



# Определение параметров зон лазерного воздействия и триботехнических свойств поверхностей сталей

В. П. Бiryukov  
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН,  
Москва, Россия

В работе представлены результаты металлографических и триботехнических исследований образцов стали 40X с лазерной закалкой из жидкого и твердого состояния. На основании проведенного регрессионного анализа получены закономерности изменения глубины и ширины зон термического воздействия при изменяемых частотах поперечных колебаний луча, скорости обработки и его дефокусировке. Расширены возможности применения сканирующих устройств резонансного типа для лазерной термической обработки и легирования сталей. Анализ результатов триботехнических испытаний показал значительное уменьшение коэффициентов трения, повышение износостойкости и нагрузочной способности контакта по сравнению с исходной сталью.

**Ключевые слова:** взаимодействие лазерного излучения с веществом, лазерная поверхностная закалка, лазерное упрочнение, испытания на трение и износ, трибологические параметры

Статья поступила: 22.02.2022

Статья принята: 10.03.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Лазерная поверхностная закалка сталей обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционной пламенной и индукционной поверхностной

# Determination of Parameters of Laser Impact Zones and Tribotechnical Properties of Steel Surfaces

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

The article presents the results of metallographic and tribotechnical studies of 40Kh steel samples with laser hardening from liquid and solid states. On the basis of the regression analysis carried out, regularities were obtained for changing the depth and width of the heat-affected zones with varying frequencies of transverse oscillations of the beam, processing speed, and its defocusing. The possibilities of using scanning devices of the resonant type for laser heat treatment and alloying of steels have been expanded. An analysis of the results of tribotechnical tests showed a significant decrease in friction coefficients, an increase in wear resistance and load capacity of the contact compared to the original steel.

**Keywords:** interaction of laser radiation with matter, laser surface hardening, laser hardening, friction and wear tests, tribological parameters

Received on: 22.02.2022

Accepted on: 10.03.2022

## INTRODUCTION

Laser surface hardening of steels has a number of advantages compared to traditional flame and induction surface hardening, including the absence of a hardening medium, low residual deformations, high hardness, local processing, and environmental friendliness of the process [1]. The heating of



закалкой, включая отсутствие закалочной среды, и низкие остаточные деформации, высокую твердость, локальность обработки и экологическую чистоту процесса [1]. Нагрев тонкого поверхностного слоя происходит в течение малого времени лазерного воздействия на обрабатываемую деталь и быстрого охлаждения по механизму теплопроводности в глубь материала [2]. Толщина упрочненного слоя зависит от температуры поверхности и скорости лазерного сканирования [3, 4]. Основными препятствиями для широкого внедрения лазерной закалки, вместо устоявшихся технологий, являются зоны отпуска, возникающие при наложении лазерных дорожек, при обработке больших площадей. Сокращение количества зон отпуска возможно при лазерной закалке с помощью прямоугольного лазерного пятна, которое позволяет упрочнять за один проход зону в несколько раз шире, чем расфокусированное круглое лазерное пятно [5], или путем поперечных колебаний луча по ширине обрабатываемой зоны [6]. Напряженное состояние является результатом температурных градиентов и микроструктурных изменений во время нагрева и охлаждения [7], причем степень этих эффектов сильно зависит от геометрии обрабатываемой детали и положения обрабатываемой области. Для оценки температуры представлен ряд аналитических и численных моделей при лазерной термической обработке поверхности [8, 9]. В ряде работ предложены критерии оценки для прогнозирования фазовых переходов на основе расчета температурных полей [10, 11] и кинетических моделей изменения фазы [12-14]. Прогнозирование остаточных напряжений было выполнено для единичной лазерной дорожки [15-17]. Экспериментальная оценка также была проведена для конкретных случаев [18, 19], включая оценку механической и усталостной долговечности [20]. Несмотря на значительное количество работ, проведенных по исследованию влияния режимов на параметры упрочненных зон, до сих пор остаются нерешенными вопросы по оптимизации режимов лазерного термоупрочнения и легирования сталей.

Целями нашей работы было определение влияния частоты поперечных колебаний лазерного луча, положения фокальной плоскости и скорости обработки на параметры зон лазерного воздействия, включая режимы с оплавлением поверхности для возможного использования при лазерном термоупрочнении и легировании сталей и триботехнических свойств упрочненных образцов.

a thin surface layer occurs during a short time of laser action on the workpiece and rapid cooling by the mechanism of heat conduction deep into the material [2]. The thickness of the hardened layer depends on the surface temperature and the laser scanning speed [3, 4]. The main obstacles to the widespread introduction of laser hardening instead of established technologies are the tempering zones that occur when applying laser tracks when processing large areas. Reducing the number of tempering zones is possible with laser hardening using a rectangular laser spot, which makes it possible to harden in one pass a zone several times wider than a defocused round laser spot [5], or by transverse beam oscillations along the width of the treated zone [6]. The stress state is the result of temperature gradients and microstructural changes during heating and cooling [7], the extent of these effects being highly dependent on the geometry of the workpiece and the position of the workpiece. To estimate the temperature, a number of analytical and numerical models are presented at laser heat treatment of the surface [8, 9]. In a number of works, evaluation criteria have been proposed for predicting phase transitions based on the calculation of temperature fields [10, 11] and kinetic models of phase change [12-14]. Residual stresses were predicted for a single laser track [15-17]. Experimental evaluation has also been carried out for specific cases [18,19], including evaluation of mechanical and fatigue life [20]. Despite a significant number of works carried out on the study of the influence of regimes on the parameters of hardened zones, there are still unresolved questions on optimizing the regimes of laser thermal hardening and alloying of steels.

The aims of our work were to determine the influence of the frequency of transverse oscillations of the laser beam, the position of the focal plane and the processing speed on the parameters of the laser impact zones, including modes with surface melting for possible use in laser thermal hardening and alloying of steels and the tribotechnical properties of hardened samples.

## EQUIPMENT AND STUDY METHODS

For laser thermal hardening, samples of steel 40Kh with dimensions of 12×20×70 mm were used. The experiments were carried out on an automated laser technological complex [21]. The frequency of transverse oscillations of the laser beam, beam defocusing, and processing speed were chosen as variable parameters. The density of the supplied energy was changed within 39.2-84.9 W·s/mm<sup>2</sup>.

## ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для лазерного термоупрочнения использовали образцы стали 40X с размерами 12×20×70 мм. Эксперименты проводили на автоматизированном лазерном технологическом комплексе [21]. В качестве варьируемых параметров были выбраны частота поперечных колебаний лазерного луча, расфокусировка пучка, скорость обработки. Плотность подводимой энергии изменяли в пределах 39,2–84,9 Вт·с/мм<sup>2</sup>. Первую партию образцов обрабатывали на трех резонансных частотах торсион сканирующего устройства, обеспечивающего поперечные колебания луча 78, 116 и 230 Гц. Вторую партию – на оптимизированных режимах. Мощность излучения во всех экспериментах оставалась постоянной 1 кВт. Металлографические исследования были выполнены с использованием цифровых микроскопов, инвертированного металлографического микроскопа, микротвердомера ПМТ-3.

Испытания на трение и износ проводили по схеме: «плоский образец (сталь 40X обработанный лазерным лучом) – торец вращающейся втулки (контробразец сталь 40X, 49–53 HRC)». Скорость скольжения и давление на образец изменяли ступенчато в пределах 0,15–4,0 м/с и 1–6 МПа соответственно. В зону трения подавали масло турбинное ТП22С по 1 капле в секунду.

Математическую обработку полученных результатов по глубине закаленного из жидкого, твердого состояния (H) и ширине зоны лазерного воздействия (B) проводили с помощью полного факторного эксперимента (ПФЭ) с использованием линейного уравнения регрессии (1):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (1)$$

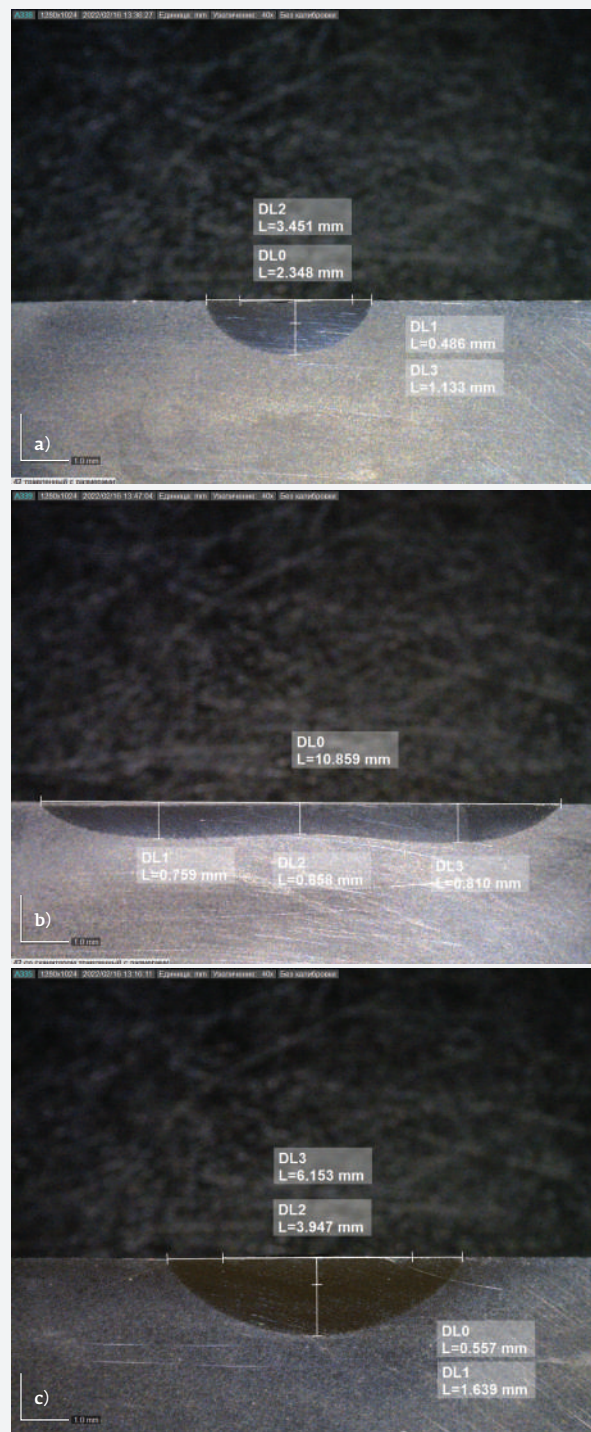
где:  $y$  – отклик системы;

$x_i$  – уровни факторов;

$b$  – коэффициенты уравнения регрессии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

По полученным данным металлографии первой партии образцов было установлено, что глубина и ширина на частотах сканирования 78 и 230 при дефокусировке 40 мм и скорости перемещения 5 мм/с существенно различались. Закаленные дорожки на частотах 78 Гц имели форму лунки. При частоте сканирования 230 Гц в центре дорожки глубина зоны составляла 0,22–0,25 мм, а по краям, в зонах остановки луча, увеличива-



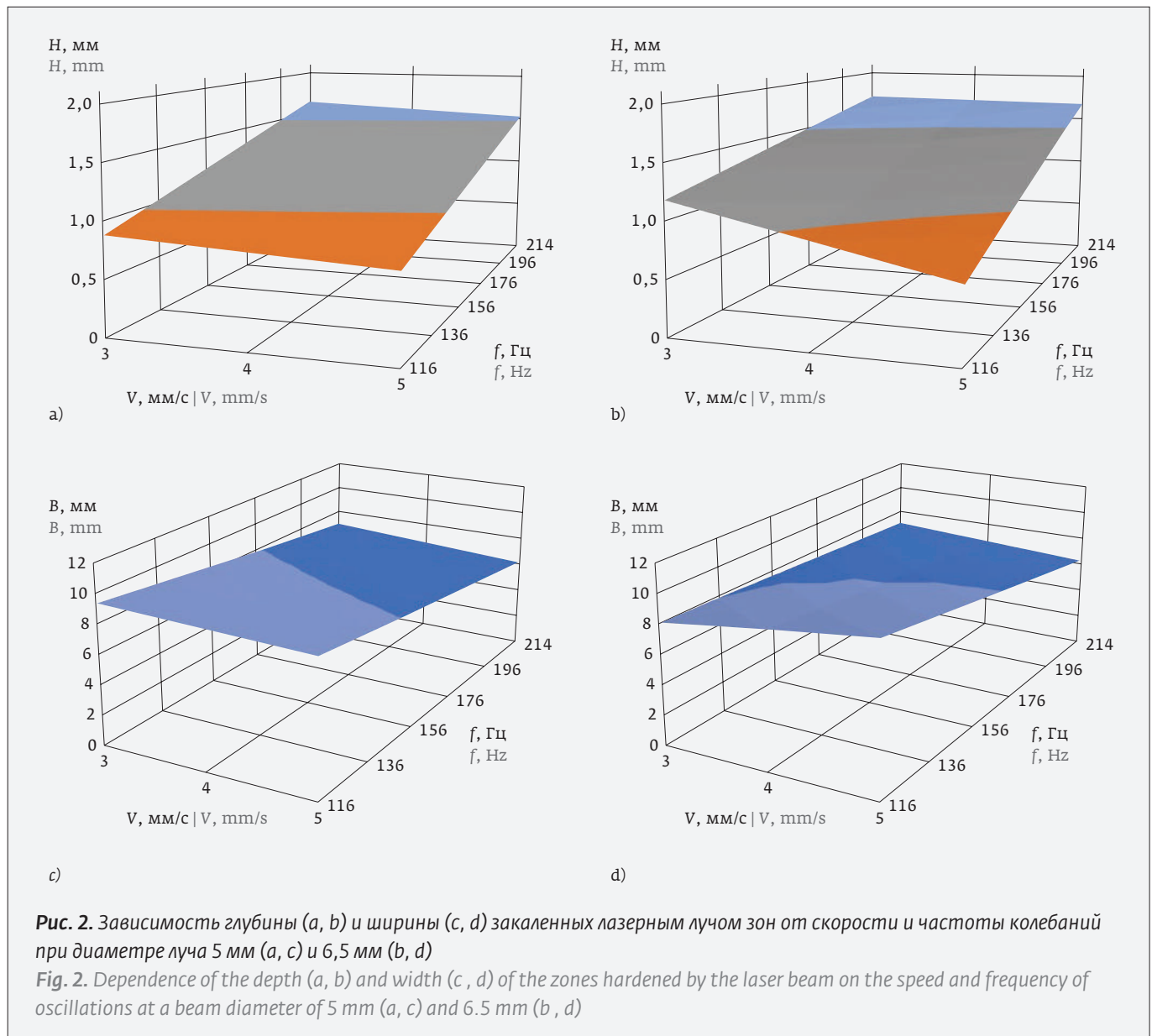
**Рис. 1.** Микрошлифы зон упрочнения стали 40X расфокусированным (а) и колеблющимся лучом (б, в) при скорости обработки 3 мм/с: а)  $f=0$  Гц,  $d=5,0$  мм; б)  $f=230$  Гц,  $d=5,0$  мм; в)  $f=214$  Гц,  $d=6,5$  мм

**Fig. 1.** Microsections of hardening zones of steel 40Kh with defocused (a) and oscillating beam (b, c) at a processing speed of 3 mm/s: a)  $f=0$  Hz,  $d=5.0$  mm; b)  $f=230$  Hz,  $d=5.0$  mm; c)  $f=214$  Hz,  $d=6.5$  mm

лась до 0,5-0,6 мм при ширине зоны 10,457 мм. На рис. 1 представлены микрошлифы зон лазерного упрочнения расфокусированным (а) и колеблющимся лучом с частотой 230 Гц (б) при скорости 3 мм/с и дефокусировке 40 мм. При лазерной закалке с колебаниями луча частотой 116 Гц на всех режимах получены удовлетворительные результаты, и они выше по ширине, чем зоны, полученные при обработке на частоте 78 Гц. Вторую партию образцов обрабатывали при частоте колебаний луча 214 Гц, что привело к образованию закаленного слоя с максимальной глубиной в центре упрочненной зоны, и созданию зоны оплавления в центре закаленной дорожки (рис. 1, с). Полученные режимы с оплавлением поверхности

The first batch of samples was processed at three resonant frequencies of the torsion of the scanning device providing transverse vibrations of the beam at 78, 116 and 230 Hz. The second batch on optimized modes. The radiation power in all experiments remained constant at 1 kW. Metallographic studies were performed using digital microscopes, an inverted metallographic microscope, and a PMT-3 microhardness tester.

Friction and wear tests were carried out according to the scheme: “a flat sample (steel 40Kh treated with a laser beam) - the end of a rotating sleeve (counter-sample steel 40Kh, 49-53 HRC)”. The sliding speed and pressure on the sample were changed stepwise within 0.15-4.0 m/s and 1-6 MPa, respec-



будут использованы, как для закалки, так и для легирования сталей с применением поперечных колебаний луча. Для определения влияния режимов обработки на глубину и ширину зон лазерного воздействия по уравнениям регрессии построены поверхности (рис. 2).

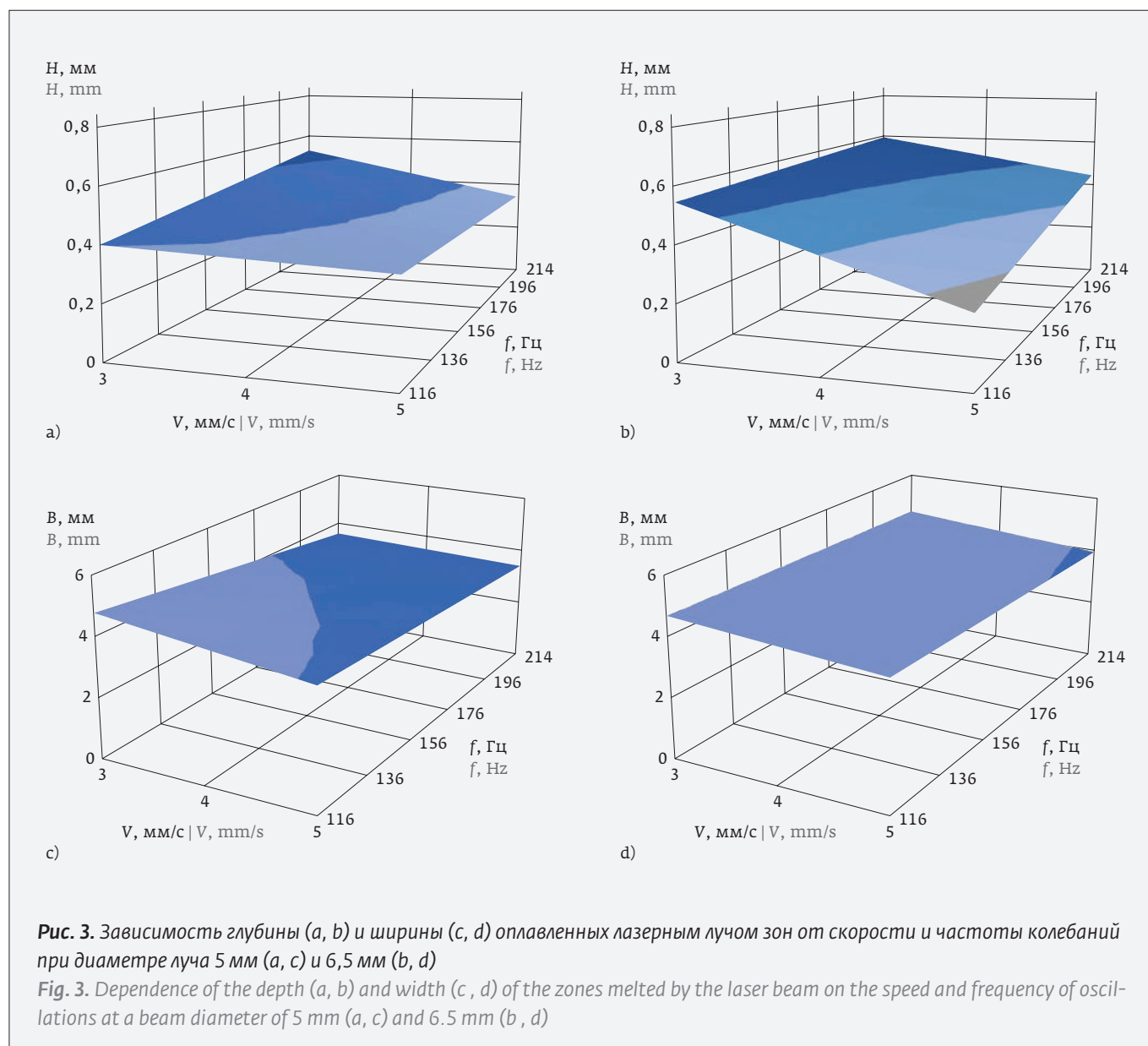
Глубина зоны закалки при диаметрах лазерного пятна 5 и 6,5 мм возрастает с увеличением частоты колебаний луча. Ширина зон закалки с увеличением частоты колебаний луча заметно снижается при диаметре луча 5 мм, а при диаметре 6,5 мм менее значительно. Для оценки влияния частоты сканирования на параметры зон оплавления по результатам расчетов уравнений регрессии построены поверхности (рис. 3)

tively. Turbine oil TP22S was supplied to the friction zone at a rate of 1 drop per second.

Mathematical processing of the results obtained in terms of the depth of the quenched from the liquid, solid state ( $H$ ) and the width of the laser impact zone ( $B$ ) was carried out using a full factorial experiment (FFE) using a linear regression equation (1):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (1)$$

where:  $y$  is the system response;  
 $x_i$  is the level of factors;  
 $b$  is the coefficient of the regression equation.



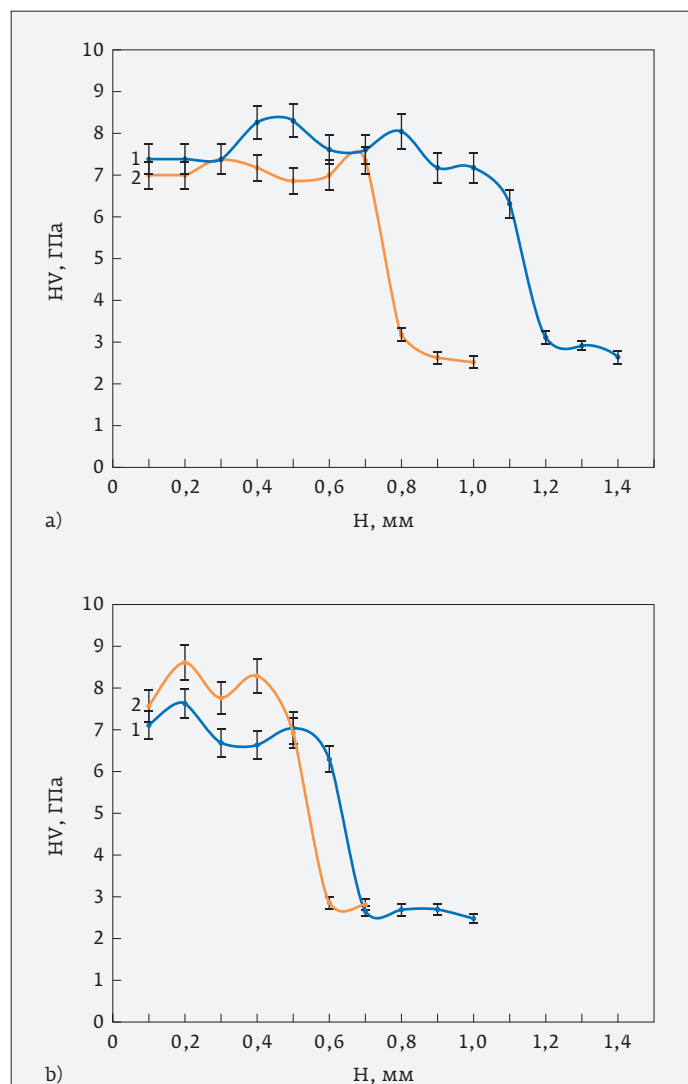
Глубина зон оплавления составляла 0,4–0,6 мм при их ширине 3,6–4,7 мм при обработке лазерным пятном 5 мм, значительно превосходили параметры зон оплавления расфокусированным лучом. Нагрев лучом диаметром 6,5 мм при малых скоростях обеспечивал глубину проплавления 0,55–0,62 мм, однако на больших скоростях и частоте колебаний 116 Гц она не превышала 0,3 мм, а ширина зоны оплавления была более стабильна и составляла 4,2–4,8 мм. С ростом

## RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES

According to the metallographic data obtained from the first batch of samples, it was found that the depth and width at scanning frequencies of 78 and 230 at a defocus of 40 mm, and a displacement speed of 5 mm/s, differed significantly. Hardened tracks at frequencies of 78 Hz had the shape of a hole. At a scanning frequency of 230 Hz in the center of the track, the zone depth was 0.22–0.25 mm, and at the edges, in the beam stopping zones, it increased to 0.5–0.6 mm with a zone width of 10.457 mm. Fig. 1 shows microsections of laser hardening zones with a defocused (a) and an oscillating beam with a frequency of 230 Hz (b) at a speed of 3 mm/s and a defocusing of 40 mm. Satisfactory results were obtained during laser hardening with beam oscillations at a frequency of 114 Hz in all modes, and they are wider in width than the zones obtained when processing at a frequency of 78 Hz. The second batch of samples was processed at a beam oscillation frequency of 214 Hz, which led to the formation of a hardened layer with a maximum depth in the center of the hardened zone, and the creation of a melting zone in the center of the hardened track (Fig. 1c). The obtained regimes with surface melting will be used both for hardening and for alloying steels using transverse beam vibrations. To determine the effect of processing modes on the depth and width of the laser exposure zones, surfaces were constructed using regression equations (Fig. 2).

The depth of the hardening zone at laser spot diameters of 5 and 6.5 mm increases with increasing beam oscillation frequency. The width of the hardening zones decreases markedly with an increase in the beam oscillation frequency at a beam diameter of 5 mm, and less significantly at a beam diameter of 6.5 mm. To assess the influence of the scanning frequency on the parameters of the melting zones, the surfaces were constructed based on the results of calculations of the regression equations (Fig. 3)

The depth of the melting zones was 0.4–0.6 mm with a width of 3.6–4.7 mm when treated with a 5 mm laser spot, significantly exceeding the parameters of the melting zones with a defocused beam. Heating by a beam with a diameter of 6.5 mm at low speeds provided a penetration depth of 0.55–0.62 mm, however, at high speeds and an oscillation frequency of 116 Hz, it did not exceed 0.3 mm, and the width of the melting zone was more stable and amounted to 4.2–4.8 mm. With an increase in the beam scanning frequency, the depth of the melting zones increased.



**Рис. 4.** Изменение микротвердости по глубине зон упрочнения в зависимости от частоты сканирования луча и скорости его перемещения 3 мм/с (1) и 5 мм/с (2): а)  $f=116$  Гц; б)  $f=230$  Гц

**Fig. 4.** Change in microhardness with respect to the depth of hardening zones depending on the frequency of beam scanning and the speed of its movement 3 mm/s (1) and 5 mm/s (2): а)  $f=116$  Hz; б)  $f=230$  Hz

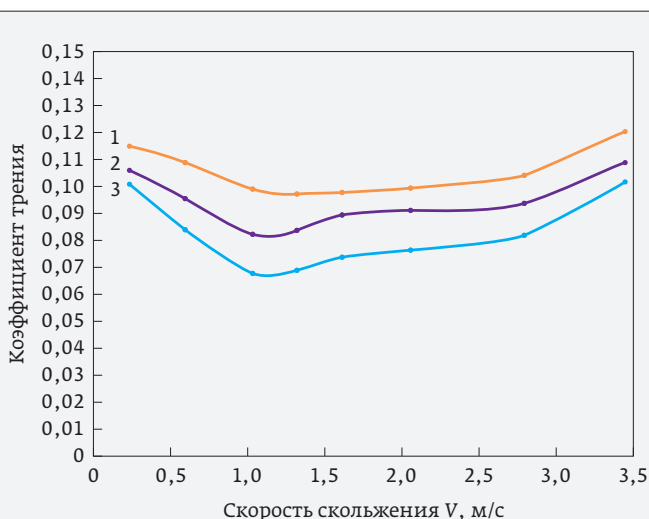
частоты сканирования луча глубина зон оплавления увеличивалась.

Микротвердость упрочненных зон изменялась в широких пределах 6230–8620 МПа. На рис. 4 представлены закономерности изменения микротвердости от глубины слоя при частоте сканирования 116 (а) и 230 Гц (b), скорости перемещения 3 и 5 мм/с и дефокусировке луча 60 мм.

Наиболее подходящие режимы для лазерного упрочнения поверхностей деталей машин получены при скорости обработки 5 и 3 мм/с, частотой поперечных колебаний луча 116 Гц и мощностью излучения 1 кВт с шириной зон термического воздействия 8,9–9,9 мм и глубиной 0,77–1,2 мм соответственно. При этом глубина зон закалки оставалась практически постоянной по ширине лазерной дорожки. Значения микротвердости, 6570–8200 МПа, свидетельствуют о возможности применения технологии как для легко нагруженных, при глубине слоя менее 1 мм, так и высоко нагруженных зубчатых передач, с глубиной закаленного слоя более 1 мм. Однако нужно учитывать, что обработка зуба должна выполняться за один проход без наложения дорожек закалки.

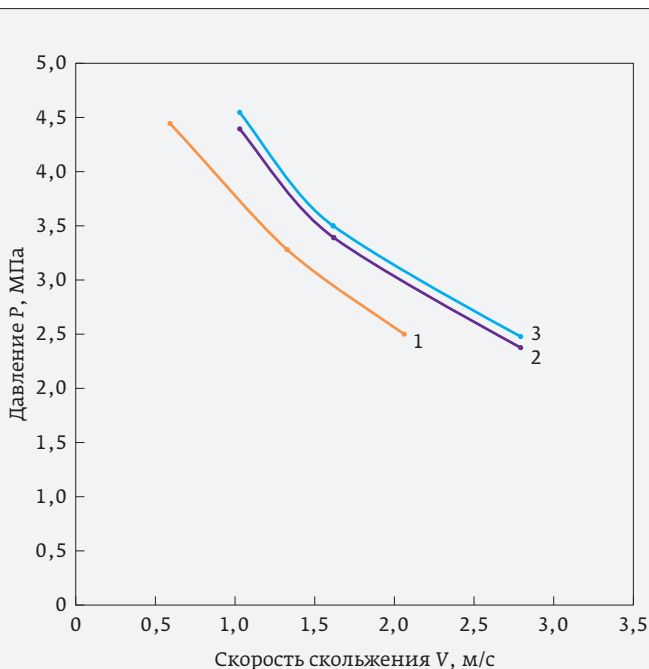
Испытания на трение и износ проводили на образцах, упрочненных при частоте колебаний луча 214 Гц, с перекрытием лазерных дорожек 10%. На рис. 5. представлены зависимости изменения коэффициентов трения от скорости скольжения.

При увеличении скорости скольжения до 1 м/с, коэффициенты трения снижаются. Дальнейшее повышение скорости скольжения до 3 м/с приводило к незначительному их повышению, а затем – к резкому росту. Коэффициенты трения 0,065–0,08, получены на образцах, обработанных лазерным лучом, при частоте поперечных колебаний луча 214 Гц и скорости его перемещения 5 мм/с при скорости скольжения контробразца 0,5–2 м/с значительно ниже, чем образцов стали 40X. Важнейшей характеристикой сопряженных деталей машин является предельно допустимая нагрузка, при которой наступает резкое повышение коэффициента трения и, как следствие, заедание или заклинивание механизма в целом. На рис. 6. представлены кривые изменения давления заедания от скорости скольжения контробразца. Все значения давлений и скоростей скольжения, находящиеся выше этих кривых, являются недопустимыми для исследуемых образцов. Из представленных графиков следует, что скорость скольжения до наступления заеда-



**Рис. 5.** Изменение коэффициентов трения от скорости скольжения: 1 – сталь 40X (265–300 HV), 2 – ЛУ, V=3 мм/с, 3 – ЛУ, V=5 мм/с

**Fig. 5.** Change of friction coefficients from sliding speed: 1 – steel 40Kh (265–300 HV), 2 – LH, V=3 mm/s, 3 – LH, V=5 mm/s



**Рис. 6.** Зависимость давления заедания от скорости скольжения контробразца: 1 – сталь 40X(265–300 HV), 2 – ЛУ, V=3 мм/с, 3 – ЛУ, V=5 мм/с

**Fig. 6.** Dependence of the jamming pressure on the sliding speed of the counter sample: 1 – steel 40Kh (265–300 HV), 2 – LH, V=3 mm/s, 3 – LH, V=5 mm/s



ния образцов, обработанных при частоте колебаний луча 214 Гц и скорости его перемещения 5 мм/с, практически в два раза выше во всем исследованном диапазоне.

Интенсивность изнашивания образцов упроченных лазерным лучом при частоте поперечных колебаний 214 Гц в сравнении со сталью 40Х представлена в таблице. Из приведенных данных следует, что интенсивность изнашивания образцов, обработанных на оптимальных режимах, более чем в 4 раза ниже, чем исходной стали 40Х.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основное внимание в работе уделено влиянию частоты поперечных колебаний луча на ширину и глубину зон упрочнения в зависимости от скорости перемещения луча и его дефокусировки. С повышением резонансной частоты торсиона, на котором крепится отражающее фокусирующее зеркало, растет амплитуда колебаний луча, а вместе с ней и ширина зоны упрочнения. Резонансную частоту 230 Гц можно считать критической, поскольку зона закалки в центре дорожки становится меньше, чем по ее краям. Выход в частоту

The microhardness of the hardened zones varied over a wide range of 6230–8620 MPa. Fig. 4 shows the patterns of changes in microhardness depending on the layer depth at a scanning frequency of (a) 116 and (b) 230 Hz, a displacement speed of 3 and 5 mm/s, and a beam defocusing of 60 mm.

The most suitable modes for laser hardening of the surfaces of machine parts were obtained at a processing speed of 5 and 3 mm/s, a frequency of transverse beam oscillations of 116 Hz and a radiation power of 1 kW with a width of thermal impact zones of 8.9–9.9 mm and a depth of 0.77–1.2 mm, respectively. In this case, the depth of the hardening zones remained almost constant along the width of the laser track. The microhardness values, 6570–8200 MPa, indicate the possibility of using the technology for both lightly loaded, with a layer depth of less than 1 mm, and highly loaded gears, with a hardened layer depth of more than 1 mm. However, it must be taken into account that the processing of the tooth must be carried out in one pass, without the imposition of hardening paths.

Friction and wear tests were carried out on specimens hardened at a beam oscillation frequency of



ПЕТЕРБУРГСКАЯ  
ТЕХНИЧЕСКАЯ  
ЯРМАРКА

В РАМКАХ ВЫСТАВКИ ПРОЙДЕТ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОНГРЕСС

26–28 АПРЕЛЯ  
2022

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»  
Петербургское шоссе, 64

ВЕДУЩЕЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ МЕРОПРИЯТИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДА

+7 965 772 7759 | a.ilina@restec.ru | ptfair.ru





колебаний 214 Гц позволил получить зоны термического воздействия по ширине несколько меньшие, чем при частоте 116 Гц. Однако полученные результаты обработки на этой частоте позволяют использовать их как при лазерной закалке, так и при легировании поверхностей с большей глубиной. На всех исследованных режимах получены достаточно высокие значения микротвердости. Результаты работы показывают возможности расширения режимов лазерной обработки на различных резонансных частотах торсиона, что не было описано ранее для сканирующих устройств данного типа.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны режимы обработки поверхности образцов стали 40X с изменяемой частотой поперечных колебаний луча, скоростью обработки и его дефокусировки, позволяющие снизить количество зон отпуска при обработке больших площадей с наложением дорожек.

Коэффициенты трения закаленных лазером образцов значительно ниже исходной стали, а износостойкость выше материала основы более, чем в 4 раза. Лазерное упрочнение позволяет повысить предельные скорости скольжения до наступления заедания в 2 раза.

214 Hz with 10% overlap of laser paths. Fig. 5 shows the dependences of the change in friction coefficients on the sliding speed.

As the sliding speed increases to 1 m/s, the friction coefficients decrease. A further increase in the sliding speed to 3 m/s led to their slight increase, and then to a sharp increase. Friction coefficients of 0.065-0.08 were obtained on samples treated with a laser beam, at a frequency of transverse oscillations of the beam of 214 Hz, and a speed of its movement of 5 mm/s at a counter sample sliding speed of 0.5 - 2 m/s, significantly lower than steel samples 40Kh. The most important characteristic of the mating machine parts is the maximum allowable load, at which there is a sharp increase in the coefficient of friction, and as a result, jamming or jamming of the mechanism as a whole. Fig. 6 shows the curves of change of pressure of seizing from speed of sliding of a counter sample. All values of pressure and sliding speeds above these covered values are unacceptable for the samples under study. From the presented graphs it follows that the sliding speed before the onset of jamming of the samples processed at a beam oscillation frequency of 214 Hz and a beam movement speed of 5 mm/s is almost twice as high in the entire studied range.

Интенсивность изнашивания образцов и контробразцов из стали 40X

Wear intensity of samples and counter samples made of steel 40Kh

Вид обработки стали 40X Type of steel processing 40Kh	Интенсивность изнашивания образца $I_1$ и контробразца $I_2$ Wear intensity sample $I_1$ and counter sample $I_2$		Интенсивность изнашивания образца $I_{cp.1}$ и контробразца $I_{cp.2}$ Wear intensity sample $I_{av.1}$ and counter sample $I_{av.2}$	
	$I_1 \cdot 10^{-9}$	$I_2 \cdot 10^{-9}$	$I_{cp.1} \cdot 10^{-9}$	$I_{cp.2} \cdot 10^{-9}$
Закалка, отпуск 265–300 Hardening, drawing 265–300	1,296	0,689	1,275	0,671
	1,272	0,672		
	1,258	0,654		
ЛУ, 3 мм/с ЛН, 3 мм/с	0,343	0,712	0,334	0,724
	0,326	0,725		
	0,335	0,737		
ЛУ, 5 мм/с ЛН, 5 мм/с	0,327	0,757	0,315	0,753
	0,304	0,739		
	0,315	0,764		



# TechnoPark Ural

## 19–21.04.2022

Екатеринбург  
МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»

## Выставка оборудования и технологий для комплексного оснащения промышленных предприятий

### Основные разделы



Испытательное  
и измерительное  
оборудование,  
неразрушающий контроль,  
техническая диагностика



Промышленное  
инженерное  
оборудование



Оборудование  
и материалы для  
обработки поверхностей  
и нанесения покрытий



Оборудование  
для водоснабжения,  
водоподготовки и очистки  
сточных вод. Системы  
очистки воздуха



Оборудование  
и материалы  
для производства  
электроники

[technopark-ural.com](http://technopark-ural.com)

Получите билет,  
указав промокод:  
**tehnosfera22**



Организатор



Международная  
Выставочная  
Компания

+ 7 (495) 252-11-07  
[technopark-ural@mvk.ru](mailto:technopark-ural@mvk.ru)





## REFERENCES

1. Skvarenina S., Shin Y. Predictive modeling and experimental results for laser hardening of AISI 1536 steel with complex geometric features by a high power diode laser. *Surf. Coat. Technol.* 2006; 201 (6); 2256–2269. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.03.039.
2. Yáñez A., Álvarez J., López A., Nicolás G., Pérez J., Ramil A. et al. Modelling of temperature evolution on metals during laser hardening process. *Appl. Surf. Sci.* 2002; 186(1–4); 611–616. DOI: 10.1016/S0169-4332(01)00696-1.
3. Inoue K., Ohmura E., Haruta K. Computer simulation on structural changes of hypoeutectoid steel in laser transformation hardening process. *JSM E Int. J. Ser.* 1989; 132 (1); 45–53. DOI: 10.1299/jsmeal1988.32.1\_45.
4. Grum J., Šturm R. Laser surfacemelt-hardening of gray and nodular irons. *Appl. Surf. Sci.* 1997; 109–110; 128–132. DOI: 10.1016/S0169-4332(96)00648-4.
5. Komanduri R., Hou Z. Thermal analysis of laser surface transformation hardening optimization of process parameters. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2004; 44(9); 991–1008. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2004.01.011.
6. Martínez S., Lamikiz A., Taberero I., Ukar E. Laser hardening process with 2D scanning optics. *Phys. Procedia.* 2012; 39; 309–317. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.043.
7. Denis S., Archambault P., Aubry C., Mey A., Louin J., Simon A. Modelling of phase transformation kinetics in steels and coupling with heat treatment residual stress predictions. *J. Phys.* 1999; IV 9; 323–332. DOI: 10.1051/jp4:1999933
8. Lakhkar R., Shin Y., Krane M. Predictive modeling of multi-track laser hardening of AISI 4140 steel. *Mater. Sci. Eng.* 2008; 480 (1–2); 209–217. DOI: 10.1016/j.msea.2007.07.054
9. Miokovic' T., Schulze V., Vöhringer O., Löhe D. Prediction of phase transformations during laser surface hardening of AISI 4140 including the effects of inhomogeneous austenite formation. *Mater. Sci. Eng.* 2006; 435–436; 547–555. DOI: 10.1016/j.msea.2006.07.037.
10. Ashby M., Easterling K. The transformation hardening of steel surfaces by laser beams – I. hypo-eutectoid steels. *Acta Metall.* 1984; 32 (11); 1935–1937; 1939–1948. DOI: 10.1016/0001-6160(84)90175-5.
11. Yaakoubi M., Kchaou M., Dammak F. Simulation of the thermomechanical and metallurgical behavior of steels by using ABAQUS software. *Comput. Mater. Sci.* 2013; 68; 297–306. DOI: 10.1016/j.commatsci.2012.10.001.
12. Denis S., Farias D., Simon A. Mathematical model coupling phase transformations and temperature evolutions in steels. *ISIJ Int.* 1992; 32 (3); 316–325. DOI: 10.2355/isjinternational.32.316.
13. Jacot A., Rappaz M. A combined model for the description of austenitization, homogenization and grain growth in hypoeutectoid Fe–C steels during heating. *Acta Mater.* 1999; 47 (5); 1645–1651. DOI: 10.1016/S1359-6454(99)00005-1.
14. Reti T., Fried Z., Felde I. Computer simulation of steel quenching process using a multi-phase transformation model. *Comput. Mater. Sci.* 2001; 22 (3–4); 261–278. DOI: 10.1016/S0927-0256(01)00240-3.
15. Yang Y. S., Na S. J. A study on residual stresses in laser surface hardening of a medium carbon steel. *Surf. Coat. Technol.* 1989; 38 (3); 311–324. DOI: 10.1016/0257-8972(89)90093-5.
16. Bailey N., Tan W., Shin Y. Predictive modeling and experimental results for residual stresses in laser hardening of AISI 4140 steel by a high power diode laser. *Surf. Coat. Technol.* 2009; 203 (14); 2003–2012. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.01.039.
17. Zhan H. X., Wang Y., Li C. W., Han T., Han B., Zhao W. M. Computational and experimental study of a melt-hardened zone on a roller modified by wide-band laser treatment. *Opt. Laser Technol.* 2009; 41 (3); 251–257. DOI: 10.1016/j.optlastec.2008.06.011.
18. Roy A., Manna I. Laser surface engineering to improve wear resistance of austempered ductile iron. *Mater. Sci. Eng. A.* 2001; 297 (1–2); 85–93. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)01253-3.
19. Soriano C., Leunda J., Lambarri J., Navas V., Sanz C. Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades. *Appl. Surf. Sci.* 2011; 257 (16); 7101–7106. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.03.059.
20. Cerny I., Fürbacher I., Linhart V. Influence of laser hardening and resulting microstructure on fatigue properties of carbon steels. *J. Mater. Eng. Perform.* 1998; 7 (3); 361–366. DOI: 10.1361/105994998770347800.
21. Biryukov V. P., Dozorov A. V. Laser systems for hardening and surfacing of parts and for precise sheet layout. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability.* 2006; 35 (1); 46–52.

## АВТОР

Бирюков Владимир Павлович, к. т. н., в. н. с., Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, laser-52@yandex.ru, Москва, Россия  
ORCID: 0000-0001-9278-6925

The wear intensity of samples hardened by a laser beam at a frequency of transverse vibrations of 214 Hz in comparison with 40Kh steel is presented in the table. It follows from the given data that the wear intensity of samples processed under optimal conditions is more than 4 times lower than that of the original 40Kh steel.

## DISCUSSION OF THE RESULTS

The main attention in the work is paid to the influence of the frequency of transverse oscillations of the beam on the width and depth of the hardening zones, depending on the speed of the beam and its defocusing. With an increase in the resonant frequency of the torsion, on which the reflecting focusing mirror is mounted, the amplitude of the beam oscillations increases, and with it the width of the hardening zone. The resonant frequency of 230 Hz can be considered critical, since the hardening zone in the center of the track becomes smaller than at its edges. The output of the oscillation frequency 214 Hz made it possible to obtain the heat-affected zones somewhat smaller in width than at a frequency of 116 Hz. However, the results of processing at this frequency make it possible to use them both for laser hardening and for alloying surfaces with a greater depth. Sufficiently high values of microhardness were obtained in all investigated regimes. The results of the work show the possibility of expanding the laser processing modes at different resonant frequencies of the torsion bar, which was not previously described for scanning devices of this type.

## CONCLUSION

The modes of processing the surface of samples of steel 40Kh with a variable frequency of transverse oscillations of the beam, the speed of processing and its defocusing have been developed, which make it possible to reduce the number of tempering zones when processing large areas with overlapping tracks.

The coefficients of friction of the laser-hardened samples are significantly lower than the original steel, and the wear resistance is more than 4 times higher than the base material. Laser hardening makes it possible to increase the limiting sliding speeds by a factor of 2 before the onset of seizing.

## AUTHOR

Biryukov Vladimir Pavlovich, Candidate of Technical Sciences, lead researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the RAS (IMASH RAN), Moscow, Russia, laser-52@yandex.ru.  
ORCID: 0000-0001-9278-6925



16-я Международная выставка  
вакуумного и криогенного оборудования

12–14 апреля 2022

Москва ,ВДНХ, Павильон 57



Представьте  
свою продукцию  
потенциальным  
заказчикам



Вакуумное  
оборудование

Криогенное  
оборудование

Оборудование  
для нанесения  
функциональных  
покрытий

Забронируйте стенд  
[vacuumtechexpo.com](http://vacuumtechexpo.com)

Организатор



Международная  
Выставочная  
Компания

+ 7 (495) 252 11 07  
[vacuumtechexpo@mvk.ru](mailto:vacuumtechexpo@mvk.ru)

При поддержке

