



РАСЧЕТНО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕННЫХ ЗОН ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ ЧУГУНОВ И СТАЛЕЙ

В.П.Бирюков, к. т. н.,
Институт машиноведения
им. А.А. Благоврава РАН,
laser-52@yandex.ru

Технология лазерного термоупрочнения чугунов и сталей повышает твердость, износостойкость и задиростойкость рабочих поверхностей трения. Представлены результаты испытаний и эксплуатации пары трения, прошедшей лазерное термоупрочнение, в сравнении с традиционными технологиями упрочнения. Выявлены условия и режимы лазерной обработки, снижающие негативное влияние зон отпуска и повышающие производительность лазерной закалки в 1,6–2,5 раза.

При назначении режимов лазерного термического упрочнения (ЛТУ) поверхностей трения деталей машин необходимо учитывать условия их эксплуатации, механические и теплофизические свойства исходных материалов. Производительность лазерной обработки определяется глубиной и площадью упрочненной поверхности. Для повышения износостойкости втулки дизеля в два раза достаточно упрочнить 25% площади рабочей поверхности зеркала цилиндра. Задиростойкость цилиндропоршневой группы при этом повышается в 1,8 раза [1]. Экспериментально было установлено, что при упрочнении 50% поверхности трения образцов стали 45, 40X при испытании на машине трения возвратно-поступательного движения МТВ-1 в паре с контрообразцом из чугуна СЧ20 износостойкость повышается в 3 раза, а при 100%-ном упрочнении – в 3,3 раза по сравнению с неупрочненными образцами [2]. По задиростойкости закаленные лазером образцы не уступают азотированным сталям 40X и 12ХН3А и значительно – в 1,7 раза – превосходят цементованную сталь

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PARAMETERS OF HARDENED AREAS FOR LASER HARDENING OF CAST IRON AND STEEL

V.P.Birukov, Candidate of Technical Sciences,
A.A.Blagonravov Institute of Engineering Science of the
Russian Academy of Sciences,
laser-52@yandex.ru

The technology of laser thermal hardening of cast iron and steel increases the hardness, wear resistance and scoring resistance of functional surfaces of friction. The results of tests and operation of friction couple which has passed laser thermal hardening are given in comparison with traditional technologies of hardening. The conditions and the modes of laser processing reducing negative impact of drawing-back areas and increasing the effectiveness of laser hardening by 1.6–2.5 times are revealed.

When assigning the modes of laser thermal hardening (LTH) of friction surfaces of machine parts, it is necessary to consider the conditions of their operation, mechanical and thermo-physical properties of initial materials. The effectiveness of laser processing is defined by depth and the area of the hardened surface. In order to increase wear resistance of the diesel liner by two times, it is enough to harden 25% of the effective area of cylinder bearing surface. The scoring resistance of cylinder-piston group thus increases by 1.8 times [1]. It has been established experimentally that when hardening 50% of friction surface of the samples made of steel 45, 40H when testing on friction machine of reciprocating motion MTV-1 together with counter sample made of cast iron SC20, wear resistance increases by 3 times, and when hardening is 100% – by 3.3 times in comparison with not hardened samples [2]. According to scoring resistance, laser-hardened samples do not concede to nitrated steel 40X and 12HN3A and considerably exceed cemented steel 18HGT by 1.7 times. For laser hardening of steels 45 and 40H with diameter of laser spot of 2–4 mm, linear increase of depth

18ХГТ. Для лазерного упрочнения сталей 45 и 40Х пучком с диаметром сечения 2–4 мм экспериментально обнаружена линейная зависимость возрастания глубины зоны закалки с увеличением диаметра лазерного пучка. Для маложестких и длинномерных деталей дополнительным критерием оптимизации режимов лазерного упрочнения являются минимальные остаточные деформации [3]. Как показал наш опыт внедрения технологии лазерной закалки на ОАО "Красный пролетарий", при лазерном упрочнении накладных направляющих специальных станков для уменьшения деформаций необходимо закалить 20–25% технологической поверхности и 60% рабочей поверхности. При этом остаточные деформации составляют 0,05–0,1 мм на 1 метр длины. Для сравнения при закалке токами высокой частоты (ТВЧ) остаточные деформации составляют 1,5–2,0 мм на 1 метр длины. Эти же обе технологии были использованы для закалки деталей суппортной группы специальных станков. При лазерной закалке станины специального станка длиной 2 метра из чугуна СЧ20 остаточные деформации не превысили 0,1 мм. Деформации станин, закаленных с помощью ТВЧ при серийном производстве станков, составляют 1–1,5 мм, и для обеспечения точности станка требуется длительная обработка шлифованием.

Для реализации экспериментов по лазерному упрочнению чугунных пресс-форм был использован многоканальный CO₂-лазер МТЛ-2М мощностью 2 кВт с длиннофокусной системой транспортировки и фокусировки излучения [4]. Фокусное расстояние линзы 1240 мм. При выполнении экспериментов были выбраны следующие параметры: скоростные режимы термоупрочнения в диапазоне 3–9 мм/с, смещение лазерного луча относительно кромки 2 мм, диаметр пятна излучения 13 мм, эффективный диаметр пятна 6,8 мм [5]. Это означает, что более 50% энергии лазерного луча тратится на бесполезный нагрев детали до температуры ниже фазового перехода. Эта технология находит практическое применение при работе расфокусированным лучом, как правило, без оплавления поверхности детали, однако при лазерной закалке с перекрытием дорожек образуются зоны отпуска, ширина которых зависит от режимов обработки. При скорости движения лазерного луча 3 мм/с и мощности излучения лазера 880 Вт глубина зоны упрочнения составила 0,82 мм при средней твердости 464 HV. При увеличении скорости обработки

of hardening area is observed for increase of laser beam diameter. For low-rigid and lengthy parts, the additional criterion of optimization of modes of laser hardening is the minimum permanent deformation [3]. As our experience of implementation of technology of laser hardening at JSC "Krasny Proletary" has shown, laser hardening of attachable guides of special machines for deformation reduction requires hardening of 20–25% of technology surface and 60% of working area. Thus, permanent deformation comprises 0.05–0.1 mm per 1 meter of length. For comparison, when hardening by high-frequency currents (HFC), the permanent deformation comprises 1.5–2.0 mm by 1 meter of length. The same technology has been used for laser hardening of support group parts of special machines. For laser hardening of bed of special machines 2 meters long made of cast iron SCh20, permanent deformation has not exceeded 0,1 mm. Deformation of beds of the machines hardened by HFC during mass production makes 1–1.5 mm, and long-continued processing by grinding is required to ensure the machine accuracy.

For implementation of experiments of laser hardening of cast iron molds, multichannel CO₂ laser MTL-2M with a power of 2 kW with long-focus system of transportation and focusing of radiation has been used [4]. Focal distance of lens is 1240 mm. When performing experiments, the high-speed modes of thermal hardening have been chosen in the range of 3–9 mm/s, shift of laser beam in relation to edge was 2 mm, diameter of radiation spot was 13 mm, and effective diameter of spot was 6.8 mm [5]. It means that over 50% of energy of laser beam is spent for useless heating of part up to the temperature not exceeding phase transition. This technology has been practically applied for defocused beam processing, usually, without part surface melting, however drawing-back areas which width depends on the processing modes are formed during laser hardening with overlapping of paths. With laser beam speed of 3 mm/s and laser radiant powers of 880 W, depth of hardening area has made 0.82 mm for average hardness of 464 HV. When processing speed increases to 9 mm/s and laser power increases to 1130 W, the hardening area with depth of 0.68 mm and with hardness of 515 HV is received. However, the crack in the hardened layer has been revealed for this mode. Therefore, laser thermal hardening with beam traverse speed of 5–7 mm/s is adopted as optimum. Production tests of cast iron parts of shaped sets for glassware molding have subsequently shown the increase in their wear resistance by 1.5–2 times.



до 9 мм/с и мощности лазера до 1130 Вт получена зона упрочнения с глубиной 0,68 мм, и твердостью 515 HV. Однако на этом режиме обнаружена трещина в закаленном слое. Поэтому оптимальными приняты режимы лазерного термоупрочнения со скоростью перемещения луча 5-7 мм/с. Производственные испытания чугуновых деталей формовых комплектов для литья стеклотары показали увеличение их износостойкости в 1,5-2 раза.

Лазерное упрочнение сталей 20, 45, 40Х, ШХ15 проводилось при мощности излучения CO₂-лазера 650-800 Вт диаметром пятна 1,9-2,3 мм при скорости перемещения 38-44 мм/с на образцах с размерами 20×80×5 мм [6]. Площадь упрочненных зон составляла 20, 40, 60, 80, 100% от номинальной площади. Глубина зон упрочнения не превышала 300 мкм. Твердость нормализованной (20 HRC) и улучшенной (27-30 HRC) стали 45 после ЛТУ находилась в пределах 45-50 HRC и 58-59 HRC соответственно. Твердость закаленной стали ШХ15 сохранилась на уровне 60 HRC. Твердость цементованного слоя стали 20 повысилась на 3 единицы и составила 60 HRC. Триботехнические испытания исследуемых образцов проводили на восьмипозиционной машине трения с возвратно-поступательным движением сопряженных образцов при ступенчатом повышении давления от 0,2 до 40 МПа [7]. Время испытаний на каждой ступени составляло 3,5 часа. В качестве контробразцов использовали образцы с меньшей поверхностью (4×25 мм), выполненные из стали ШХ15 с твердостью 58-60 HRC. Наибольшую износостойкость показали образцы стали 40Х. Причем значительное увеличение износостойкости образцов показали образцы, у которых закаленная лазером зона составляла более 60%.

Дискретную лазерную обработку сталей 20Х13, 40Х и 95Х18 выполняли с помощью волоконного лазера YLR-150 и импульсной лазерной установки "Квант-16" [8]. Исследовалась износостойкость стали 95Х18 после обработки лазером YLR-150 при следующих режимах обработки: E = 2,25 Дж, частота следования импульсов 10 Гц, диаметр пятна 0,4 мм, скорость перемещения 5 мм/с. При этом коэффициент заполнения поверхности упрочненными зонами составлял 0,6, 0,9 и 1,0. Эксперименты выполнялись на машине трения Nanovea по схеме "шарик-поверхность". В качестве контртела использовали шарик из ШХ15 диаметром 3 мм. Испытания стали 20Х13 на износостойкость про-

Лазерное упрочнение сталей 20, 45, 40H, ShH15 was carried out with radiant power of CO₂ laser of 650-800 W with a diameter of spot of 1.9-2.3 mm with traverse speed of 38-44 mm/s on samples with sizes of 20 × 80 × 5 mm [6]. The area of the hardened areas was 20, 40, 60, 80, 100% of their nominal area. Depth of hardening area has not exceeded 300 μm. The hardness of normalized (20 HRC) and improved (27-30 HRC) steel 45 after LTH was within 45-50 HRC and 58-59 HRC, respectively. The hardness of hardened steel ShH15 has remained at the level of 60 HRC. Hardness of the cemented steel layer 20 has increased by 3 units and has made 60 HRC. Tribotechnical tests of the studied samples have been carried out on the eight-position friction machine with reciprocating motion of the interfaced samples with pressure step-up from 0.2 to 40 MPa [7]. Testing time at each step has made 3.5 hours. Counter samples with smaller surface (4 × 25 mm) made of steel ShH15 had hardness of 58-60 HRC. The greatest wear resistance has been shown by the samples made of steel 40H, while the significant increase in wear resistance has been observed at the laser-hardened area of over 60%.

Discrete laser processing of steels 20H13, 40H and 95H18 was carried out using fiber laser YLR-150 and pulse laser assembly Quantum-16 [8]. The study of wear resistance of steel 95H18 after processing on YLR-150 laser assembly in the processing modes: E = 2.25 J, pulse repetition rate 10 Hz, diameter of spot 0,4 mm, traverse speed of 5 mm/s, cover coefficient of hardened areas 0.6, 0.9, 1.0, have been carried out using friction machine Nanovea according by scheme "ball - surface". A ball made of ShH15 with a diameter of 3 mm has been used as a counter body. The tests of steel 20X13 for wear resistance after laser processing on Quantum-16 assembly, mode: E = 8 J, cover coefficient of hardened areas 0.3, 0.6, 1.0, have been carried out using friction machine SMTs-2 together with a sample roller (steel 95H18, hardness 60 HRC). For steel 95H18, discrete heat processing does not give advantages. Optimum extent of cover with hardened areas makes 100%, K=1.0. The greatest wear resistance of steel 20H under difference in hardness of the hardened and not hardened areas is 1600 MPa and cover factor K=1.0. For steel 40H, the difference in hardness of the hardened and not hardened areas makes 7300 MPa and optimum cover factor K_{оп} = 0.6.

The laser complexes equipped with fiber and other lasers with power of 1-6 kW can carry out operations of hardening of parts from constructional steel and cast iron with depth of layer by 1.0-2.0 mm [9-13].

ходили после лазерной обработки на установке "Квант-16", выполненной при режиме: $E=8$ Дж. Коэффициент заполнения упрочненными зонами составил 0,3, 0,6 и 1,0. Эксперименты проводили на машине трения СМЦ -2 в паре с образцом роликом (сталь 95X18, твердость 60 HRC). Оказалось, что для стали 95X18 дискретная термообработка не дает преимуществ. Оптимальная степень заполнения поверхности упрочненными зонами составляет 100% или $K=1,0$. Наибольшая износостойкость стали 20X проявляется при разнице в твердости упрочненных и неупрочненных участков 1600 МПа и коэффициенте заполнения $K=1,0$. Для стали 40X разница в твердости упрочненных и неупрочненных зон составляет 7300 МПа и оптимальный коэффициент заполнения $K_{оп} = 0,6$.

Лазерные комплексы, оснащенные волоконными и другими лазерами мощностью 1-6 кВт, могут выполнять операции по закалке деталей из конструкционных сталей и чугунов с глубиной слоя 1,0-2,0 мм [9-13]. Однако конструкция порталных систем для резки, которые в случае простоя можно использовать для лазерного упрочнения, как правило, не позволяет перемещать оптическую головку по высоте более чем на 100 мм. При толщине детали 50 мм остается возможность дефокусировки лазерного излучения в пределах 50 мм.

Целью настоящей работы являются определение геометрических параметров зон лазерного термоупрочнения в зависимости от мощности, скорости перемещения и дефокусировки лазерного луча.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В наших экспериментах лазерное упрочнение производилось на сканере для пространственного управления лазерным лучом образцов из стали 40X с размерами $12 \times 16 \times 70$ мм. В качестве источника излучения использовалась лазерная установка "Комета-М" [2]. Для увеличения поглощательной способности на поверхность образцов наносили покрытие SG504. Металлографические исследования проводили с использованием микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н, цифрового микроскопа AM413ML и металлографического микроскопа Альтами MET 1С. В первой серии экспериментов исследовали влияние плотности мощности лазерного излучения на глубину, ширину и микротвердость упрочняемых дорожек при постоянной мощности излу-

However, the design of portal systems for cutting which in case of downtime can be used for laser hardening, usually, does not allow to move optical head to the height over 100 mm. If the thickness of part is 50 mm, laser radiation defocusing within 50 mm is possible.

The purpose of this paper is to determine geometrical parameters of laser thermal hardening areas based on power, traverse speed and defocusing of laser beam.

STUDY TECHNIQUE

In our experiments laser hardening was performed using scanner for space control of laser beam for samples made of steel 40H with sizes $12 \times 16 \times 70$ mm. Laser assembly Kometa-M was used as radiation source [2]. For increase of absorptive power, the surface of samples was covered with SG504. Metallographic researches were conducted using microhardness gage PMT-3 under load of 0.98 N, digital microscope AM413ML, metallographic microscope Altami MET 1C. The influence of power density of laser radiation on depth, width and microhardness of the hardened paths at the constant radiant power of 1000 W and beam traverse speed of 10 mm/s by defocused beam scanning with frequency of 220 Hz on normal to vector of its longitudinal movement was investigated in the first series of experiments. For this purpose, the optical head with focal distance of 400 mm equipped with metal mirrors was moved in relation to the focal plane at the height of 10-100 mm.

In the second series of experiences, the influence of processing modes on parameters of the hardened paths by method of the complete factorial experiment (CFE) was defined. Radiant power W , processing speed V , mm/s, and laser beam diameter d , mm, were selected as experiment factors. Depth h and width b of laser hardening areas were considered for creation of mathematical models as system responses.

Hardening of prototypes was performed for the maximum and minimum levels of experiment factors as provided by the CFE technique [14]. The experiments were carried out by two stages: without scanning, defocusing beam and with scanning (frequency, $f=220$ Hz). Upper and lower levels of factors z_i are designated as $z+$ and $z-$, respectively, center of plan z_0 , variation range λ , conditional levels of factors are designated through x_i . Input data are provided in Table.

In addition to considering the influence of experiment factors on response, all possible interactions of factors among themselves were considered in this paper.



чения 1000 Вт и скорости перемещения луча 10 мм/с расфокусированным и сканирующим с частотой 220 Гц лучом по нормали к вектору его продольного перемещения. Для этого оптическую головку с фокусным расстоянием 400 мм, оснащенную металлическими зеркалами, перемещали вертикально относительно фокальной плоскости по высоте на 10–100 мм.

Во второй серии опытов с помощью метода полного факторного эксперимента (ПФЭ) определяли влияние режимов обработки на параметры упрочненных дорожек. В качестве факторов эксперимента были выбраны мощность излучения W (Вт), скорость обработки V (мм/с) и диаметр лазерного луча d (мм). Для построения математических моделей в качестве откликов системы рассматривались глубина h и ширина b зон лазерной закалки.

Упрочнение опытных образцов производилось для максимальных и минимальных уровней факторов эксперимента, что предусматривает методика ПФЭ [14]. Эксперименты проводились в два этапа – без сканирования расфокусированным лучом и со сканированием (частота $f=220$ Гц). Верхние и нижние уровни факторов z_i обозначены как z^+ и z^- соответственно, центр плана z_0 , диапазон варьирования λ , условные уровни факторов обозначены через x_i . Исходные данные представлены в таблице.

В настоящей работе помимо учета влияния факторов эксперимента на отклик, учитывались все возможные взаимодействия факторов между собой.

Таким образом, уравнение регрессии имеет вид [14]:

Thus, the equation of regression is as follows [14]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + b_{1,2}x_1x_2 + b_{1,3}x_1x_3 + \dots + b_{k-1,k}x_{k-1}x_k, \quad (1)$$

where: y is a system response; b is regression equation coefficient; k is a quantity of factors in the experiment.

Upon termination of the experiments, the polished sections by standard technique were prepared and triple measurements of depth and width of the hardened zones were performed. All possible interactions of factors were defined during calculation. Since CFE2³ was carried out, the number of the experiments was 8 for each series.

THE RESULTS OF STUDY AND DISCUSSION

By the results of measurement of parameters of the hardened areas in the first series of experiments, the plots of dependence of depth and width of the hardened areas on change of distance to the focal plane or power density of radiation are presented in fig. 1a, b. The processing of the results of experiments has shown that high-frequency scanning of laser beam in normal to vector of its longitudinal movement allows to increase the cross-sectional area of hardening section by 1.6–2.5 times in comparison with hardening by defocusing beam. The left and right part of the plot in fig. 1a can be presented in the form of linear relation with restriction of area of definition. For example, for the left part of the plot, the limit values of diameter of laser spot on the part surface are 2–4 mm, and 8–10 mm for the right part. Then the solution of linear equations of regression will have adequate values.

Сводная таблица кодирования переменных ПФЭ

Summary table of coding of CFE variables

Фактор z_i Factor z_i	Верхний уровень фактора z_i^+ Upper level of factor z_i^+	Нижний уровень фактора z_i^- Lower level of factor z_i^-	Центр плана z_i^0 Center of plan z_i^0	Интервал варьирования λ_i Varying interval λ_i	Зависимость кодированной переменной от натуральной Dependence of coding of variable on full size
$W, \text{ Вт}$ $W, \text{ W}$	1000	700	850	150	$x_i = \frac{W_i - 850}{150}$
$V, \text{ мм/с}$ $V, \text{ mm/s}$	10	6	8	2	$x_i = \frac{V_i - 8}{2}$
$d, \text{ мм}$ $d, \text{ mm}$	3,5	2,5	3	0,5	$x_i = \frac{d_i - 3}{0,5}$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + b_{1,2}x_1x_2 + b_{1,3}x_1x_3 + \dots + b_{k-1,k}x_{k-1}x_k, \quad (1)$$

где: y – отклик системы; b_k – коэффициенты уравнения регрессии; k – число факторов в эксперименте.

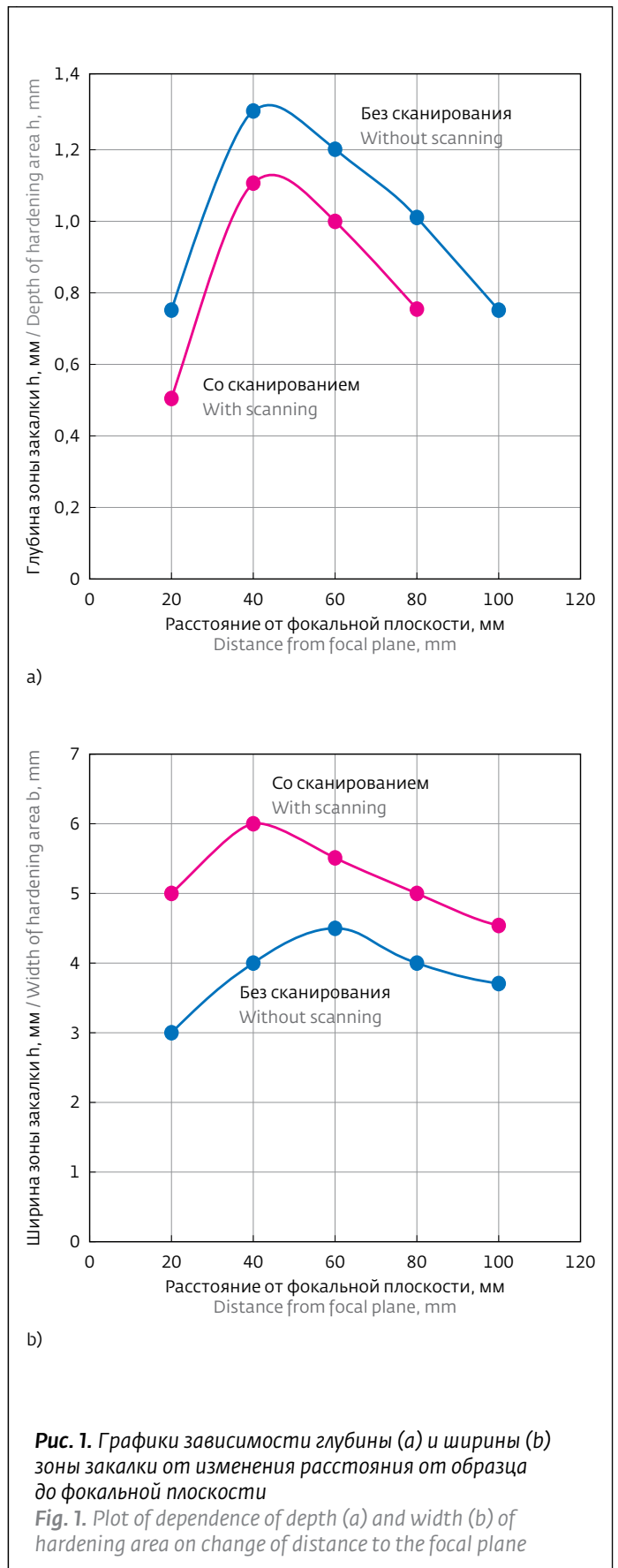
По окончании экспериментов изготавливались шлифы по стандартной методике и производились трехкратные измерения глубины и ширины закаленных зон. В расчете определялись все возможные взаимодействия факторов. Количество экспериментов составило 8 для каждой серии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам измерений параметров упрочненных зон в первой серии экспериментов построены графики зависимости глубины и ширины зон закалки от изменения расстояния от образца до фокальной плоскости или плотности мощности излучения (рис.1а, б). Обработка результатов экспериментов показала, что высокочастотное сканирование лазерного луча по нормали к вектору его продольного перемещения позволяет повысить площадь поперечного сечения зон закалки в 1,6-2,5 раза по сравнению с упрочнением расфокусированным лучом. Функцию на графике (рис.1а) можно аппроксимировать двумя линейными зависимостями с ограничением области их определения. Например, для возрастающей функции (левая часть графика) предельные значения диаметров лазерного пятна на поверхности детали 2-4 мм, а для убывающей функции (правая часть графика) – 8-10 мм. Тогда решение линейных уравнений регрессии будет иметь адекватные значения.

В результате проведенного регрессионного анализа получена система уравнений регрессии геометрических параметров упрочненных зон в зависимости от режимов обработки. Так, уравнение для определения глубины закалки h без сканирования в натуральных величинах имеет вид

$$h_{bc} = 0,801 + 0,074 \left(\frac{W-850}{150} \right) - 0,047(V-8) + 0,12(d-3) + 0,0075 \left(\frac{W-850}{150} \right) (V-8) - 0,044(V-8)(d-3) + 0,012 \left(\frac{W-850}{150} \right) (V-8)(d-3), \quad (2)$$





со сканированием луча:

$$h_{\text{скан}} = 0,55 + 0,069 \left(\frac{W-850}{150} \right) - 0,042(V-8) + 0,22(d-3) - 0,02 \left(\frac{W-850}{150} \right) (V-8) + 0,06 \left(\frac{W-850}{150} \right) (d-3) - 0,032(V-8)(d-3). \quad (3)$$

Для расчета ширины b зон закалки без сканирования луча уравнение имеет вид

$$b_{\text{бс}} = 2,612 + 0,16 \left(\frac{W-850}{150} \right) - 0,07(V-8) + 0,66(d-3) - 0,03 \left(\frac{W-850}{150} \right) (V-8) + 0,04 \left(\frac{W-850}{150} \right) (d-3) - 0,04(V-8)(d-3), \quad (4)$$

со сканированием луча:

$$b_{\text{скан}} = 6,317 + 0,438 \left(\frac{W-850}{150} \right) - 0,074(V-8) + 0,165(d-3) + 0,654 \left(\frac{W-850}{150} \right) (d-3) - 0,142(V-8)(d-3) + 0,059 \left(\frac{W-850}{150} \right) (V-8)(d-3). \quad (5)$$

Величина соответствующего коэффициента характеризует степень влияния фактора на функцию отклика. Превалирующее влияние на геометрические параметры зон закалки имеет мощность излучения. С увеличением мощности растут ширина и глубина зоны закалки. С ростом скорости перемещения глубина и ширина закаленных зон уменьшается. С увеличением диаметра луча растет глубина и ширина зон закалки.

По уравнениям регрессии проведены расчеты и сопоставлены с результатами эксперимента. Расчетные значения отличаются от фактических глубины и ширины зон закалки не более чем на 4%. Построены сравнительные поверхности, определяющие зависимость между откликами и факторами эксперимента. Сравнительные поверхности построены для функций глубины закалки $h_{\text{бс}}$, $h_{\text{скан}} = f(W, V)$ (рис.2а, б) и $b_{\text{бс}}$ и $b_{\text{скан}} = f(W, V)$ (рис.2с, д) при диаметре расфокусированного лазерного луча 3,5 мм.

Применение высокочастотного сканирования луча приводит к незначительному уменьшению глубины зоны закалки и к увеличению в 2-3 раза ширины упрочненного слоя. Так при

As a result of the carried-out regression analysis, a system of combined equations of regression of geometrical parameters of the hardened areas depending on the processing modes is received.

Thus, the equation for determination of depth of hardening h without scanning in full size is as follows:

$$h_{\text{бс}} = 0,801 + 0,074 \left(\frac{W-850}{150} \right) - 0,047(V-8) + 0,12(d-3) + 0,0075 \left(\frac{W-850}{150} \right) (V-8) - 0,044(V-8)(d-3) + 0,012 \left(\frac{W-850}{150} \right) (V-8)(d-3), \quad (2)$$

with beam scanning:

$$h_{\text{скан}} = 0,55 + 0,069 \left(\frac{W-850}{150} \right) - 0,042(V-8) + 0,22(d-3) - 0,02 \left(\frac{W-850}{150} \right) (V-8) + 0,06 \left(\frac{W-850}{150} \right) (d-3) - 0,032(V-8)(d-3). \quad (3)$$

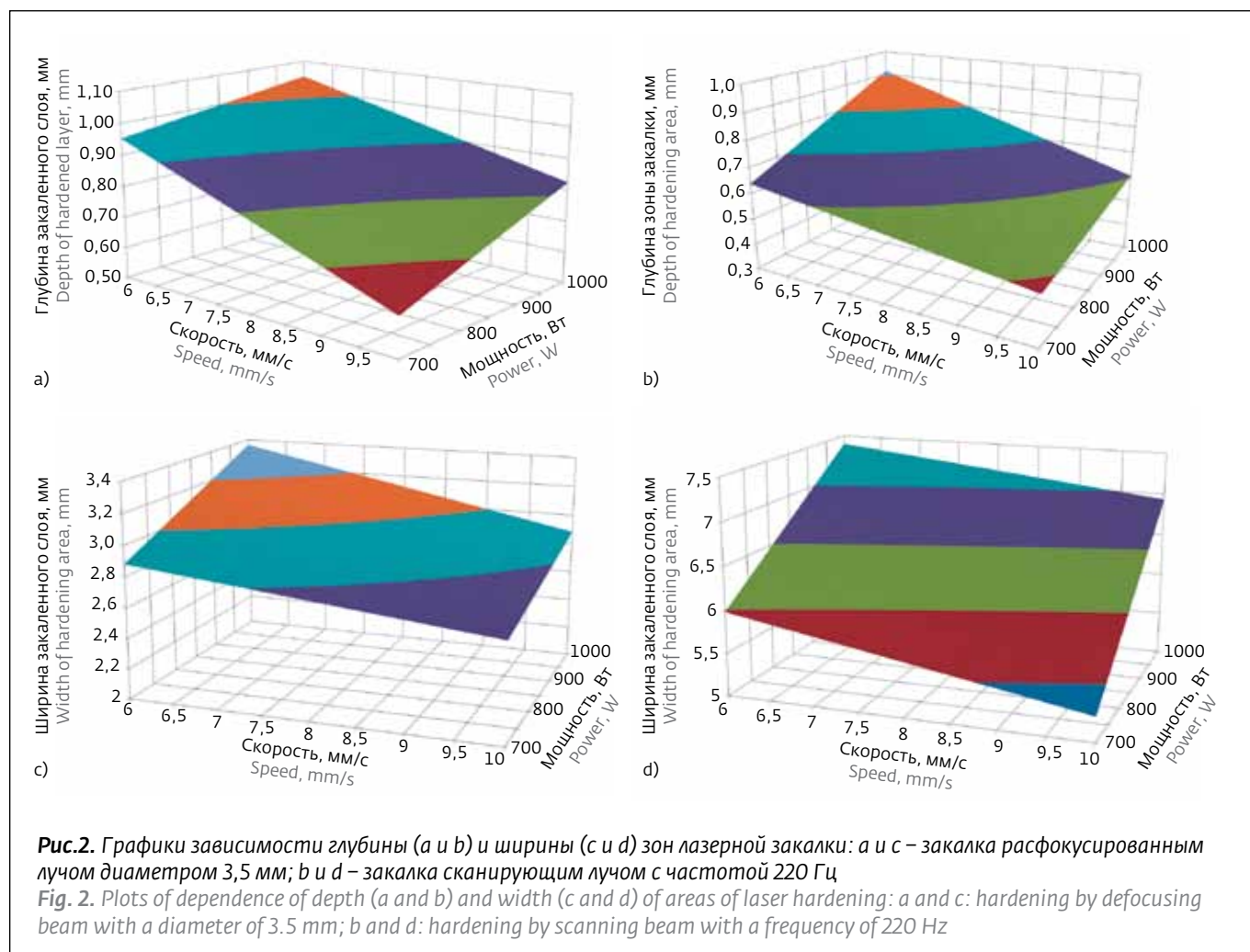
For calculation of width b of hardening areas without beam scan, the equation is as follows:

$$b_{\text{бс}} = 2,612 + 0,16 \left(\frac{W-850}{150} \right) - 0,07(V-8) + 0,66(d-3) - 0,03 \left(\frac{W-850}{150} \right) (V-8) + 0,04 \left(\frac{W-850}{150} \right) (d-3) - 0,04(V-8)(d-3), \quad (4)$$

with beam scanning:

$$b_{\text{скан}} = 6,317 + 0,438 \left(\frac{W-850}{150} \right) - 0,074(V-8) + 0,165(d-3) + 0,654 \left(\frac{W-850}{150} \right) (d-3) - 0,142(V-8)(d-3) + 0,059 \left(\frac{W-850}{150} \right) (V-8)(d-3). \quad (5)$$

The value of the corresponding factor characterizes the extent of influence of the factor on response function. Radiant power has the prevailing influence on geometrical parameters of hardening areas. With increase in power, the width and depth of hardening area also increase. With increase in traverse speed, depth and width of the hardening area decrease. With increase in diameter of beam, depth and width of hardening area also increase.



скорости перемещения луча 10 мм/с, мощности излучения 700 Вт и при лазерном пятне на поверхности диаметром 2,5 мм ширина зоны закалки составляет 2,284 мм при ее глубине 0,664 мм (рис.3а). При высокочастотном сканировании луча с частотой 220 Гц по нормали к его подаче ширина зоны закалки увеличивается до 6,332 мм при незначительном уменьшении глубины закалки до 0,412 мм. Зона оплавления в первом случае составляет 300–350 мкм при сканировании луча 5–30 мкм. Микротвердость зон закалки расфокусированным и сканирующим лучом составила 7180–7840 МПа и 7420–8520 МПа соответственно. Этой глубины достаточно для замены операции азотирования с упрочненным слоем 0,3–0,4 мм операцией лазерной закалки. При 100%-ной закалке поверхностей деталей с наложением дорожек в местах их перекрытия образуются зоны отпуска, составляющие по ширине на упрочняемой поверхности рядом с дорожкой 0,5–3,0 мм расфокусированн-

The regression equations are used for calculations and compared with the results of experiment. Computational values differ from the actual depth and width values of hardening areas no more than for 4%. The comparative surfaces defining dependence between responses and factors of experiment are constructed. Comparative surfaces are constructed for functions of depth of hardening h_{ws} , $h_{scan} = f(W, V)$ (fig. 2a, b) and b_{ws} and $b_{scan} = f(W, V)$ (fig. 2c, d) with diameter of defocusing laser beam of 3.5 mm.

Application of high-frequency beam scanning leads to insignificant reduction of depth of hardening area and to increase by 2–3 times of width of the hardened layer. Thus, with traverse speed of beam 10 mm/s, the radiant power 700 W, laser spot on surface with a diameter of 2.5 mm, the width of hardening area is 2.284 mm with its depth of 0.664 mm (fig. 3a). With high-frequency beam scanning with frequency of 220 Hz on normal to its feed, the width of hardening area increases to 6.332 mm with insignificant reduction of depth of hardening to 0.412 mm. The melting

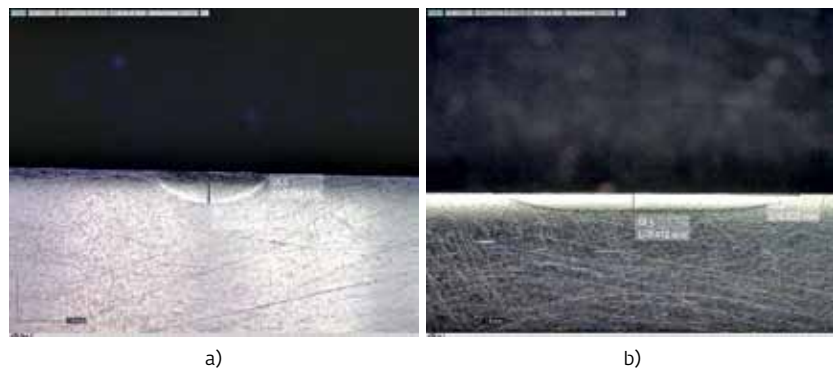


Рис.3. Микрошлифы зон закалки стали 40H: *a* – расфокусированным лучом; *b* – сканирующим лучом с частотой 220 Гц
Fig. 3. Microsections of hardening areas of steel 40H: *a*: defocusing beam; *b*: scanning beam with a frequency of 220 Hz

ным лучом и 0,1–0,2 мм при закалке колеблющимся, с высокой частотой, лучом в зависимости от режимов обработки. Уменьшение размера и количества зон отпуска или их исключение способствует повышению износостойкости и задиростойкости закаленных сканирующим лазерным лучом поверхностей трения деталей машин.

Для многих деталей ширина закаленных зон не превышает 6 мм. К таким деталям относят: штампы и пресс-формы с зонами упрочнения по кромке, поверхности трения шпоночных, шлицевых и резьбовых соединений, поверхности канавок поршней и поршневых колец, втулок цилиндров двигателей машин, зубчатых передач с модулем 0,8–2,2 мм, направляющие и суппорты, шпиндели, клинья металлорежущих станков. Закалке подвергаются 50–60% рабочих поверхностей этих деталей.

Для замены трудоемкой и энергоемкой операции цементации деталей с толщиной слоя 1 мм в первой серии экспериментов получены зоны упрочнения с глубиной слоя 1,2 мм, шириной 6,6 мм и с микротвердостью 7180–8300 МПа при диаметре лазерного пятна 5 мм и частоте сканирования 220 Гц.

Из представленных результатов исследования следует, что наименьшие потери энергии лазерного излучения достигаются при дефокусировке луча до 60 мм. Дальнейшее увеличение диаметра луча приводит к значительной потере энергии по краям дорожки закалки – иногда более 50%, но в ряде случаев это допустимо при упрочнении без оплавления, например поверхности кромок штампов.

area in the first case is 300–350 μm with beam scanning of 5–30 μm . Microhardness of hardening areas by defocusing and scanning beam is 7180–7840 MPa and 7420–8520 MPa, respectively. This depth is enough for replacement of nitriding operation with the hardened layer of 0.3–0.4 mm of laser hardening. With 100% hardening of part surfaces with overlaying of paths, the drawing-back areas are formed in places of their overlapping, where the width on the hardened surface near path is 0.5–3.0 mm for defocusing beam and 0.1–0.2 mm when hardening by fluctuating high-frequency

beam, depending on processing modes. Reduction in size and quantity of drawing-back areas or their exception promotes increase of wear resistance and scoring resistance of the friction surfaces of machine parts hardened by scanning laser beam.

For many parts the width of hardened areas does not exceed 6 mm. They include: stamps and molds, with hardening areas on edge, friction surface of spline, slit and threaded connections, grooves of pistons and piston rings, liners of cylinders of machine engines, tooth gearing with module 0.8–2.2 mm, guides and supports, spindles, wedges of metal-cutting machines, when hardening 50–60% of effective areas, etc.

To replace labor-consuming and power-intensive operation of cementation of parts with thickness of layer of 1 mm, hardening areas with depth of layer of 1.2 mm, 6.6 mm wide, with microhardness of 7180–8300 MPa, with diameter of laser spot of 5 mm and scan frequency of 220 Hz are received in the first series of experiments.

As follows from the provided study results, the smallest losses of energy of laser radiation are reached when defocusing beam is up to 60 mm. Further increase in beam diameter leads to considerable loss of energy at the edges of hardening path, sometimes over 50%, but in some cases it is admissible when hardening without melting, for example, for edge surface of stamps.

Application of optical heads with scanners allows increasing the quality of hardened layers and efficiency of laser hardening. The received surfaces (fig. 2) as to their depth and width of hardened paths for defocusing laser beam of 40 mm demonstrate the possibility of use of expensive equipment for laser-beam cutting in the field of hardening of parts with laser beam. For



Применение оптических головок со сканирующими устройствами позволяет повысить качество закаленных слоев и производительность лазерной закалки. Полученные поверхности (см. рис.2) по глубине и ширине закаленных дорожек при дефокусировке лазерного луча на 40 мм наглядно показывают возможность использования дорогостоящего оборудования для лазерной резки в области упрочнения деталей лазерным лучом. Для маложестких и длинномерных деталей лазерная закалка без оплавления поверхности экономически нецелесообразна, поскольку при такой технологии необходимо защищать поверхность детали инертными газами для исключения образования окалины, а затем проводить финишное шлифование для устранения остаточных деформаций в пределах 0,05–0,1 мм. Кроме того, лазерная закалка в режиме микроплавления поверхности обеспечивает возможность 100%-ного визуального контроля упрочненных деталей и не требует дорогостоящих устройств с обратной связью для определения температуры поверхности в процессе работы.

low-rigid and lengthy parts, laser hardening without melting of surface is economically inexpedient since this technology requires protecting of part surface with inert gases to prevent the formation of scale and then to carry out finishing grinding for elimination of permanent deformation within 0.05–0.1 mm. Furthermore, laser hardening in the mode of micro melting of surface gives the chance of 100% sight control of the hardened parts and does not demand expensive devices with response for determination of surface temperature in the course of work.

CONCLUSIONS

- Dependences of depth and width of the hardened areas on defocusing are received with constant speed and power of laser beam.
- By means of the regression analysis, the surfaces clearly demonstrating dependence of parameters of hardening areas on power and traverse speed of laser beam are plotted.
- The modes of laser hardening showing increase of efficiency by 1.6–2.5 times and microhardness of 600–1200 MPa for high-frequency scanning of laser beam in comparison with hardening by defocusing beam are provided.



ВЫВОДЫ

- Получены зависимости глубины и ширины упрочненных зон от дефокусировки при постоянной скорости и мощности лазерного луча.
- С помощью регрессионного анализа построены поверхности, наглядно демонстрирующие зависимость параметров зон упрочнения от мощности и скорости перемещения лазерного луча.
- Представлены режимы лазерной закалки, показывающие повышение производительности в 1,6–2,5 раза и микротвердости на 600–1200 МПа при высокочастотном сканировании лазерного луча по сравнению с упрочнением расфокусированным пучком.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Матвеев Ю.И.** Лазерные технологии в судовом машиностроении. – Н. Новгород: Изд-во ГОУ ВПО ВГАВТ, 2003.
Matveev Ju.I. Lazernye tehnologii v sudovom mashinostroenii. – N. Novgorod: Izd-vo GOU VPO VGAVT, 2003.
2. **Бирюков В.П., Дозоров А.В.** Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала. – Проблемы машиностроения и надежности машин, 2006, № 1, с. 60–66.
Biryukov V.P., Dozorov A.V. Lazernye sistemy dlja uprochnenija, naplavki detalj i tochnogo raskroja listovogo materiala. – Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin, 2006, № 1, с. 60–66.
3. Пат. 2449028 РФ. Способ закалки поверхностных слоев плоских длинномерных стальных изделий / В.П. Бирюков, Ю.Н. Дроздов, Э.Г. Гудушаури, Б.Н. Михайлин, А.А. Фишков, 2012.
Pat. 2449028 RF. Sposob zakalki poverhnostnyh sloev ploskih dlinnomernyh stal'nyh izdelij / V.P. Biryukov, Ju.N. Drozdov, Je.G. Gudushauri, B.N. Mihajlin, A.A. Fishkov, 012.
4. **Шлегель А.Н.** Выбор рациональных режимов лазерного упрочнения рабочих кромок чугунных форм для стеклоформирующих машин. – Вестник МГТУ "СТАНКИН", 2011, № 3, с. 106–109.
Shlegel' A.N. Vybora racional'nyh rezhimov lazernogo uprochnenija rabochih kromok chugunnyh form dlja stekloformujushhih mashin. – Vestnik MG TU "STANKIN", 2011, № 3, с. 106–109.
5. **Морозов В.В., Югов В.И., Шлегель А.Н.** Исследование износостойкости упрочненных лазерным излучением кромок деталей формовых комплектов для литья стеклотары. – Упрочняющие технологии и покрытия, 2007, № 7, с. 52–56.
Morozov V.V., Jugov V.I., Shlegel' A.N. Issledovanie iznosostojkosti uprochnennyh lazernym izlucheniem kromok detalj formovyh komplektov dlja lit'ja steklotary. – Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija, 2007, № 7, с. 52–56.
6. **Лаптева В.Г., Куksenova Л.И., Алисин В.В.** Влияние лазерной закалки на структуру поверхностных слоев конструкционных сталей и их износостойкость. – Проблемы машиностроения и надежности машин, 2009, № 2, с. 79–84.
Lapteva V.G., Kuksenova L.I., Alisin V.V. Vlijanie lazernoj zakalki na strukturu poverhnostnyh sloev konstrukcionnyh stalej i ih iznosostojkost'. – Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin, 2009, № 2, с. 79–84.
7. **Куksenova Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г. и др.** Методы испытаний на трение и износ. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001.
Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Kolmakov A.G. i dr. Metody ispytaniy na trenie i iznos. – M.: Internet Inzhiniring, 2001.
8. **Кузьмин С.Д., Тарасова Т.В., Белашова И.С. и др.** Влияние степени дискретности лазерной обработки на износостойкость сталей и сплавов. – Упрочняющие технологии и покрытия, 2016, № 9, с. 9–14.
Kuz'min S.D., Tarasova T.V., Belashova I.S. i dr. Vlijanie stepeni diskretnosti lazernoj obrabotki na iznosostojkost' stalej i splavov. – Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija, 2016, № 9, с. 9–14.
9. **Pellizzari M., De Flora M.G.** Influence of laser hardening on the tribological properties of forged steel for hot rolls. – Wear, 2011, v. 271, p. 2402–2411.
10. **Ion J.** Laser Processing of Engineering Materials: principles, procedure and industrial application. – Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
11. **Богданов А.В., Грезев Н.В., Шмелев С.А. и др.** Упрочнение колесной стали волокonnыми лазерами. – Научные технологии в машиностроении, 2016, № 9, с. 30–37.
Bogdanov A.V., Grezev N.V., Shmelev S.A. i dr. Uprochnenie kolesnoj stali volokonnyimi lazerami. – Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii, 2016, № 9, с. 30–37.
12. **Shariff S.M., Pal T.K., Padmanabham G., Joshi S.V.** Influence of chemical composition and prior microstructure on diode laser hardening of railroad steels. – Surface and Coatings Technology, 2013, v. 228, p. 14–26.
13. **Soriano C., Leund J., Lambarri J., Navas V.G., Sanz C.** Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades. – Applied Surface Science, 2011, v. 257, p. 7101–7106.
14. **Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И.** Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М.: Наука, 1980.
Evdokimov Ju.A., Kolesnikov V.I., Teterin A.I. Planirovanie i analiz jeksperimentov pri reshenii zadach trenija i iznosa. – M.: Nauka, 1980.