



# ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ КРУГЛЫМ, ПРОФИЛИРОВАННЫМ И КОЛЕБЛЮЩИМСЯ ЛУЧОМ НА ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В.П.Бирюков, к.т.н., *laser-52@yandex.ru*,  
А.А.Фишков, ФГБУН Институт машиноведения  
им. А.А.Благонравова РАН;  
Д.Ю.Татаркин, Е.В.Хриптович,  
ООО НТО-ИРЭ-Полюс, г. Фрязино, Моск.обл.

Разработана технология лазерного упрочнения металлических деталей. Ширина зоны упрочнения 15–50 мм за один проход позволяет обрабатывать посадочные места шеек валов различных механизмов и машин под подшипники качения и скольжения. Кроме того, эта технология может быть использована для упрочнения гибочных и других штампов при глубине упрочненного слоя 2,5 мм.

**В** промышленном производстве используются различные типы лазеров: твердотельные, газовые, волоконные, диодные, дисковые и другие. В большинстве лазерных установок на выходе из резонатора формируется пятно круглого сечения [1]. При обработке поверхности детали таким пятном взаимодействие излучения с материалом в центре локализации пятна задается временем воздействия. В центре пятна это время определяется отношением диаметра луча к скорости его перемещения, при этом вводят допущение, что по краям пятна оно стремится к нулю. Для устранения этого недостатка лазерному пятну на поверхности обрабатываемой детали стремятся придать прямоугольную или близкую к ней форму. Для этого вводят колебания луча вокруг нормали к направлению вектора скорости перемещения детали (или луча) [2]. Используют высокочастотное сканирование луча с частотами

## INFLUENCE OF LASER HARDENING BY ROUND, PROFILED AND OSCILLATING BEAM ON THE INCREASE OF SERVICE LIFE OF MACHINE PARTS

V.P.Biriukov, Doctor of Engineering,  
*laser52@yandex.ru*:  
A.A.Fishkov, A.A.Blagonravov Federal State  
Budgetary Institute of Science of RAS;  
D.Yu.Tatarkin, E.V.Hriptovich,  
LLC "NTO-IRE-Polyus", Fryazino, Moscow Region

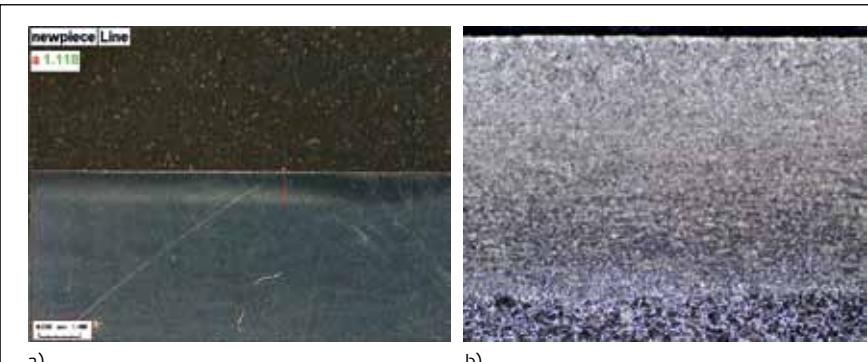
The developed technology of broadband laser hardening with a fibre laser beam using IPG 2D scanners will allow expanding the range of parts. The width of the hardening zone of 15–50 mm in one pass allows processing the seats of the centre shafts of various mechanisms and machines for rolling and sliding bearings. In addition, this technology can be used to strengthen bending and other dies with a depth of the hardened layer of 2.5 mm.

In industrial production, various types of lasers are currently used: solid-state, gas, fibre, diode, disk, etc. For most laser installations, a circular cross-section spot is formed at the exit of the resonator [1]. When the part surface is exposed by such spot, the exposure time in its centre is determined by the ratio of the beam diameter to its travel speed, and at the edges it tends to zero. To eliminate this drawback, they tend to give a laser spot on the surface of the work-piece a rectangular or similar shape by means of beam oscillations along the normal to the direction of the travel speed vector of the part (beam) [2]. High-frequency beam scanning with frequencies of 150–1200 Hz or Galvano scanners are used with a beam travel speed of up to 10 m/s, the frequency of the beam oscillations of 3–100 Hz, depending on the amplitude. At 100% hardening of the part surfaces with overlapping of paths, the tempering zones are formed in the places of their overlapping that are 0.5–3.0 mm width-wise on the hardened surface near the path with a defocused beam and 0.1–0.2 mm when hardened with oscillating high-

150–1200 Гц или применяют гальваносканеры, обеспечивающие перемещения луча со скоростью до 10 м/с и частотой колебаний луча 3–100 Гц в зависимости от амплитуды. При 100%-ной закалке поверхностей металлических деталей с наложением дорожек в местах их перекрытия образуются зоны отпуска. Их ширина на упрочняемой поверхности рядом с дорожкой составляет 0,5–3,0 мм, если пользоваться расфокусированным лучом. Если при закалке использовать колеблющийся с высокой частотой луч, то ширина составит 0,1–0,2 мм. Выбор определяется заданным режимом обработки. Уменьшение размера и количества зон отпуска или их исключение способствуют повышению износостойкости и задиростойкости закаленных сканирующим лазерным лучом поверхностей трения деталей машин, работающих в условиях смазывания жидким или пластичным смазочным материалом. При отсутствии смазки в парах трения отклонение твердости поверхностных слоев не должно превышать 6–8 HRC.

Лазерное упрочнение стали AISI 4140 с варьированием размеров перекрытия дорожек закалки от 3 до 6 мм проводили с помощью твердотельного лазера. Были выбраны следующие параметры: размер пятна 12×8 мм, мощность излучения 800–1200 Вт, скорость перемещения 0,3–2 мм/с, размеры экспериментальных образцов 76,2×50,8×25,4 мм [3]. В результате экспериментов определены оптимальные параметры: мощность излучения 850 Вт, перекрытие дорожек 5 мм. При этом получено: глубина закаленного слоя 1,9–2 мм без плавления поверхности, максимальная твердость зон закалки 668–700 HV (58 HRC); твердость на участках перекрытия лазерных дорожек колебалась от 480 HV (48 HRC) до 669 HV (58 HRC); разница глубины двух соседних закаленных дорожек составила 0,2 мм.

Обработку сталей AISI 1018, AISI 4140 и серого чугуна проводили на диодном лазере с постоянной мощностью 4 кВт. Луч имел прямоугольный профиль размером 13×4 мм [4]. Скорость сканирования варьировалась от 1000 до 2000 мм/мин. Испытания на изнашивание проводили по схеме диск – плоскость по стан-



**Рис.1.** Лазерное упрочнение стали 40XH2MA: а ) общий вид поперечного шлифа; б) микроструктура, увеличение ×50

**Fig. 1.** Laser hardening of 40XH2MA steel: a) the cross-section general view; b) microstructure×50

frequency beam, depending on the processing modes. Reducing the size and number of tempering zones or their exclusion contributes to an increase in wear resistance and scoring resistance of scanning laser beam hardened friction surfaces of machine parts operating under lubrication conditions with a liquid or plastic lubricant. In the absence of grease in friction couple, the deviation of the hardness of the surface layers should not exceed 6–8 HRC.

Laser hardening of AISI 4140 steel with different overlapping of the hardening paths from 3 to 6 mm was carried out on a solid-state laser with a spot size of 12×8 mm with a radiation power of 800 to 1200 W at a velocity of 0.3–2 mm/s on the samples with dimensions of 76, 2×50.8×25.4 mm [3]. With an optimum output power of 850 W with paths overlapping of 5 mm, a hardened layer depth of 1.9–2 mm was obtained without surface fusion. The maximum hardness of the hardening zones was 668–700 HV (58 HRC). The hardness at the overlapping zones of the laser paths ranged from 480 HV (48 HRC) to 669 HV (58 HRC). The difference in depth between two adjacent hardened paths was 0.2 mm.

The processing of AISI 1018, AISI 4140 steels and gray cast iron was carried out on a diode laser at a constant power of 4 kW. The beam had a rectangular profile measuring 13×4 mm [4]. The scanning speed varied from 1000 to 2000 mm/min. Wear tests were carried out according to the disk-plane scheme according to the US ASTM G-99-95A standard at a load of 100 N without lubricant. The samples of steels and gray cast iron had a cross-section of 15×10 mm (friction surface), with a thickness of 3.5 mm. The disk was made of



дарту США ASTM G-99-95A при нагрузке 100 Н без смазочного материала. Образцы из сталей и серого чугуна имели поперечное сечение  $15 \times 10$  мм (поверхность трения), при толщине 3,5 мм. Диск был изготовлен из подшипниковой стали SAE52100 и упрочнен до твердости 60–62 HRC. Параметры испытаний: путь трения 5000 м, скорость скольжения 5 м/с. Анализ металлографических исследований показал, что с увеличением скорости перемещения луча микротвердость образцов возрастает. Обнаружено, что для сталей AISI 1018 микротвердость возрастает с 287 до 349 HV, для сталей AISI 4140 – с 559 до 638 HV; для серого чугуна – с 654 до 830 HV. Глубина зон упрочнения для образцов из сталей составила 150–200 мкм, для чугуна 350–400 мкм. При испытании на изнашивание образцов стали AISI 1018 установлено, что наибольшая износостойкость получена при упрочнении лазерным лучом, перемещающимся с минимальной скоростью 1000 мм/мин, и проявляла твердость 287 HV. Это связано с образованием на поверхности окисных пленок, препятствующих износу образца. Износостойкость образцов стали AISI 4140 повысилась в 2,5; 5 и 10 раз пропорционально увеличению скорости 1000, 1500 и 2000 мм/мин перемещения лазерного луча и микротвердости упрочненных зон. Наибольшая износостойкость образцов из серого чугуна продемонстрировала превышение в 10 раз и была получена при средней скорости обработки 1500 мм/мин и микротвердости 739 HV. Важно, что при более высокой твердости упрочненного слоя серого чугуна происходит хрупкое разрушение поверхности образца с отделением крупных частиц износа.

Следующий эксперимент [5] был связан с исследованием действия лазерной обработки с помощью непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера при мощности излучения 2,2–2,7 кВт. Для поперечных колебаний луча использовали сканатор с частотой колебаний зеркала 140–250 Гц и амплитудой до 20 мм. Диаметр лазерного луча варьировали в пределах 2,8–16,2 мм. Упрочнению подвергали образцы из нормализованной стали 40Х с размером  $15 \times 30 \times 450$  мм и чугуна СЧ20 размером  $50 \times 120 \times 1800$  мм. Для увеличения поглощения излучения поверхность образцов обрабатывали специальным покрытием SG504. Получены следующие результаты при воздействии на образцы стали марки 40Х лучом с диаметрами 6 и 8 мм. В результате размеры зон упрочнения составили: макси-

SAE52100 bearing steel and hardened to a hardness of 60–62 HRC. The friction path during the test was 5000 m at a sliding velocity of 5 m/s. With metallographic studies, it has been established that as the beam travel speed increases, the microhardness for AISI 1018 steels increases from 287 to 349 HV, AISI 4140 – from 559 to 638 HV, for gray iron – 654–830 HV. The depth of the hardening zones for steel samples was 150–200 μm, for cast iron – 350–400 μm. In the AISI 1018 steel wear test, it was found that the highest wear resistance was obtained by hardening with a laser beam at a minimum speed of 1000 mm/min and a hardness of 287 HV. This is due to the formation of oxide films that prevent the wear of the sample. Wear resistance of AISI 4140 steel samples increased by 2.5; 5 and 10 times in proportion to the increase in the travel speed of 1000, 1500 and 2000 mm/min of the movement of the laser beam and the microhardness of the hardened zones. The highest wear resistance of samples from gray cast iron was 10 times obtained at an average processing speed of 1500 mm/min and a microhardness of 739 HV. With a higher hardness of the hardened layer of gray cast iron, brittle fracture of the sample surface occurs with the separation of large wear particles.

The laser processing was carried out with a continuous CO<sub>2</sub> laser at a radiation power of 2.2–2.7 kW [5]. For transverse beam oscillations, a scanner with a mirror oscillation frequency of 140 ± 250 Hz and amplitude of up to 20 mm was used. The diameter of the laser beam was varied from 2.8 to 16.2 mm. Hardening was carried out on samples of normalized steel 40X with a size of  $15 \times 30 \times 450$  mm and cast iron SCH20 with a size of  $50 \times 120 \times 1800$  mm. To increase the absorption of radiation, the surface of the samples was coated with SG504 coating. The sizes of the hardening zones of 40X steel with beam diameter of 6 and 8 mm yielded the maximum depth of the hardened layer of 1.2 mm and a width of 14–15 mm with a beam speed of 0.2 m/min. The amplitude of the beam oscillations was 18 ± 19 mm. With a power density of  $0.23 \times 10^{-4}$  W/cm<sup>2</sup>, there is no surface fusion. With laser hardening of SCH20 cast iron, the maximum depth of the hardened layer was 1.2 mm with a beam diameter of 16.2 mm without surface fusion. The power density was  $(0.094–0.13) \times 10^{-4}$  W/cm<sup>2</sup>. The wear resistance tests for rolling friction of 40X steel samples showed a significant increase in wear resistance compared to the samples after furnace quenching and tempering. Studies of the



мальная глубина закаленного слоя 1,2 мм, ширина 14–15 мм. Условия эксперимента: скорость перемещения луча 0,2 м/мин, амплитуда колебаний луча 18–19 мм, плотность мощности  $0,23 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>, оплавление поверхности отсутствует. При лазерной закалке чугуна СЧ20 максимальная глубина упрочненного слоя составила 1,2 мм при диаметре луча 16,2 мм без оплавления поверхности, плотность мощности лазерного излучения –  $(0,094-0,13) \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>. Испытания на износостойкость при трении качения образцов стали 40Х показали значительное увеличение износостойкости по сравнению с образцами, для которых в качестве технологии упрочнения были использованы печная закалка и отпуск. Исследования структуры чугуна после испытания показали, что в приповерхностном слое формируется сетка трещин, и эта технология не рекомендуется для использования в узлах трения качения.

Целями работы являются: увеличение ширины зоны лазерной закалки за один проход, уменьшение или исключение зон отпуска при лазерном упрочнении для повышения ресурса работы деталей машин.

cast iron structure after the test showed that in the near-surface layer a grid of cracks is formed, and this technology is not recommended for use in rolling friction units.

The objectives of the work are as follows: increasing the width of the laser hardening zone in one pass, reducing or eliminating the tempering zones for laser hardening to increase the service life of machine parts.

### RESEARCH METHODS

For the experiments, we used versatile equipment of LLC "NTO "IRE-Polyus" containing laser units LS-6, LS-4 and LS-1, KUKA robot, IPG 2D scanner, technological table. Laser hardening was performed on the 40X and 40XH2MA steel samples, with dimensions of 12×16×70 and 10×60×180 mm. Variable parameters were the distance from the focal plane in the range of 25–200 mm, the radiation power of 1000–2000 W, the beam travel speed of 10–20 mm/s on LS-6 laser. The processing of 40XH2MA steel was carried out using scanning devices: the distance from the focal plane was 50–200 mm, the scanning step was 50–1,500 μm, the width of the processing

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для экспериментов использовали универсальное оборудование ООО НТО "ИРЭ-Полюс" в составе лазерных установок ЛС-6, ЛС-4 и ЛС-1, робота KUKA, сканера IPG 2D и технологического стола. Лазерное упрочнение производилось на образцах из стали 40Х, 40ХН2МА с размерами  $12 \times 16 \times 70$ ,  $10 \times 60 \times 180$  мм. В качестве варьируемых параметров при эксперименте на лазере ЛС-6 были избраны: расстояние от фокальной плоскости до рабочей зоны (в пределах 25–200 мм), мощность излучения (1000–2000 Вт), скорость перемещения луча (10–20 мм/с). В эксперименте на волоконных лазерах ЛС-1, ЛС-4 при обработке стали 40ХН2МА с использованием сканирующих устройств были выбраны следующие условия: расстояние от фокальной плоскости 50–200 мм, шаг сканирования 50–1500 мкм, ширина зон обработки 15–25 и 50 мм, мощность излучения 1000 и 2000–4000 Вт. Металлографические исследования выполняли на микротвердомере DURASCAN-70 при нагрузке 0,98 Н, микроскопе Olympus GX-51.

Для определения задиростойкости упрочненных образцов была применена универсальная машина трения МТУ-01. Испытания проводили по схеме плоскость (образец с лазерной закалкой или образец азотированной стали 40Х) – кольцо (контробразец сталь 40Х с объемной закалкой 52–54HRC). В качестве смазочного материала использовалось масло индустриальное И-20. Удельное давление изменяли в пределах 1–4 МПа, скорость скольжения 0,5–4 м/с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При упрочнении стали 40Х на лазере ЛС-6 круглым пятном получены дорожки закалки глубиной 0,6–1,2 мм шириной 3,5–5,5 мм в зависимости от расстояния от фокальной плоскости. Лазерная закалка при расстоянии от фокальной

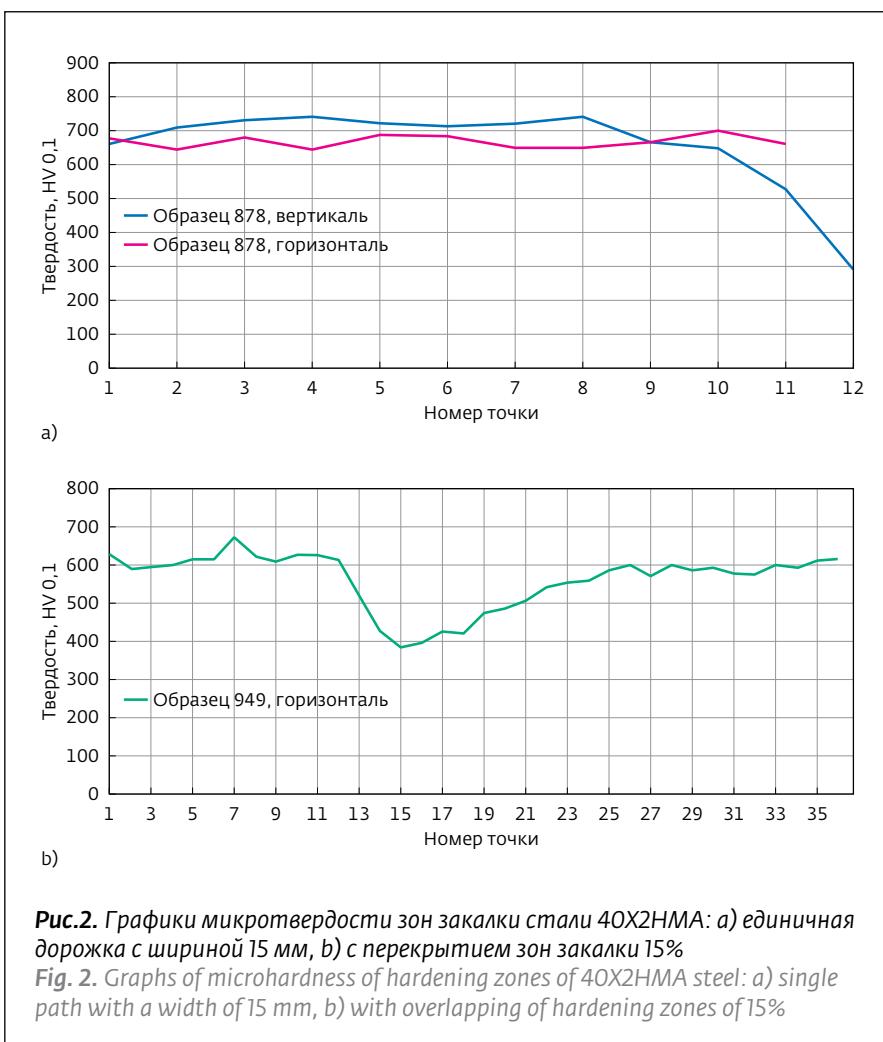


Рис.2. Графики микротвердости зон закалки стали 40Х2НМА: а) единичная дорожка с шириной 15 мм, б) с перекрытием зон закалки 15%

Fig. 2. Graphs of microhardness of hardening zones of 40XH2MA steel: a) single path with a width of 15 mm, b) with overlapping of hardening zones of 15%

zones was 15–25 and 50 mm, the radiation power was 1000 and 2000–4000 W on LS-1, LS-4 fibre lasers. Metallographic studies were performed on DURASCAN-70 microhardnesser at a load of 0.98 N, Olympus GX-51 microscope.

To determine the scoring resistance of hardened specimens, versatile friction machine MTU-01 was used. The tests were carried out according to the scheme of plane (a sample with laser quenching or nitrided 40X steel) – ring (counter sample of 40X steel with volume hardening of 52–54HRC). The lubricant used was industrial oil I-20. The specific pressure was varied from 1 to 4 MPa, the sliding velocity was 0.5 to 4 m/s.

## RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

When hardening 40X steel on LS-6 laser, a round spot was used to produce hardening paths with a depth of 0.6–1.2 mm and a width of 3.5–5.5 mm, depending on the distance from the focal plane. Laser hardening at a distance from the focal plane

плоскости менее 40 мм приводит к кинжалльному проплавлению материала основы на глубину 2–4 мм. Микротвердость зон закалки изменилась в пределах 6240–7280 МПа. Для мощности излучения 1000 и 2000 Вт найдены режимы закалки без оплавления поверхности образцов при дефокусировке на 75 и 100 мм и скорости перемещения луча 10 и 20 мм/с соответственно.

При лазерной закалке образцов стали 40ХН2МА в импульсном режиме при мощности излучения 1000 Вт и ширине зоны закалки 15–25 мм получены зоны упрочнения с глубиной слоя 0,2–2000 мкм. Микротвердость измеряли по ширине и глубине закаленного слоя с шагом 100 и 200 мкм. На рис.1а,б представлены микроскопии зон закалки стали 40ХН2МА с глубиной закаленного слоя 1,118 мм при ширине зоны 15 мм. Микротвердость упрочненных зон составила 6410–7340 МПа или 56–60 HRC. Графики измерения микротвердости единичной дорожки закалки и с наложением дорожек представлены на рис.2 а,б.

Лазерное упрочнение образцов стали 40ХН2МА на установке ЛС-4 проводилось с целью



**Рис.3. Микрошлиф зоны закалки стали 40ХН2МА при мощности излучения 4000 Вт**  
**Fig. 3. Microsection of the hardening zone of 40XH2MA steel at a radiation power of 4000 W**

of less than 40 mm results in the concentrated penetration of the base material to a depth of 2–4 mm. The microhardness of the hardening zones varied within the range of 6240–7280 MPa. For



дальнейшего увеличения ширины и глубины зоны закалки. При мощности излучения 2000 Вт получены дорожки закалки с шириной 50 и глубиной 0,2–2,0 мм. Увеличение мощности до 4000 Вт позволило получить слои с глубиной закалки до 2,5 мм при той же ширине обработанной зоны. На рис.3 представлен микрошлиф дорожки закалки стали 40ХН2МА.

Проведенные испытания образцов показали повышение износостойкости и задиростойкости в 1,5–2 раза по сравнению с азотированными образцами стали 40Х2НМА.

Разработанная технология широкополосной лазерной закалки лучом волоконного лазера при использовании сканеров IPG 2D позволит расширить номенклатуру деталей. Ширина зоны упрочнения 15–50 мм за один проход позволяет обрабатывать посадочные места шеек валов различных механизмов и машин под подшипники качения и скольжения. Кроме того, эта технология может быть использована для упрочнения гибочных и других штампов при глубине упрочненного слоя 2,5 мм.

## ВЫВОДЫ

Для деталей, работающих в условиях ограниченной смазки или без использования смазочного материала, разработана технология лазерного упрочнения на основе использования волоконных лазеров и 2D-сканеров с шириной закаленных слоев 15–50 мм при глубине зоны 0,2–2,5 мм.

Для образцов стали 40Х2НМА износостойкость и задиростойкость зон, упрочненных волоконным лазером, оказалась в 1,5–2,0 раза выше, чем для образцов, прошедших азотирование.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по лазерной сварке / Под ред. С. Катояма. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015.
2. Бирюков В.П. Расчетно-экспериментальное определение параметров упрочненных зон при лазерной закалке чугунов и сталей. – ФОТОНИКА, 2017, № 2.
3. Lakhkar R.S., Shin Y.C., Krane J.M. Predictive modeling of multi-track laser hardening of AISI 4140 steel. – Materials Science and Engineering, 2008, A 480, p.209–217.
4. Sridhar K., Katkar V.A., Singh P. K., Haake J.M. Dry sliding friction wear behaviour of high power diode laser hardened steels and cast iron. – J. Surface Engineering, 2007, v. 23, № 2, p.129–141.
5. Иванов Ю.А., Ивашов Г.П., Пикунов А.С., Сафонов А.Н. Особенности лазерной закалки стальных и чугунных изделий в условиях сканирования. – Физика и химия обработки материалов, 1987, № 4, с. 50–54.

the radiation power of 1000 and 2000 W, the hardening modes were found without fusing the surface of the samples with a defocusing of 75 and 100 mm and beam travel speed of 10 and 20 mm/s, respectively.

Laser hardening of 40XH2MA steel samples in pulsed mode at a radiation power of 1000 W with the width of the hardening zone of 15–25 mm produced hardening zones with a layer depth of 0.2–2000  $\mu\text{m}$ . The microhardness was measured from the width and depth of the hardened layer in steps of 100 and 200  $\mu\text{m}$ . Fig. 1 (a and b) shows the microsections of the hardening zones of 40XH2MA steel with a hardened layer depth of 1.118 mm and an zone width of 15 mm. The microhardness of the hardened zones was 6 410–7 340 MPa or 56–60 HRC. The microhardness measurements of the single hardening path and the overlay of the paths are shown in Fig. 2 (a and b).

Laser hardening of 40XH2MA steel samples on LS-4 installation was carried out to further increase the width and depth of the hardening zone. At a radiation power of 2000 W, the hardening paths with a width of 50 and a depth of 0.2–2.0 mm were obtained. The increase in power to 4000 W made it possible to obtain layers with a hardening depth of up to 2.5 mm with the same width of the processed zone. Fig. 3 shows the microsection of the hardening path of steel 40XH2MA.

The performed tests of the samples showed an increase in wear resistance and scoring resistance by 1.5 to 2 times compared to nitrided 40X2NMA steel samples.

The developed technology of broadband laser hardening with a fibre laser beam using IPG 2D scanners will allow expanding the range of parts. The width of the hardening zone of 15–50 mm in one pass allows processing the seats of the centre shafts of various mechanisms and machines for rolling and sliding bearings. In addition, this technology can be used to strengthen bending and other dies with a depth of the hardened layer of 2.5 mm.

## CONCLUSIONS

For parts operating under conditions of limited lubrication or without a lubricant, a hardening technology using fibre lasers and 2D scanners with a width of hardened layers of 15–50 mm at a depth of 0.2 to 2.5 mm is developed.

The wear resistance and scoring resistance of fibre-reinforced zones is 1.5 to 2.0 times higher than that of nitrided 40X2NMA steel samples.