensions of 30×20×10 mm and a hardness of 220 HV in annealed state were used for laser hardening [9]. The treatment was performed by an Nd:YAG laser at the emission power of 400, 800, 1200, 1600 and 1800 W, the spot diameters of 1, 2, 3 and 4 mm and treatment speeds of 4, 2, 1 and 0.5 m/min, respectively. To protect against oxidation, gaseous argon was used at a flow rate of 10 l/min. A 1.25 mm deep hardening area with a surface hardness of 996 HV was obtained at a laser power of 1800 W, a laser spot diameter of 4 mm, and a laser speed of 0.5 m/min. The wear resistance of the laser-treated sample was 30% higher than that of a sample subjected to the conventional heat treatment and 90% higher than that of the original material.

The material used in the study [10] was X12 chisel steel that was supplied in an annealed condition. The samples were the disks with a diameter of 31 mm and a thickness of 5 mm. For laser treatment the pulsed Nd:YAG laser with the pulse energy of 12 J, frequency of 15 Hz, focal length of 20 mm, pulse duration of 6 ms and laser scanning speed of 5.6 mm/s was applied. The wear tests were performed on a friction test machine according to the ball (diameter of 6 mm, Al₂O₃ with a hardness of 1500 HV) – disk (laser-hardened sample with a roughness of 0.2 μm) scheme at a load of 50 N, with a rotation speed of 400 min⁻¹ along the friction path of 228 m. The width and average depth of the molten pool were about 1450 and 200 μm, respectively. The structure of the melting area had a cellular morphology with a certain share of dendrites. There were no defects observed. The wear resistance of the remelting area of X12 steel was 74% higher than that of the original steel.

The experimental material [11] was Cr12Mo steel with the sample dimensions of 50×30×20 mm. To increase the laser radiation absorption, the black ink and a mixture of carbon powder were applied to the sample surface with a layer thickness of 0.05 mm. The surface hardening was performed by a CO₂ laser at the radiation powers of 1200, 1400, 1600 and 1800 W with a spot diameter of 3 mm at a scanning speed of 800 mm/min. The wear test of the hardened surface was performed using a MGV02 friction test machine. The quenching tracks obtained at a power of 1600 W had a maximum hardness of 665.7 HV that was approximately 2.5 times higher than the hardness of the substrate. At a laser power of 1800 W, the hardness began to decrease. The results of wear tests using Cr12MoV steel after the laser hardening process demonstrated that the wear resistance of samples



ственно. Структура зоны оплавления имела ячеистую морфологию с некоторой долей дендритов. В ней не наблюдалось дефектов. Износостойкость зоны переплава стали X12 была выше на 74%, чем у исходной стали.

Экспериментальным материалом [11] была выбрана сталь Cr12Mo с размерами образцов 50×30×20 мм. Для повышения поглощения лазерного излучения использовали черные чернила и смесь угольного порошка, нанесенные на поверхность образца с толщиной слоя 0,05 мм. Поверхностная закалка проводилась CO₂-лазером при мощности излучения 1200, 1400, 1600 и 1800 Вт диаметром пятна 3 мм при скорости сканирования 800 мм/мин. Испытание на износ закаленной поверхности проводилось с помощью машины трения MGW02. Дорожки закалки, полученные при мощности 1600 Вт, имели максимальную твердость 665,7 HV, что примерно в 2,5 раза превышало твердость подложки. При мощности лазера 1800 Вт твердость начинала снижаться. Результаты испытаний на износ стали Cr12MoV после лазерной закалки показали, что износостойкость образцов, обработанных при мощности излучения 1600 Вт на 92%, выше, чем исходного материала, и они показали наилучший результат.

Образцы [12] модифицированной инструментальной стали X37CrMoV5-1 диаметром 6 мм и длиной 15 мм были упрочнены двумя способами: традиционными методами и методом лазерной закалки. Лазерная обработка проводилась на экспериментальной лазерной рабочей станции TRUMPF 3003 (TRUMPF Slovakia, Ltd., Кошице, Словакия) со сканирующей оптической головкой и лазерным источником Tru-Fiber400, генерирующим лазерное излучение с длиной волны 1064 нм общей мощностью 400 Вт. Стандартные испытания на абразивный износ проводили на испытательном устройстве AGP-1 (WPM Leipzig, Лейпциг, Германия) путем скольжения базовых поверхностей подготовленных цилиндрических образцов по вращающемуся диску с закрепленной наждачной бумагой Al₂O₃ зернистостью P 120. Испытания выполняли при нагрузке 5Н на пути трения 40 м. После испытания каждого образца производили смену наждачной бумаги. Глубина закаленного лазером слоя составляла 0,4 мм. Образец, переплавленный лазером, показал значительно улучшенную мартенситную микроструктуру, практически не содержащую карбидов, по сравнению с обеими традиционными термообработками. Более того, он содержал значительное количество остаточного аустенита и обладал, как самой

processed at a radiation power of 1600 W was 92% higher than that of the original material, therefore, they showed the best result.

The samples [12] of modified chisel steel X37CrMoV5-1 with a diameter of 6 mm and a length of 15 mm were hardened in two ways: by the conventional methods and laser hardening. The laser treatment was performed on an experimental laser workstation TRUMPF 3003 (TRUMPF Slovakia, Ltd., Kosice, Slovakia) with a scanning optical head and a Tru-Fiber400 laser source generating laser radiation with a wavelength of 1064 nm and a total power of 400 W. The standard abrasive wear tests were carried out by an AGP-1 testing device (WPM Leipzig, Leipzig, Germany) by sliding the base surfaces of prepared cylindrical samples along a rotating disk with the fixed Al₂O₃ abrasive paper with a grit of P 120. The tests were performed at a load of 5 N on the friction path of 40 m. After testing each sample, the abrasive paper was replaced. The laser-hardened layer depth was 0.4 mm. The sample remelted by the laser demonstrated a significantly improved martensitic microstructure, almost free of carbides, compared to both conventional heat treatments. Moreover, it contained a significant amount of retained austenite and had both the highest hardness of 800–900 HV and abrasive wear resistance.

The samples made of chisel steel AISI D2 [13] with a microhardness of 267–300 HV were subjected to the laser treatment in a protective gas environment by a CO₂ laser at a radiation power of 1–8 kW, with a laser beam speed of 5–15 mm/s, and a spot with a diameter of 1 mm. The highest microhardness of the hardened area was 605 HV. The maximum depth of the hardening area was 2150 μm at a radiation power of 7 kW and a beam speed of 10 mm/s. During the laser treatment process with a reduced radiation power, the hardening areas with the higher hardness were generated. When the samples were melted at a higher radiation power, the hardness was decreased due to the partial dissolution of carbides.

The Rofin Sinar FL010 solid-state laser was used to subject the samples [14] made of AISI D2 chisel steel with the dimensions of 69×9×69 mm to the laser surface hardening at a radiation power of 1 kW, the spot with a diameter of 1 mm, a lateral oscillation speed of 1000 mm/s, the vibration amplitude of 10 mm, and the sample movement speed of 40–140 mm/min. To determine the tribological specifications, the tests were performed according to the “ball-plane” scheme under a load of 30 N. A ball with a diameter of 8 mm made of tungsten carbide with a hardness of 94 HRA performed the reciprocating movements with



высокой твердостью 800–900 HV, так и стойкостью к абразивному износу.

Образцы из инструментальной стали AISI D2 [13] микротвердостью 267–300 HV подвергались лазерной обработке в среде защитного газа с помощью CO₂-лазера при мощности излучения 1–8 кВт, скорости перемещения луча лазера 5–15 мм/с, пятном диаметром 1 мм. Наибольшая микротвердость упрочненной зоны составляла 605 HV. Максимальная глубина зоны упрочнения составила 2150 мкм при мощности излучения 7 кВт и скорости перемещения луча 10 мм/с. При лазерной обработке с пониженной мощностью излучения образуются зоны упрочнения с более высокой твердостью, а при оплавлении образцов на более высокой мощности излучения твердость снижается, и это связано с частичным растворением карбидов.

С помощью твердотельного лазера Rofin Sinar FL010 образцы [14] из инструментальной стали AISI D2 с размерами 69×9×69 мм подвергались лазерному поверхностному упрочнению при мощности излучения 1 кВт; пятном диаметром 1 мм; скорости поперечных колебаний 1000 мм/с, амплитуде колебания 10 мм; скорости перемещения образца 40...140 мм/мин. Для определения триботехнических характеристик проводили испытания по схеме «шар-плоскость» при нагрузке 30 Н. Шар диаметром 8 мм из карбида вольфрама твердостью 94 HRA совершал возвратно-поступательные движения с частотой 1 Гц. Длина хода шара составляла 4 мм. После лазерной обработки глубина лунки износа снизилась примерно в 4 раза по сравнению с исходной сталью.

Образцы из инструментальной стали AISI D2 [15] с микротвердостью 290 HV подвергали лазерному импульсному поверхностному упрочнению в среде защитного газа (аргон) с помощью Nd:YAG лазера при пиковых мощностях 0,67–2 кВт, энергии импульсов 4–12 Дж, частоте 20 Гц, длительности 4 и 6 мс, скорости перемещения 3, 6,67 и 10 мм/с, и диаметре пятна 1 мм. Максимальная глубина и ширина зоны упрочнения составляла 1158 и 1328 мкм при энергии импульса 12 Дж (пиковая мощность 2 кВт) и скорости перемещения луча 6,67 мм/с. Микротвердость зон закалки изменялась в пределах 500–800 HV в зависимости от режимов обработки.

Лазерную обработку [16] предварительно объемно закаленной и отпущенной инструментальной стали AISI H11 с твердостью 640–650 HV_{0,05} (52 HRC), проводили с помощью TruFiber 400 лазера при мощности излучения 400 Вт, скорости перемещения луча 70 мм/с, диаметром пятна 2 мм.

а частотой 1 Гц. Длина хода шара составляла 4 мм. После лазерной обработки глубина лунки износа снизилась примерно в 4 раза по сравнению с исходной сталью.

Образцы из инструментальной стали AISI D2 [15] с микротвердостью 290 HV подвергались лазерной обработке в среде защитного газа с помощью Nd:YAG лазера при пиковых мощностях 0,67–2 кВт, энергии импульсов 4–12 Дж, частоте 20 Гц, длительности 4 и 6 мс, скорости перемещения 3, 6,67 и 10 мм/с, и диаметре пятна 1 мм. Максимальная глубина и ширина зоны упрочнения составляла 1158 и 1328 мкм при энергии импульса 12 Дж (пиковая мощность 2 кВт) и скорости перемещения луча 6,67 мм/с. Микротвердость зон закалки изменялась в пределах 500–800 HV в зависимости от режимов обработки.

Лазерную обработку [16] предварительно закаленной и отпущенной инструментальной стали AISI H11 с твердостью 640–650 HV_{0,05} (52 HRC) проводили с помощью TruFiber 400 лазера при мощности излучения 400 Вт, скорости перемещения луча 70 мм/с, диаметром пятна 2 мм. Максимальная глубина и ширина зоны упрочнения составляла 1158 и 1328 мкм при энергии импульса 12 Дж (пиковая мощность 2 кВт) и скорости перемещения луча 6,67 мм/с. Микротвердость зон закалки изменялась в пределах 500–800 HV в зависимости от режимов обработки.

Целью статьи было определить оптимальные режимы лазерной обработки и изучить триботехнические свойства X12 инструментальной стали при лазерной обработке материала с помощью лазерного луча.

EQUIPMENT AND RESEARCH METHODS

Для лазерной обработки образцы X12 инструментальной стали с размерами 20×20×70 мм использовались. Эксперименты по лазерной обработке образцов проводились на автоматизированном лазерно-технологическом комплексе Института механики Российской Академии Наук.



Наибольшая микротвердость упрочненной зоны составляла $857 \text{ HV}_{0,05}$ при глубине слоя закалки $0,28 \text{ мм}$. Определение триботехнических характеристик проводилось на машине трения по схеме «шар (Al_2O_3 , диаметром 8 мм) – диск (образцы инструментальной стали 52 HRC с лазерной закалкой, объемно закаленные и исходной стали» при нагрузке 5 Н со скоростью $0,1 \text{ м/с}$. Радиус дорожки трения и путь трения составили 3 мм и 1000 м , соответственно. Глубина лунки износа образца, обработанного лазером, составила $12,2 \text{ мкм}$, что в $1,36$ раза меньше, чем у закаленного образца с последующим отпуском и в $1,77$ раза меньше, чем у образца в исходном состоянии. Скорость изнашивания образцов, закаленных лазером, составляла $16,6 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, что в $1,5$ раза меньше, чем у объемно закаленного образца с последующим отпуском и в $8,7$ раза меньше, чем у исходной стали.

Целью работы было определение оптимальных режимов лазерного упрочнения и исследование триботехнических свойств инструментальной стали $X12$ при закалке материала расфокусированным и колеблющимся лазерным пучком.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для лазерного упрочнения использовали образцы инструментальной стали $X12$ с размерами $20 \times 20 \times 70 \text{ мм}$. Эксперименты по лазерной закалке образцов проводили на автоматизированном лазерном технологическом комплексе ИМАШ РАН. В качестве изменяемых параметров были выбраны плотность мощности излучения в пределах $20\text{--}70 \text{ Дж/мм}^2$, скорость перемещения $7\text{--}10 \text{ мм/с}$. Лазерное упрочнение проводили расфокусированным и с поперечными колебаниями луча по нормали к скорости обработки с частотой 214 Гц . Металлографические исследования выполняли с использованием цифрового микроскопа, металлографической системы ОМОС М1000 и микротвердомера ПМТ-3.

Триботехнические испытания проводили по схеме: «плоскость (образцы с лазерной закалкой и объемной закалкой стали $X12$) – торец вращающейся втулки (сталь $40X$, $49\text{--}53 \text{ HRC}$)» при скорости скольжения $0,25 \text{ м/с}$ и давлении 2 МПа . Для смазки использовали масло промышленное И20 с подачей в зону трения по одной капле в секунду.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены микрошлифы зон лазерной закалки стали $X12$, полученные при обра-

radiation power density within the range of $20\text{--}70 \text{ J/mm}^2$ and the movement speed of $7\text{--}10 \text{ мм/с}$ were selected as the variable parameters. The laser hardening process was carried out in a spread-out form and with the lateral oscillations of the beam along the normal to the treatment speed with a frequency of 214 Hz . The micrographic studies were performed by a digital microscope, an OMOS M1000 metallographic system and a PMT-3 microhardness tester.

The tribotechnical tests were performed according to the following scheme: “plane (samples with the laser hardening and through hardening of steel $X12$) – end of a rotating bushing (steel $40X$, $49\text{--}53 \text{ HRC}$)” at a sliding speed of $0,25 \text{ м/с}$ and a pressure of 2 МПа . For lubrication, the industrial oil I20 was applied with the feed of one drop per second to the friction area.

EXPERIMENTAL RESULTS

Figure 1 shows the microsections of laser hardening areas of $X12$ steel obtained during the treatment by a spread-out (Fig. 1a and c) and oscillating beam. The spread-out beam hardening led to the melting and partial evaporation of the sample edge material, regardless of the hardening modes that was unacceptable during the laser hardening of the edges of cutting tools such as a guillotine knife or a punch. The use of lateral beam oscillations made it possible to maintain the shape of the sample edges in almost all studied modes. The depth and width of the hardening areas obtained during hardening with a spread-out and oscillating beam was $0.9\text{--}1.8$; $0.55\text{--}0.96$ and $2.5\text{--}3.4$; $3.6\text{--}5.7 \text{ мм}$, respectively.

The microstructures of laser hardening areas are presented in Fig. 2. In the upper part of the melted sample, when exposed to a spread-out beam, a cellular structure with a cell size of $5\text{--}7 \text{ }\mu\text{m}$ was observed, along the boundaries of which there were the light areas of carbide inclusions (Fig. 2a). Figure 2b demonstrates the lower hardening area from the solid state with a transition to the tempering area with the unit sizes of $20\text{--}40 \text{ }\mu\text{m}$ during the spread-out beam treatment. The application of lateral oscillations under the same laser hardening conditions led to a sharp decrease in the size of the structural components. Figure 2c shows microstructure of the upper laser hardened layer consisting of martensite, cementite and carbide inclusions. Figure 2d demonstrates the transition boundary from the hardening structure from the solid state to the partial tempering area.

The microhardness of areas strengthened by the laser beam varied within a wide range of $6700\text{--}11800 \text{ МПа}$. Figure 3a shows a graph of changes in the microhardness depending on the layer depth after the

ботке расфокусированным (рис. 1а и с) и колеблющимся пучком. Упрочнение расфокусированным лучом приводило к оплавлению и частичному испарению материала кромки образца независимо от режимов закалки, что недопустимо при лазерной закалке кромок режущих инструментов типа гильотинный нож или вырубной пуансон. Применение поперечных колебаний луча позволило сохранить форму кромки образцов практически на всех исследованных режимах. Глубина и ширина зон упрочнения полученных при закалке расфокусированным и колеблющимся лучом составляла 0,9–1,8; 0,55–0,96 и 2,5–3,4; 3,6–5,7 мм соответственно.

Микроструктуры зон лазерной закалки представлены на рис. 2. В верхней части оплавленного образца при воздействии расфокусированным лучом наблюдали ячеистую структуру с размером ячеек 5–7 мкм по границам которых расположены светлые зоны карбидные включения (рис. 2а). На рис. 2б представлена нижняя зона закалки из твердого состояния с переходом в зону отпуска с размерами блоков 20–40 мкм при обработке расфокусированным лучом. Применение поперечных колебаний при тех же режимах лазерной закалки приводило к резкому снижению размеров структурных составляющих. На рис. 2с представлена микроструктура верхнего слоя лазерной закалки, состоящая из мартенсита, цементита и карбидных включений. На рис. 2д представлена граница перехода от структуры закалки из твердого состояния к зоне частичного отпуска.

Микротвердость упрочненных лазерным лучом зон изме-

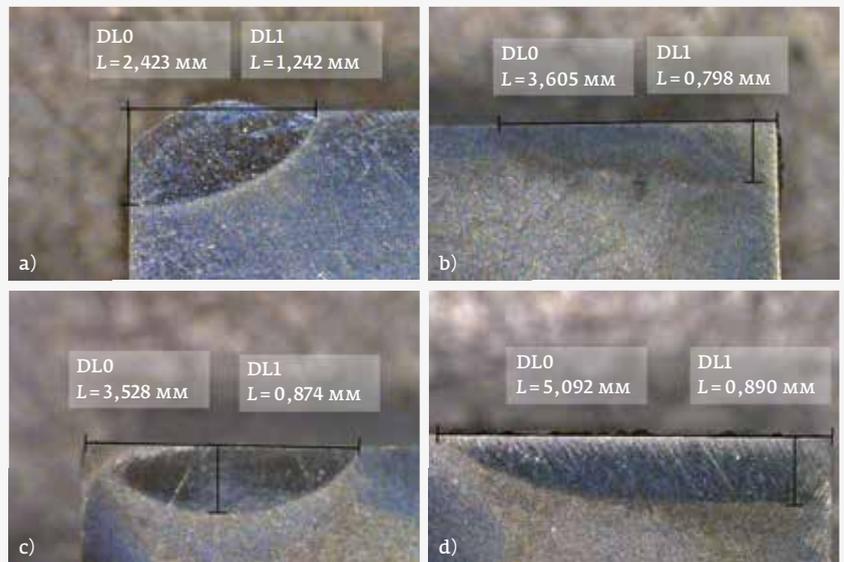


Рис. 1. Микрошлифы зон лазерной закалки стали X12 расфокусированным лучом (а и с) и колеблющимся лучом (b и d): а и b – $P=700$ Вт, $V=7$ мм/с; с и d – $P=1000$ Вт, $V=10$ мм/с

Fig. 1. Microsections of laser hardening areas of X12 steel with a spread-out beam (a and c) and an oscillating beam (b and d): a and b – $P=700$ W, $V=7$ mm/s; c and d – $P=1000$ W, $V=10$ mm/s

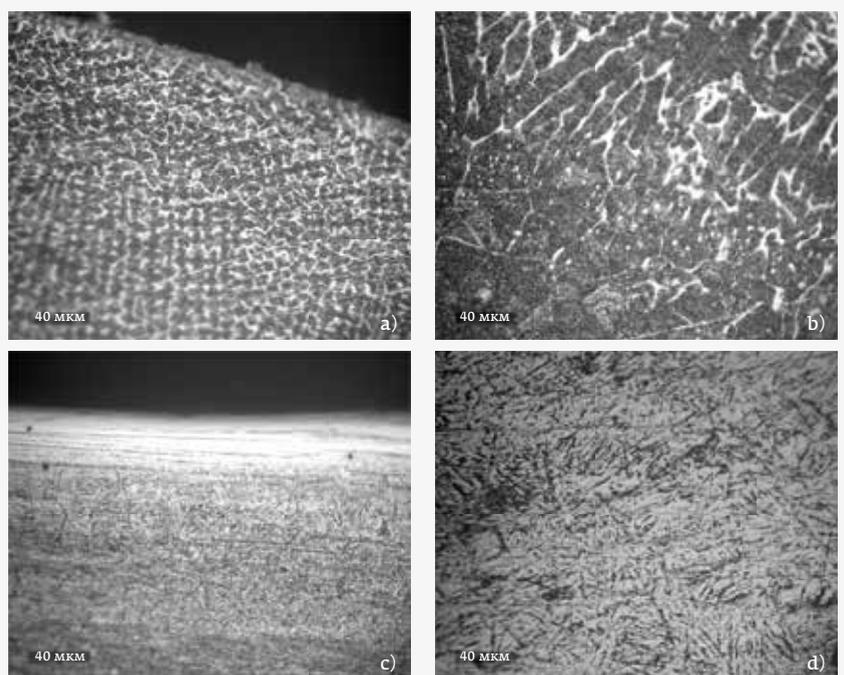


Рис. 2. Микроструктуры зон лазерной закалки стали X12 расфокусированным (а, b) и колеблющимся (с, d) пучком

Fig. 2. Microstructures of laser hardening areas of X12 steel with a spread-out (a, b) and oscillating (c, d) beam

нялась в широкий пределах 6700–11800 МПа. На рис. 3а приведен график изменения микротвердости от глубины слоя после обработки расфокусированным лучом. Зона лазерной закалки имела твердость 8000–8800 МПа, а зона отпуска глубиной более 400 мкм 5000–6000 МПа. Применение поперечных колебаний луча на тех же режимах обработки позволило значительно повысить микротвердость зоны лазерной закалки до значений 9000–12000 МПа и снизить размеры зоны отпуска до 100 мкм при ее минимальной твердости 6000 МПа.

На рис. 4 представлены результаты определения интенсивности изнашивания (J) для образцов инструментальной стали с объемной закалкой и отпуском (1) и с лазерной закалкой (2) 50% поверхности трения. Анализ полученных результатов показал, что лазерная закалка инструментальной стали X12 повысила износостойкость в 1,6 раза по сравнению с объемной закалкой образцов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты показали, что при лазерной закалке инструментальных сталей микротвердость упрочненных слоев значительно возрастает по сравнению с объемной закалкой и отпуском. Предложенная технология лазерного упрочнения с использованием поперечных колебаний луча по отношению к скорости обработки имеет большую производительность, чем при закалке расфокусированным лучом. Процесс упрочнения инструментальных сталей с применением колеблющегося лазерного луча может быть использован при обработке режущих кромок гильотинных ножей, пробивных пуансонов и другим деталям, применяемым для изготовления штампов для повышения надежности и долговечности их работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология лазерной закалки инструментальных сталей с использованием поперечных колебаний лазерного луча, что позволило повысить производительность обработки в 1,4–1,9 раза по сравнению с упрочнением расфокусированным лучом. Повышение плотности энергии при лазерном упрочнении колеблющимся лучом приводило к увеличению геометрических размеров зон лазерной закалки. При оптимальных режимах обработки и упрочнении 50% поверхности трения образцов износостойкость повышалась в 1,6 раза по сравнению с объемной закалкой.

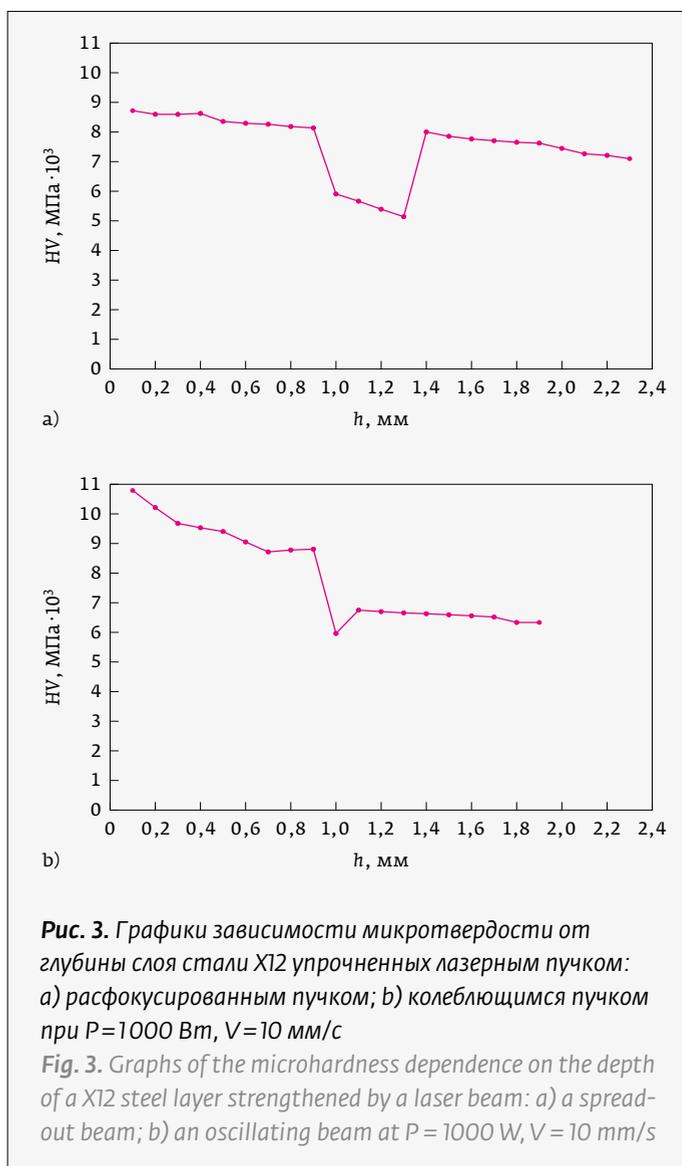


Рис. 3. Графики зависимости микротвердости от глубины слоя стали X12 упрочненных лазерным пучком: а) расфокусированным пучком; б) колеблющимся пучком при $P=1000 \text{ Вт}$, $V=10 \text{ мм/с}$

Fig. 3. Graphs of the microhardness dependence on the depth of a X12 steel layer strengthened by a laser beam: а) a spread-out beam; б) an oscillating beam at $P = 1000 \text{ W}$, $V = 10 \text{ mm/s}$

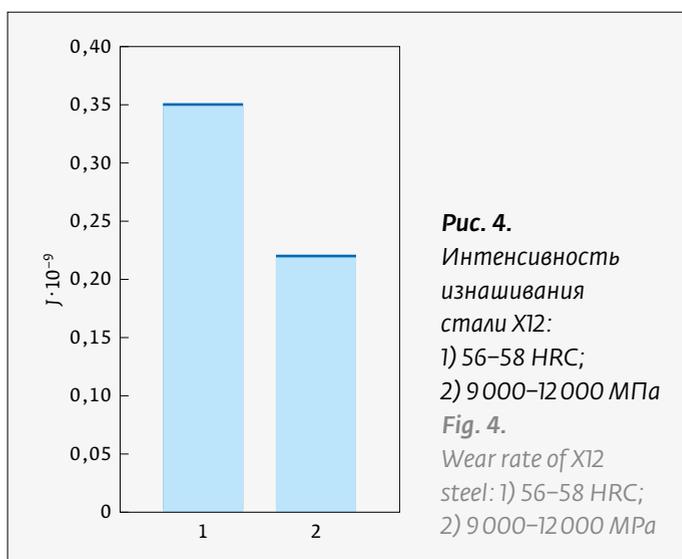


Рис. 4. Интенсивность изнашивания стали X12: 1) 56–58 HRC; 2) 9000–12000 МПа

Fig. 4. Wear rate of X12 steel: 1) 56–58 HRC; 2) 9000–12000 МПа



REFERENCES

1. Cui C., Guo Z., Liu Y., Xie Q., Wang Z., Hu J., Yao Y. Characteristics of cobalt-based alloy coating on tool steel prepared by powder feeding laser cladding. *Optics & Laser Technology*. 2007; 39 (8); 1544–1550. DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.12.005.
2. Krishna B. V., Bandyopadhyay A. Surface modification of AISI 410 stainless steel using laser engineered net shaping (LENSTM). *Materials & Design*. 2009; 30 (5); 1490–1496. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.08.003.
3. Shtarbakov V., Dikova T., Stavrev D. Microstructure of surface layer of T1 and D2 steels after laser melting. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2015; 1 (1–2); 124–129. DOI: 10.1080/2374068X.2015.1116224.
4. Baykara T., Keskin N. Effects of Laser Hardening Treatment on the Wear Properties of the Vanadis 4 Extra and Vanadis 10 Tool Steels. *International Journal of Metallurgy and Metal Physics*. 2019; 4; 029.
5. Kusinski J., Kac S., Kopia A., Radziszewska A., Rozmus-Górnikowska M., Major B., L. Major B., Marczak J., Lisiecki A. Laser modification of the materials surface layer—a review paper. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2012; 4; 711–728. DOI: 10.2478/v10175-012-0083-9.
6. Telasang G., Majumdar J. D., Padmanabham G., Manna I. Wear and corrosion behavior of laser surface engineered AISI H13 hot working tool steel. *Surface & Coatings Technology* (2014) <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.058>.
7. Aqida S. N., Brabazon D., Naher S. Designing Pulse Laser Surface Modification of H13 Steel Using Response Surface Method. *AIP Conf. Proc.* 2012; 1315, 1371–1376. DOI: 10.1063/1.3552376
8. Ameri M. H. Ghaini F. M., Torkamany M. J. Investigation into the efficiency of a fiber laser in surface hardening of ICD-5 tool steel. *Optics & Laser Technology*. 2018; 107; 150–157. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.05.030
9. El-Batahy A. M., Ramadan R. A., Moussa A. R. Laser Surface Hardening of Tool Steels – Experimental and Numerical Analysis. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*. 2013; 3: 146–153. DOI:10.4236/jsemat.2013.32019.
10. Al-Tamimi H. M., Al-Roubaiy A. O., Dawood N. M. Improvement of Microstructure and Wear Resistance of X12 Tool Steel by Using Laser Surface Re-Melting Technique. *Materials Science Forum*. 2021; 1021; 260–269. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1021.260.
11. Yu L., Yuanpeng T., Hui Z., Haijing Z., Yang L. Microstructure and properties of Cr12MoV die steel by laser quenching with different power. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 631; 022032. DOI:10.1088/1757-899X/631/2/022032
12. Šebek M., Falat L., Orecny M., Petryshynets I., Kováč F., Cerník M. Abrasive wear resistance of modified X37CrMoV5-1 hot work tool steel after heat treatment. *International Journal of Materials Research*. 2018; 109(5); 460–467.
13. Amine T., Newkirk J. W. Microstructural and hardness investigation of tool steel D2 processed by laser surface melting and alloying. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014; 73; 1427–1435. DOI: 10.1007/s00170-014-5882-8
14. Lesyk D. A., Martinez S., Mordyuk B. N., Dzhemelinskyi V. V., Lamikiz A., Prokopenko G. I., Milman Yu. V., Grinkevych K. E. Microstructure related enhancement in wear resistance of tool steel AISI D2 by applying laser heat treatment followed by ultrasonic impact treatment. *Surface & Coatings Technology*. 2017; 328; 344–354. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.08.045.
15. Yasavol N., Abdollah-zadeh A., Ganjali M., Alidokht S. A. Microstructure and mechanical behavior of pulsed laser surface melted AISI D2 cold work tool steel. *Applied Surface Science*. 2013; 265; 653–662. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.11.070.
16. Šebek M., Falat L., Kováč F., Petryshynets I., Horňák P., Girman V. The effects of laser surface hardening on microstructural characteristics and wear resistance of AISI H11 hot work tool steel. *Arch. Metall. Mater.* 2017; 62; 1721–1726. DOI: 10.1515/amm-2017-0262.

ОБ АВТОРАХ

Бирюков Владимир Павлович, в. н. с., к. т. н., Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия
ORCID 0000-0001-9278-6925

Горюнов Ярослав Алексеевич, м. н. с., Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия
ORCID 0009-0002-1614-0174

spread-out beam treatment. The laser hardening area had a hardness of 8000–8800 MPa, and the tempering area with a depth of more than 400 microns had a hardness of 5000–6000 MPa. The use of the beam lateral oscillations in the same treatment modes made it possible to significantly increase microhardness of the laser hardening area to the values of 9000–12000 MPa and reduce the tempering area size to 100 microns with its minimum hardness of 6000 MPa.

Figure 4 presents the the wear rate results (J) for the chisel tool samples with through hardening and tempering (1) and with laser hardening (2) of 50% of the friction surface. Analysis of the obtained results showed that the laser hardening of X12 chisel steel increased the wear resistance by 1.6 times compared to the through hardening of samples.

DISCUSSION OF THE RESULTS

The results obtained demonstrated that in the case of laser hardening of chisel steels, microhardness of the hardened layers is increased significantly compared to the through hardening and tempering. The proposed laser hardening technology using the beam lateral oscillations in relation to the treatment speed has greater productivity than in the case of the spread-out beam hardening. The chisel steel hardening process using an oscillating laser beam can be used when treating the cutting edges of guillotine knives, punch pins and other parts used for the production of dies in order to increase the reliability and durability of their work.

CONCLUSION

The laser hardening technology for chisel steels using the lateral oscillations of a laser beam has been developed that has made it possible to increase the treatment productivity by 1.4–1.9 times compared to the spread-out beam hardening. An increase in the energy density during the laser hardening procedure with an oscillating beam has led to the increased geometric dimensions of the laser hardening areas. In the optimal treatment conditions and hardening of 50% of the sample friction surface, wear resistance is increased by 1.6 times compared to the through hardening.

ABOUT AUTHORS

Biryukov Vladimir Pavlovich, leading researcher, Ph.D. in technical sciences, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID 0000-0001-9278-6925

Goryunov Yaroslav Alekseevich, junior researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID 0009-0002-1614-0174

ПРОИЗВОДСТВО ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РЫНКОВ



+375 (740) 740-95-55
sales@sls-prime.com
www.sls-prime.com

SLS
PRIME TECHNOLOGY

ЗАО «СЛС Прайм Технолоджи»

Выставка «Фотоника-2024» привлекла внимание посетителей своим новым участником – компанией ЗАО «СЛС Прайм Технолоджи». Появившись на рынке в конце 2023 года, компания уже успела привлечь специалистов предложением новейшей лазерной техники.

Штаб-квартира компании расположена в Беларуси, в городе Минск. Основной акцент в работе ЗАО «СЛС Прайм Технолоджи» сделан на производство твердотельных импульсных лазеров, способных генерировать лазерное излучение с заданными характеристиками в широком спектральном диапазоне от УФ до ИК.

На выставке «Фотоника» компания представила (анонсировала) обширный ассортимент импульсных наносекундных лазеров. В арсенале ЗАО «СЛС Прайм Технолоджи» – лазеры с уникальным сочетанием энергии и частоты следования импульсов, как с ламповой, так и с диодной накачкой. Яркими представителями этого направления являются модели Graphite 550 и Azurite 160.

Graphite 550 – это твердотельный наносекундный лазер, энергия импульса которого превышает 0,5 Дж. Его особенность - возможность работы не только на частоте в 10 Гц, но и на частотах 20 Гц и 30 Гц, что выгодно выделяет его среди продукции конкурентов.

Azurite 160 – это компактный Nd:YAG лазер с диодной накачкой, способный генерировать импульсы с энергией до 160 мДж и частотами их повторения до 30 Гц. Благодаря воздушному охлаждению и большим межсервисным интервалам, он идеально подходит как для лабораторных, так и для производственных условий.

Все лазеры, производимые «СЛС Прайм Технолоджи» используют критически важные компоненты от российских и белорусских производителей, что гарантирует их надежный и быстрый сервис.

Создание широкого модельного ряда современных лазеров в сжатые сроки – это сложная задача, которую компании удалось решить благодаря слаженной команде профессионалов. Сотрудники ЗАО «СЛС Прайм Технолоджи» обладают научными степенями и богатым производственным опытом работы. Многие из них проходили стажировки в высокотехнологичных компаниях Европы и Японии. Более 3000 лазеров, разработанных и произведенных с участием этой команды, уже работают по всему миру, включая крупнейшие научные центры России.

Благодаря наработанным компетенциям сотрудников и их авторитету в профессиональной среде, уже в первые месяцы, после своего создания, «СЛС Прайм Технолоджи» привлекло несколько крупных контрактов на НИОКР и продолжает активно развиваться.

Благодаря наработанным компетенциям сотрудников и их авторитету в профессиональной среде, уже в первые месяцы своей деятельности, компания «СЛС Прайм Технолоджи» привлекла несколько крупных контрактов на НИОКР и продолжает активно развиваться.

СОЗДАНЫ ПО ПЕРЕДОВЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ИМПУЛЬСНЫЕ Nd:YAG ЛАЗЕРЫ GRAPHITE И CORUNDUM



Импульсные Nd:YAG лазеры серий Graphite и Corundum идеально подходят для решения научно-исследовательских и промышленных задач

- Длины волн 1064, 532, 355 и 266 нм
- Энергия импульса до 1500 мДж
- Частота повторения импульсов до 100 Гц
- Режим пачек импульсов **Burst mode**
- Встроенный измеритель энергии
- Компактный корпус
- Производство Республика Беларусь



Простота эксплуатации · Высокая надёжность

Компания «СЛС Прайм Технолоджи» объединила ведущих специалистов в области разработки и производства лазеров и лазерных систем, с целью обеспечить отечественные рынки необходимым оборудованием, созданным по передовым технологиям.

Лазеры серий Graphite и Corundum это обновлённая версия импульсных Nd:YAG лазеров. Лазеры Graphite и Corundum построены на одной платформе, обладают повышенной надёжностью и предлагают широкий спектр сочетаний энергии импульса (до 1,5 Дж) и их частоты повторения (до 100 Гц).

Новая линейка компактных и надежных лазеров с отличным качеством излучения может использоваться, как для научных исследований, так и в качестве OEM-модулей в промышленном оборудовании.

Более подробную информацию Вы можете получить у наших специалистов по e-mail или телефону:

+375 (740) 740-95-55
sales@sls-prime.com
www.sls-prime.com

SLS
PRIME TECHNOLOGY