

Оценка свойств образцов из стали 65Г после лазерного и традиционных методов упрочнения применительно к эксплуатации сельскохозяйственных и лесотехнических машин

В. П. Бирюков¹, В. И. Криворотов², Б. Е. Луканин²

¹ Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

² ООО НТО «ИРЭ-Полюс», г. Фрязино, Московской области.

В статье проведен анализ структурного, напряженного состояния и триботехнические испытания образцов из стали 65Г после лазерного и традиционных методов упрочнения для возможного продления сроков эксплуатации деталей машин и механизмов лесной и сельскохозяйственной техники. Установлено, что абразивная износостойкость повысилась в 2,5 и 1,7 раза по сравнению со сталью 65Г в исходном состоянии и после объемной закалки соответственно. По результатам экспериментальной оценки уровня термических остаточных напряжений после объемной печной закалки и лазерного упрочнения образцов из стали 65Г выполнен расчет прогнозируемого ресурса последующей эксплуатации деталей почвообрабатывающих механизмов и машин.

Ключевые слова: лазерное упрочнение, микротвердость, объемная закалка, напряженное состояние, прогнозирование ресурса эксплуатации.

Статья получена: 11.09.2024

Статья принята: 12.10.2024

Evaluation of the Properties of 65G Steel Samples after the Laser and Conventional Hardening Methods in Relation to the Operation of Agricultural and Forestry Machines

V. P. Biryukov¹, V. I. Krivorotov², B. E. Lukanin²

¹ Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russia

² LLC NTO "IRE-Polyus", Fryazino, Moscow region, Russia

The article analyzes the structural, stress condition and triboengineering tests of 65G steel samples after the laser and conventional hardening methods for possible extension of the service life of parts and mechanisms for the forestry and agricultural machinery. It is established that the abrasive wear resistance is increased by 2.5 and 1.7 times compared to 65G steel in the initial condition and after bulk hardening, respectively. Based on the experimental assessment results of the thermal residual stress level after the bulk furnace hardening and laser hardening of the 65G steel samples, a calculation has been made for the predicted subsequent service life of the parts of tilling mechanisms and machines.

Key words: laser hardening, microhardness, bulk hardening, stress condition, forecasting of service life.

Article received: 11.09.2024

Article accepted: 12.10.2024

INTRODUCTION

At present, not a single strategically significant technological direction can do without the application of



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ни одно из стратегически важных технологических направлений не обходится без использования лазеров. Лазерные технологии активно применяются в машиностроении, электронной, атомной, космической, авиационной и судостроительной промышленности, медицине, а также в оборонном промышленном комплексе. Еще в 80-90 годы двадцатого столетия были проведены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по определению приоритетных областей применения лазерных технологий в машиностроении, в том числе и сельскохозяйственном.

Обработка почвы до сих пор является одной из самых ресурсоемких статей расходов среди предприятий сельскохозяйственной и лесотехнической отраслей экономики. Как правило, для обработки сложных почв или опашки леса предприятия этих отраслей применяют плуги специального назначения, режущие детали которых (лемеха) во время эксплуатации, подвергаются активному абразивному. Поэтому проведение исследований, направленных на поиск путей увеличения срока службы лемехов является весьма актуальной задачей. Поскольку снижение износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин, а также отдельных его деталей, приводит к простоям, приводящим к снижению эффективности деятельности предприятий и отрасли в целом [1].

Известно, что одним из эффективных способов повышения срока службы деталей почвообрабатывающих машин является лазерное поверхностное упрочнение. Лазерное поверхностное упрочнение это процесс модификации поверхности, при котором нагрев лазерным лучом позволяет повысить износостойкость поверхности за счет фазового мартенситного превращения без использования какой-либо закалочной среды [2]. Согласно проведенным исследованиям [3-5], более высокая твердость поверхности стали после лазерного упрочнения без расплавления (закалки) обычно приводит к более высокой износостойкости и коррозионной стойкости, а также к увеличению усталостного ресурса работы деталей машин.

Для экспериментов [6] были использованы два типа сталей - AISI 52100 (0,98% C) и 50CrMo4 (0,51% C). Лазерная обработка была проведена с использованием волоконного лазера IPG Photonics YLR-150/1500-QCW с длиной волны 1,07 мкм. Максимальная мощность лазера в непрерывном режиме составляла 250 Вт. Лазерный луч

lasers. The laser technologies are actively and widely used in mechanical engineering, electronic, nuclear, space, aviation and shipbuilding industries, medicine, as well as in the defense industrial complex. Back in the 80-90s of the twentieth century, the research and development works were performed to determine priority application areas of the laser technologies in mechanical engineering, including agricultural field.

Tillage is still one of the most resource-intensive expenditure items among the enterprises in the agricultural and forestry economic sectors. As a rule, for the cultivation of complex soils or forest plowing, the enterprises in these sectors use the special-purpose ploughs, the cutting parts of which (namely the ploughshares) are exposed to the active abrasive impact during operation. Therefore, the researches aimed at searching the ways to increase the service life of ploughshares is a rather urgent task. Since the decreased wear resistance of the operating parts of tilling machines, as well as their individual parts, leads to the downtime, this fact results in the decreased efficiency of enterprises and the entire industry [1].

It is well-known that one of the effective ways to increase the service life of the tilling machine parts is the laser surface hardening process. The laser surface hardening is the surface modification process during which the laser radiation heating allows to increase wear resistance of the surface due to the martensitic transformations without application of any hardening medium [2]. According to the studies performed [3-5], a higher steel surface hardness after laser hardening without any melting (quenching) usually leads to the higher wear resistance and corrosion resistance, as well as to an increase in the fatigue life of the machinery parts.

For the experiments [6], two types of steel were used: AISI 52100 (0.98% C) and 50CrMo4 (0.51% C). The laser machining was performed using an IPG Photonics YLR-150/1500-QCW fiber laser with a wavelength of 1.07 μm. The maximum laser power in a continuous mode was 250 W. The laser beam was directed onto the operating surface by beam focusing through the lens with a focal distance of 300 mm, and a spot with a diameter of 0.5 mm was generated on the surface. In all experiments, the defocusing distance was 10 mm. The beam spot was scanned along the surface in one line with the length of 10 mm on the sample surface by a galvanometric scanner with various laser machining parameters. Laser hardening of the samples was performed under a water layer with the thickness of 1-5 mm and in an argon environment. With a small water layer thickness of ≤ 1 mm,

был направлен на рабочую поверхность путем фокусировки луча через объектив с фокусным расстоянием 300 мм, и на поверхности образовалось пятно диаметром 0,5 мм. Во всех экспериментах расстояние расфокусировки составляло 10 мм. Пятно луча сканировали вдоль поверхности, производя сканирование одной линией длиной 10 мм на поверхности образца с помощью гальванометрического сканера при различных параметрах лазерной обработки. Лазерное упрочнение образцов было проведено под слоем воды 1-5 мм и в среде аргона. При небольшой толщине слоя воды ≤ 1 мм регистрировали более высокую твердость поверхности, чем при защите аргоном. Максимальная твердость поверхности, как для обеих сталей составляла 900 HV. Установлено, что глубина и ширина зон закалки в условиях погружения в воду значительно меньше, чем образцов обработанных при защите аргоном. На поверхности образцов стали AISI 52100 образуются трещины при закалке под водой из-за более высокого содержания углерода, а у образцов стали 50CrMo4 трещин не обнаружено.

Эксперименты по лазерной закалке [7] были проведены на образцах мартенситной нержавеющей стали AISI 410 и AISI 420 с использованием диодного лазера с максимальной мощностью 1600 Вт. Результаты металлографических исследований показали, что при одинаковых режимах обработки сталь AISI 420 имела более высокую твердость поверхности и меньшую глубину и ширину проплавления, чем сталь AISI 410. Наблюдения показали, что поверхности упрочненный лазером слой для стали AISI 410 составлял 620 HV при глубине 1,8 мм, а для стали AISI 410-720 HV при глубине 1,2 мм. Сравнение результатов с термообработкой при закалке в печи показали, что процесс лазерной закалки более эффективен, чем традиционный процесс.

Влияние твердости [8] поверхности на износостойкость и характер износа при фреттинге было изучено на образцах стали AISI P20. Для термообработки использовался мощный диодный лазер мощностью 4 кВт с прямоугольным лазерным лучом. В образцах, подвергнутых термообработке лазером, было обнаружено изменение микроструктуры и увеличение твердости по сравнению с исходной закаленной сталью. В результате у образцов, подвергнутых лазерной термообработке, наблюдался относительно более низкий коэффициент трения и меньшие потери на износ по сравнению с основным металлом. Были проведены различные испытания для изу-

a higher surface hardness was recorded than in the argon protection conditions. The maximum surface hardness for both steels was 900 HV. It was found that the depth and width of the hardened zones under the water immersion conditions were significantly less than those of the samples treated with the argon protection. The cracks were generated on the surface of AISI 52100 steel samples when quenched under the water due to the higher carbon content, while no cracks were found in 50CrMo4 steel samples.

The laser hardening experiments [7] were conducted with the AISI 410 and AISI 420 martensitic stainless steel samples using a diode laser with a maximum power of 1600 W. The results of metallographic tests showed that under the same processing conditions, AISI 420 steel had a higher surface hardness and a smaller penetration depth and width than AISI 410 steel. The observations showed that the laser-hardened surface layer for AISI 410 steel was 620 HV at a depth of 1.8 mm, and for AISI 410 steel - 720 HV at a depth of 1.2 mm. Comparison of the results with the heat treatment procedure during the furnace hardening showed that the laser hardening process was more efficient than the conventional process.

The surface hardness [8] effect on the wear resistance and wear pattern during fretting was studied using the AISI P20 steel samples. A high-power 4 kW rectangular laser beam diode laser was used for the heat treatment. The samples heat treated by the laser were determined to have some changes in their microstructure and an increased hardness compared to the original hardened steel. As a result, the laser heat treated samples demonstrated a relatively lower friction coefficient and less wear loss compared to the base metal. Various tests were performed to study the effect of fretting conditions on the wear pattern by changing the normal loads and oscillation frequencies of the counter sample. The higher normal loads resulted in the greater wear, while the higher frequencies lead to less wear for both the base metal and the laser heat treated samples.

A ferritic-martensitic steel plate [9] with the thickness of 2 mm was subjected to the diode laser surface treatment to determine its microstructure, hardness and wear resistance. Two clearly delineated modification areas were determined in the steel sample: the first melting zone, consisting of both martensitic plates and bulk δ -ferrite, and the second heat-affected zone, consisting mainly of martensitic plates, with the relevant hardness values of 385 ± 17 HV and 442 ± 44 HV that was significantly higher than that of the substrate (267 ± 3 HV). The wear rate measurements showed that the wear resistance of the ferritic-



чения влияния условий фреттинга на характер износа путем изменения нормальных нагрузок и частот колебаний контробразца. Большие нормальные нагрузки приводили к большему износу, в то время как более высокие частоты приводили к меньшему износу как основного металла, так и образцов, подвергнутых термической обработке лазером.

Ферритно-мартенситный лист [9] стали толщиной 2 мм подвергали лазерной обработке поверхности диодным лазером, с целью определения микроструктуры, твердости и износостойкости. В образце стали определены две четко выраженные зоны модификации: первая зона расплавления, состоящая, как из мартенситных пластин, так и из объемного б-феррита, и вторая зона термического воздействия, состоявшая в основном из мартенситных пластин, с соответствующими значениями твердости 385 ± 17 HV и 442 ± 44 HV, что заметно выше, чем у подложки 267 ± 3 HV. Измерения скорости износа показали, что износостойкость образцов ферритно-мартенситной стали улучшена более чем на 50%. По морфологии поверхностей трения установлено, что основными механизмами износа был абразивный, адгезионный и окислительный износ поверхностей, как исходных образцов, так и образцов после лазерной закалки. Улучшенные свойства поверхности хорошо коррелировали с микроструктурными характеристиками лазерных дорожек.

Инструментальная сталь X30CrMoN15 [10] с высоким содержанием азота (0,3% N) применяется, например, для изготовления подшипников и зубчатых колес в авиационной и космической технике. Преимуществом этой стали по сравнению с обычными инструментальными сталью, не содержащими азота, является превосходная коррозионная стойкость, которая может быть обусловлена растворением Cr, Mo и N в твердом растворе. Чтобы получить достаточную для применения прочность, образцы отпускали при температуре выше 600°C , в результате чего формировались карбиды и нитриды, которые связывали Cr и N. С помощью лазерного упрочнения растворяли нитриды, что приводило к улучшению свойств при усталостном износе и коррозии. Это достигалось за счет образования нового мартенсита, который вызывал получение остаточных напряжений сжатия, и повышал износостойкость при трении скольжения. Триботехнические исследования были выполнены с использованием схемы трения: «шифт (сталь 52100 с обычной закалкой) – диск (образец с лазерной закалкой)».

martensitic steel samples was improved by more than 50%. Based on the morphology of the frictional surfaces, it was established that the main wear mechanisms included the abrasive, adhesive and oxidative surface wear of both the original samples and the laser-hardened samples. The improved surface properties correlated rather well with the microstructural specifications of the laser runs.

The tool steel X30CrMoN15 [10] with a high nitrogen content (0.3% N) is used, for example, for the production of bearings and gears in the aviation and space technology. The advantage of this steel compared to the conventional tool steels that do not contain any nitrogen is its excellent corrosion resistance that can be due to the dissolution of Cr, Mo and N in a solid solution. To obtain the sufficient strength for use, the samples were tempered at a temperature above 600°C , resulting in the generation of carbides and nitrides that linked Cr and N. The laser hardening process was applied to dissolve nitrides that led to the improved properties in the case of fatigue wear and corrosion. This condition was achieved by the generation of new martensite that caused the formation of residual compressive stresses and increased wear resistance under the sliding friction conditions. The triboengineering tests were performed using a friction scheme: “a pin (52100 steel with conventional hardening) – a disk (a sample with laser hardening)”. It was determined that the wear resistance of steel with a high nitrogen content was higher than that of similar conventional tool steels, and that the laser treatment led to its further improvement.

The material of samples [11] was AF63CrMnMo6 forged steel in the form of a rod with a diameter of 40 mm after a conventional industrial heat treatment, including oil hardening and tempering to the hardness of $300 \text{ HV} \pm 10$. Four single laser runs were made on each specimen so that they did not overlap. A Nd:YAG laser with an output power of up to 4.4 kW was applied for the treatment. The experiments were performed using an optical fiber with a diameter of 0.4 mm for beam transmission, and the focusing optics were built into the laser head. The focal distance of the lens applied was 200 mm. The laser head was mounted on an ABB IRB 6600175/2.8 robotic arm, and the samples were placed in an ABB IRBPL 250 positioner for laser surface processing. The triboengineering tests were performed using the roller-to-roller scheme under the loads of 150 and 300 N, relevant to a Hertz pressure of 300 MPa. For the roller samples made of C40 steel and the laser-hardened rollers made of AF63CrMnMo6 steel, the rotation rates were set at 200 min^{-1} and 180 min^{-1} , respectively that ensured

Установлено, что износостойкость стали с высоким содержанием азота выше, чем у аналогичных обычных инструментальных сталей, и что лазерная обработка приводила к дальнейшему ее улучшению.

Материалом образцов [11] была кованая сталь AF63CrMnMo6 в виде прутка диаметром 40 мм после обычной промышленной термообработки, включающей закалку в масле и отпуск до твердости 300 HV \pm 10. На каждом образце были выполнены четыре одиночные лазерные дорожки, так чтобы они не перекрывались. Для обработки использовался Nd:YAG лазер с выходной мощностью до 4,4 кВт. Эксперименты были проведены с использованием оптического волокна диаметром 0,4 мм для передачи луча, а фокусирующая оптика была встроена в лазерную головку. Фокусное расстояние используемой линзы составляло 200 мм. Лазерная головка была установлена на руке робота ABB IRB 6600175/2,8, и образцы помещали в позиционер ABB IRBPL 250 для лазерной обработки поверхности. Триботехнические испытания были выполнены по схеме: «ролик-ролик» при нагрузках 150 и 300 Н, что соответствовало давлению Герца 300 МПа. Для образцов роликов из стали С40, и закаленных лазером роликов из стали AF63CrMnMo6, были установлены частоты вращения 200 мин $^{-1}$ и 180 мин $^{-1}$ соответственно, что обеспечивало их проскальзывание на 28%. Продолжительность испытаний составляла 135 мин. Испытания проводились при нормальной температуре (без дополнительного нагрева аналога С40) и при высокой температуре (с индукционным нагревом ролика из стали С40 до 700 °C). Износостойкость роликов, закаленных лазером до твердости 600–800 HV, была примерно на порядок выше, чем у базовой стали при нормальных условиях. При высокой температуре износостойкость образцов, обработанных лазером, была не хуже, чем у базовой стали из-за способности различных микроструктур образовывать оксидные слои, защищающие от износа.

Образцы низкоуглеродистой стали (0,25%) в виде пластин [12] были изготовлены для определения оптимальных режимов цементации и последующей термической и лазерной обработки. Кроме того, триботехнические и энергетические параметры деталей, упрочненных лазером, были определены на образцах из высокоуглеродистых сталей (с содержанием углерода до 0,7%) в предположении, что эффективность лазерной обработки должна возрастать с увеличением содержания углерода независимо от режима науглероживания. Для определения триботехни-

their slippage by 28%. The test duration was 135 minutes. The tests were conducted at the normal temperature (without additional heating of the С40 analogue) and at the high temperature (with the induction heating of the С40 steel roller up to 700 °C). The wear resistance of the laser-hardened rollers with a hardness of 600–800 HV was approximately a sequence higher than that of the base steel under normal conditions. At the high temperatures, the wear resistance of laser-treated samples was no worse than that of the base steel due to the ability of various microstructures to generate oxide layers that protect against wear.

The low-carbon steel samples (0.25%) in the form of plates [12] were prepared to determine the optimal carburization modes and subsequent heat and laser treatment. In addition, the triboengineering and energy parameters of the laser-hardened parts were determined using the samples made of high-carbon steels (with a carbon content of up to 0.7%) on the assumption that the laser treatment efficiency should be increased with the increasing carbon content regardless of the carburization mode. To determine the triboengineering properties, the tests were performed using an industrial friction test machine and an original machine under the impact and hydroabrasive wear conditions, as well as when simulating the interaction of samples with the soil. The maximum hardness value of 9070 MPa (64 HRC) was obtained for the first batch samples at the minimum treatment speed and an initial hardness of 120 HB. The triboengineering properties of the high-carbon steels 70 and 65G, used to produce the working elements of tilling machines, after laser treatment did not depend on the previous heat treatment. The laser treatment increased their wear resistance by 1.7–1.9 times. The laser hardening performed after carburization and quenching, ensured the higher triboengineering properties of the working element parts of the tilling machines.

EQUIPMENT AND RESEARCH METHODS

In our experiments, we used the samples of carbon hypoeutectoid steel 65G (average carbon content of 0.65%), made from the sheet metal with a thickness of 4 mm.

30 plates with the dimensions of 60×300 mm were cut using the hot-rolled steel sheet 65G, with the parameters of 4×600×1000 mm. Then the samples were divided into 2 groups by the hardening method: one part of the samples was treated using the bulk hardening technology followed by the medium-temperature tempering, and the remaining samples were treated with a defocused laser beam with a diameter of 6 mm (round spot mode) by the contacting runs in two passes,



ческих свойств были проведены испытания на промышленной машине трения и на оригинальной машине в условиях ударного и гидроабразивного износа, а также при имитации взаимодействия образцов с грунтом. Максимальное значение твердости 9 070 МПа (64 HRC) было получено на образцах первой партии при минимальной скорости обработки и исходной твердости 120 НВ. Триботехнические свойства высокоуглеродистых сталей 70 и 65Г, используемых для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих машин, после лазерной обработки не зависели от предшествующей термообработки. Лазерная обработка повышала их износостойкость в 1,7–1,9 раза. Лазерное упрочнение, проводимое после цементации и закалки, обеспечивало более высокие триботехнические свойства деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В наших экспериментах использовали образцы углеродистой дозвтектоидной стали 65Г (среднее содержание углерода 0,65%), из листового металлоизделия толщиной 4 мм.

Из горячекатаного стального листа марки 65Г, с параметрами $4 \times 600 \times 1000$ мм вырезали 30 пластин размером 60×300 мм. Затем образцы разделили на 2 группы по способу закалки: одну часть образцов обработали по технологии объемной закалки с последующим средним отпуском, а оставшиеся образцы обработали лазерным расфокусированным лучом диаметром 6 мм (режим круглое пятно) соприкасающимися дорожками за два прохода, с линейными колебаниями луча амплитудой 10 мм (линейный режим) и с круговыми колебаниями луча (круговой режим) с наружным диаметром круга 10 мм. Лазерное упрочнение образцов проводили с использованием иттербийевого волоконного лазера ЛС-10 с диаметром волокна 100 мкм и оптической головки IPG D30W с модулем колебания луча, технологический стол. Выходную мощность луча варьировали в пределах 1,0–2,25 кВт с шагом увеличения мощности 0,25 кВт. Критерием пригодности образцов после лазерной закалки для дальнейших исследований и испытаний являлось отсутствие следов оплавления поверхности.

Пластины, упрочняемые по существующей (уже ставшей классической) технологии объемной закалки с последующим средним отпуском, разделили на две подгруппы по среде охлаждения: вода или масло. Нагрев до достижения значений темпе-

with the linear beam oscillations with an amplitude of 10 mm (linear mode) and with the circular beam oscillations (circular mode) with an outer circle diameter of 10 mm. The laser hardening of samples was performed using an ytterbium fiber laser LS-10 with a fiber diameter of 100 μm and an IPG D30W optical head with a beam oscillation module, as well as the process table. The output beam power was varied within 1.0–2.25 kW with a power incremental step of 0.25 kW. The suitability criterion for the samples after the laser hardening process for further research and testing was the absence of surface melting traces.

The plates, hardened according to the existing (already classic) bulk hardening technology with the subsequent medium-temperature tempering, were divided into two subgroups by the cooling medium: water or oil. Heating to the temperature values required for hardening, and then to the tempering temperature was performed in a muffle furnace SNOL-2.2,5.2/12,5-11. At first, the steel 65G samples were heated to a temperature of 840 °C. After that, some of the samples were cooled in water, and some in oil. Then the samples were exposed for 60–120 minutes at a temperature of 400 °C. Then they were cooled in air at the room temperature, thus performing the tempering operation. Then the samples were divided into the parts to obtain microsections, conduct the metallographic studies and determine the hardness (microhardness). The appearance of the samples under study is shown in Fig. 1. The metallographic studies were performed using an Olympus GX-51 microscope, the microhardness was measured using a DURASCAN-70 device. To determine the stress conditions of the samples under study, the coercive field strength (H_c) values were measured before and after the laser heat treatment. The measurements were carried out with a KRM-Ts-K2M magnetic coercimeter (structroscopic) using a 2-pole magnetic sensor with a base surface of 20×29 mm. The abrasive wear tests were performed according to the scheme “generating surface of a rubber disk – plane (65G steel sample)” with a drop delivery of quartz sand into the friction zone with a particle size of 200–600 μm . The test cycle duration was 10 minutes at a load on the sample of 15 N.

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES

The structure of steel 65G when heated to 840 °C was transformed into austenite, and later, after rapid cooling, into the quenching martensite, whereupon the material became hard and brittle with the high internal stresses [12]. In the case of further heat treatment by the medium-temperature tempering, the quenching martensite structure was transformed into the tempering troostite. Therefore, the steel with a high elastic

ратуры необходимой для закалки, а после и до температуры отпуска проводили в муфельной печи СНОЛ-2.2,5.2/12,5-И1. Для начала образцы из стали 65Г нагрели до температуры 840 °С. После этого часть образцов охладили в воде, а часть в масле. Затем образцы выдержали, в течение 60–120 минут при температуре 400 °С. Затем охладили их на воздухе при комнатной температуре, проведя таким образом операцию отпуска. Далее образцы разделили на части для получения микрошлифов, проведения металлографических исследований и определения

твердости (микротвердости). Внешний вид исследуемых образцов представлен на рис. 1. Металлографические исследования проводили с использованием микроскопа Olympus GX-51, измерение микротвердости выполняли с применением прибора DURASCAN-70. Для определения напряженного состояния исследуемых образцов выполняли измерения значений коэрцитивной силы (H_c) до и после лазерной термообработки. Измерения проводили магнитным коэрцитиметром (структурископом) типа КРМ-Ц-К2М, с использованием 2-х полюсного магнитного датчика с базовой поверхностью 20×29 мм. Испытания на абразивное изнашивание проводили по схеме «образующая поверхность резинового диска – плоскость (образец стали 65Г)» с гравитационной подачей кварцевого песка в зону трения с размером частиц 200–600 мкм. Продолжительность цикла испытаний составляла 10 минут при нагрузке на образец 15 Н.



Рис. 1. Исследуемые образцы из стали 65Г после резки из листа
Fig. 1. The studied samples made of 65G steel after cutting from a sheet

strength and increased viscosity values was obtained. The average microhardness of samples hardened by bulk quenching followed by tempering with water and oil for cooling was 530 and 470 HV, respectively.

The study results of the second group of samples after surface hardening with a laser beam are given in Table 1.

Figure 2 shows the graphs of microhardness distribution by width and depth for various hardening modes. In the case of linear beam oscillations (Fig. 2a), the maximum values of the hardening zone microhardness of 875–904 HV were obtained with a uniform distribution over the run width at a layer depth of 612–630 μm. In the case of circular beam oscillations (Fig. 2b), the microhardness values were lower and amounted to 650–714 HV, while the depth of the hardening layer was 289–479 μm. In the case of hardening with a round spot (Fig. 2c), the microhardness was 630–850 HV with a rather uneven distribution across

Таблица 1. Результаты исследования показателей лазерного упрочнения

Table 1. Study results of the laser hardening indicators

Режимы упрочнения Hardening modes	Показатели упрочнения Hardening indicators			
	Вид зоны закалки Description of the hardening zone	Глубина, мкм Depth, μm	HV	Ширина, мкм Width, μm
Линейный Linear	Равномерная закалка с уменьшением глубины по краям дорожки Uniform hardening with the depth decrease at the edges of the run	612–630	875–904	11142
Круговой Circular	Равномерная закалка с уменьшением глубины по краям дорожки Uniform hardening with the depth decrease at the edges of the run	289–479	650–714	12055
Круглое пятно Round spot	Лункообразная Lunate	756–1036	603–850	10588

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Структура стали 65Г при нагреве до 840 °C переходила в аустенит, а в дальнейшем, при быстром охлаждении, в мартенсит закалки при этом материал становится твердым и хрупким с высокими внутренними напряжениями [12]. При дальнейшей термообработке среднетемпературным отпуском структура мартенсита закалки переходила в троостит отпуска, и получали сталь с высоким пределом упругости и повышенными значениями вязкости. Средняя микротвердость образцов упрочненных объемной закалкой с последующим отпуском с использованием для охлаждения воды и масла составили 530 и 470 HV соответственно.

Результаты исследования второй группы образцов после поверхностного упрочнения лазерным лучом представлены в табл. 1.

На рис. 2 представлены графики распределения микротвердости по ширине и глубине при различных режимах упрочнения. При линейных колебаниях луча (рис. 2, а) получены максимальные значения микротвердости зоны закалки 875–904 HV, с равномерным распределением по ширине дорожки при глубине слоя 612–630 мкм. При круговых колебаниях луча (рис. 2b) значения микротвердости были ниже и составили 650–714 HV при этом глубина слоя закалки составила 289–479 мкм. При закале круглым пятном (рис. 2c) микротвердость имела значения 630–850 HV с достаточно неравномерным распределением ее по ширине зоны закалки, а глубина слоя составила 756–1036 мкм.

На рис. 3 представлены микрошлифы зон лазерной закалки. При линейном режиме обработки (рис. 3а) ширина зоны закалки составила 1142 мкм, а глубина слоя 612–630 мкм. При обработке с круговыми колебаниями луча (рис. 3б) получена зона упрочнения шириной 12055 мкм с глубиной слоя закалки 289–479 мкм.

Для оценки эксплуатационных свойств упрочненные образцы испытывали на абразивную стойкость. Результаты испытаний представлены на рис. 4.

Наибольшей стойкостью к абразивному изнашиванию обладали образцы, закаленные лазером по линейному режиму, далее по уменьшению износостойкости следовали образцы, обработанные по круговому режиму и круглым пятном. Образцы закаленные в воде обладали большей износостойкостью, чем закаленные в масле. Наименьшую износостойкость показали образцы исходной стали. В табл. 2 представлены показатели упрочнения, потеря массы образцов, результаты изме-

the width of the hardening zone, and the layer depth was 756–1036 μm .

Fig. 3 shows the microsections of laser hardening zones. In the linear processing mode (Fig. 3a), the hardening zone width was 1142 μm , and the layer depth was 612–630 μm . When processing with the circular beam oscillations (Fig. 3b), the hardening zone with a width of 12055 μm and a hardening layer depth of 289–479 μm were obtained.

To assess the operational properties, the hardened samples were tested for abrasion resistance. The test results are shown in Fig. 4.

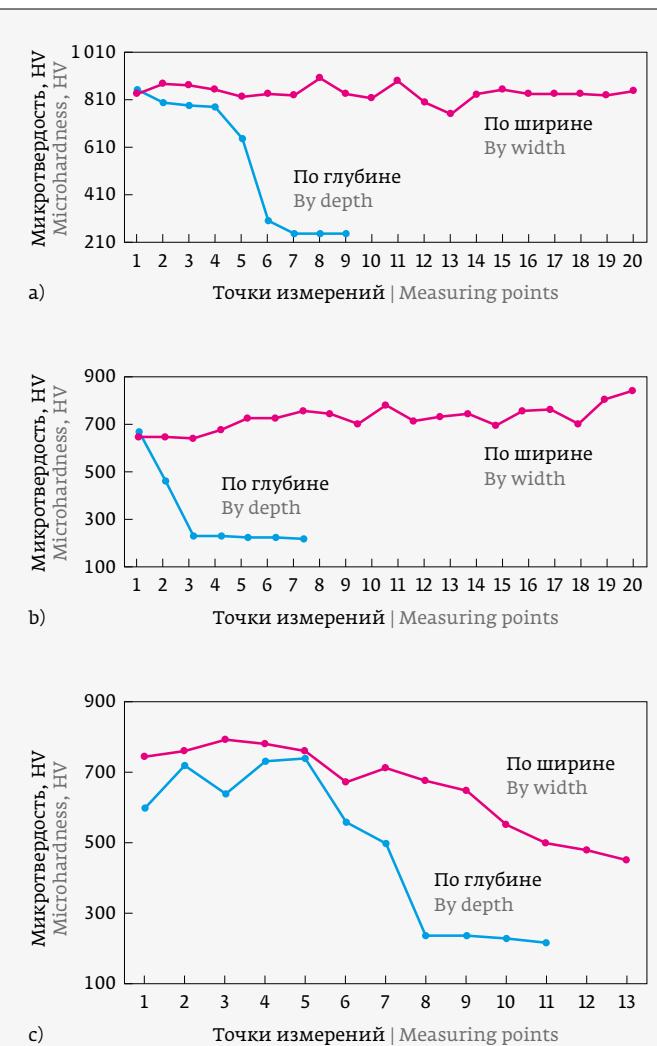


Рис. 2. Распределение микротвердости по ширине и глубине при различных режимах упрочнения: а) – линейный, б) – круговой, в) – круглое пятно

Fig. 2. Distribution of microhardness by width and depth under various hardening conditions: a) – linear, b) – circular, c) – round spot

рений напряженного состояния и коэрцитивной силы, полученные при измерении прибором КРМ-Ц-К2М. Напряжения в образцах стали 65Г, а также расчет прогнозируемого ресурса после лазерного упрочнения определяли с использованием экспериментальной тарировочной кривой и по методике, представленной авторами работы [13].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате испытаний на абразивное изнашивание образцов в условиях, приближенных к условиям эксплуатации органов почвообрабатывающих машин, установлено следующее.

При лазерной закалке стали 65Г микротвердость (HV) упрочненных слоев значительно возрастает по сравнению с объемной закалкой и сталью в исходном состоянии. Разработанная технология лазерного упрочнения с применением линейных поперечных колебаний луча по отношению к скорости обработки имеет большую производительность, чем при закалке расфокусированным лучом. Тех-

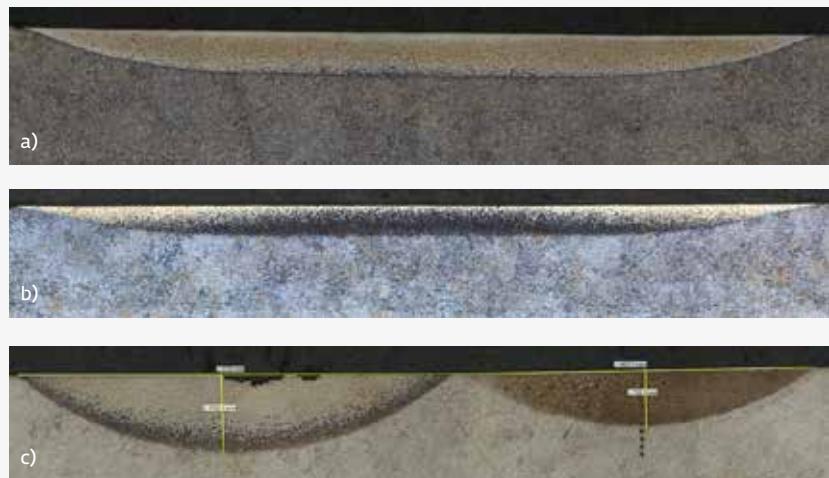


Рис. 3. Форма зоны упрочненного слоя образцов при различных режимах:
a – линейный; b – круговой; c – круглое пятно

Fig. 3. Shape of the hardened sample layer zone under various conditions:
a – linear; b – circular; c – round spot

Таблица 2. Показатели упрочнения и эксплуатационных свойств образцов

Table 2. Hardening indicators and performance properties of the samples

Режимы обработки Treatment modes	Показатели упрочнения, твердость, абразивная стойкость, ресурс Hardening indicators, hardness, abrasion resistance, service life						
	HV	Средняя потеря массы, г Average weight loss, g	$H_c, A/cm$ $N_s, A/cm$		Прогнозирование ресурса Service life forecasting		Остаточный ресурс, % Residual life, %
Исходное состояние Initial condition			H_{c_0}	H_{c_3}	σ, MPa	σ, MPa	
Исходное состояние Initial condition	230–270	0,04755	7,0	–	–	–	–
Объемная закалка (масло) Bulk hardening (oil)	440–470	0,03365	6,8–7,2	9,8	560	35,7	
Объемная закалка (вода) Bulk hardening (water)	510–550	0,03715		10,5	650	20,4	
Круглое пятно Round spot	603–850	0,02380		8,6	360	71	
Круговой Circular	650–714	0,02145		8,8	380	67,3	
Линейный Linear	875–904	0,01745		9,0	420	63,7	

Примечание: H_{c_0} – исходное значение; H_{c_3} – после упрочнения (закалки)

Note: H_{c_0} – initial value; H_{c_3} – after hardening (quenching)

нология лазерного упрочнения с применением колеблющегося лазерного луча может быть рекомендована для успешного использования при обработке режущих кромок сельскохозяйственных орудий, таких как лапы культиваторов, лемеха плугов, зубчатые ножи и др. изделий, обеспечивающая, повышение надежности и долговечности их работы.

Из представленных металлографических данных измерения зон закалки на микрошлифах образцов стали 65Г полученных при обработке линейной траекторией луча (рис. 3а), и круговой траекторией луча (рис. 3б), следует, что значения глубины и ширины зон упрочнения, составляли 0,694 и 9,523, и 0,34 и 9,897 мм, соответственно. Эти образцы обладали большей стойкостью к абразивному износу, чем при объемной закалке. Следует отметить, что при круговом лазерном режиме, происходит прогрев на большую глубину, а глубина зоны лазерной закалки значительно меньше, чем при линейном режиме обработки. При термоупрочнении круглым пятном расфокусированного лазерного луча (рис. 3с) в зоне касания дорожек значения твердости ниже, чем на самих дорожках. Несмотря на это, стойкость к абразивному износу достигнута выше, чем при объемной закалке в печи.

Для определения напряженного состояния исследуемых образцов выполняли измерения значений коэрцитивной силы (H_c) до и после лазерной термообработки. Измеренные значения H_c представлены в таблице 2. Термические напряжения в исследуемых образцах в исходном состоянии, практически отсутствовали. Максимальные остаточные напряжения на уровне 650 МПа имели образцы после печной термообработки с закалкой в воде. Уровень остаточных термических напряжений после печной термообработки с закалкой в масле был ниже и составил 560 МПа. Максимальные значения термических напряжений после лазерной закалки значительно ниже напряжений после печной закалки и были на уровне 360–420 МПа. Полученные в данном исследовании результаты использованы для ориентировочного расчета остаточного ресурса изделий. С учетом наших данных, а также других исследователей [13, 14], были приняты значения $H_c=12,5$ А/см за критические, что соответствует напряжениям на уровне 700 МПа. Абсолютное значение $H_c=H_{c\text{ крит}}-H_{c0}=12,5-7,0=5,5$ А/см. Относительное значение равно $\Delta H_c/H_{c\text{ исх}}=0,785$ что было принято нами за 100% (проектный) ресурс образцов из стали 65Г. Тогда, после объемной термообработки с закалкой в воде прогнозируемый ресурс

original steel samples. Table 2 provides the hardening indices, the loss of sample weight, the measurement results of the stress condition and the coercive field strength obtained by the KRM-Ts-K2M device. The stresses in the 65G steel samples, as well as calculation of the projected service life after laser hardening, were determined using an experimental calibration curve according to the method provided by the authors of paper [13].

DISCUSSION OF RESULTS

As a result of abrasive wear tests of the samples under the conditions close to the operating conditions of tillage machinery, the following was established.

During the laser hardening of 65G steel, the microhardness value (HV) of the hardened layers is increased significantly compared to the bulk hardening and steel in the initial condition. The developed laser hardening technology using the linear transverse beam oscillations in relation to the treatment speed has a higher productivity than in the case of hardening with a defocused beam. The laser hardening technology using an oscillating laser beam can be recommended for successful application to process the cutting edges of agricultural implements, such as the cultivator blades, plough shares, serrated blades, etc., while

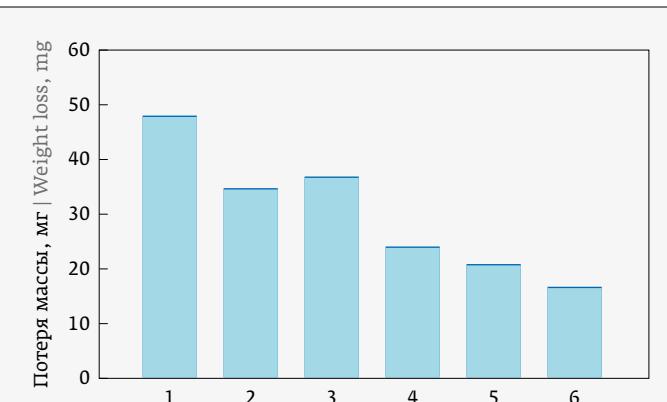


Рис. 4. Потеря массы образцов стали 65Г при испытании свободным абразивным зерном:

1 – исходная сталь 230–270 HV; 2 – закалка с охлаждением в воде 510–550 HV; 3 – закалка с охлаждением в масле 440–470 HV; 4 – круглое пятно 693–805 HV; 5 – круговой 650–714 HV; 6 – линейный 875–904 HV

Fig. 4. Weight loss of 65G steel samples when tested with the free abrasive grain: 1 – original steel, 230–270 HV; 2 – hardening with water cooling, 510–550 HV; 3 – hardening with oil cooling, 440–470 HV; 4 – round spot, 693–805 HV; 5 – circular, 650–714 HV; 6 – linear, 875–904 HV

образцов по уровню термических напряжений составил 20,4%, а после закалки в масле – 35,7%. При этом твердость образцов после закалки в воде (530 HV) выше, чем после закалки в масле (460 HV) в 1,15 раза. И, следовательно, стойкость к абразивному износу образцов, закаленных в воде должна быть примерно в 1,15 раза выше, что и показали эксперименты на абразивную стойкость.

Упрочнение лазерным лучом выгодно отличается от объемной термообработки, по показателям, характеризующим эксплуатационные характеристики. Уровень термических остаточных напряжений в образцах после лазерного упрочнения ниже в 1,6–1,8 раз уровня напряжений после объемной печной закалки. Набольшее сопротивление абразивному износу показали образцы после линейного режима. Проигрывают по этому показателю с весьма незначительным отличием между собой образцы после лазерного упрочнения круговым режимом и круглым пятном двумя дорожками.

Однако, по сравнению с образцами, упрочненными круговым (67,3%) и линейным (63,7%) режимами лазерного упрочнения, образцы после лазерного упрочнения круглым пятном обладают более высокими значениями расчетного прогнозируемого ресурса эксплуатации (71% от проектного ресурса). Однако, значения остаточного ресурса имели один порядок и были близкими по величине поэтому решающим значением при выборе технологии была стойкость к абразивному изнашиванию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и апробирована в условиях опытно-промышленного производства технология лазерной закалки стали 65Г с использованием линейных поперечных колебаний лазерного луча, которая позволила получить зону закалки шириной до 10 мм. Абразивная износостойкость повысилась в 2,5 и 1,7 раза по сравнению со сталью 65Г в исходном состоянии и после объемной закалки соответственно.

По результатам экспериментальной оценки уровня термических остаточных напряжений после объемной печной закалки и лазерного упрочнения образцов из стали 65Г выполнен расчет прогнозируемого ресурса последующей эксплуатации деталей почвообрабатывающих механизмов и машин.

REFERENCES

1. Lyalyakin V. P., Solov'ev S. A., Aulov V. F. Sostoyanie i perspektivy uprochneniya i vosstanovleniya detalej pochvoobrabatyvayushchih mashin svarочно-naplavochnymi metodami. *Trudy GOSNITI*. 2014; 115: 96–104.

ensuring increased reliability and durability of their operation.

It is shown by the provided metallographic data on the hardening zone measurement in the microsections of 65G steel samples obtained during the treatment with a linear beam trajectory (Fig. 3a) and a circular beam trajectory (Fig. 3b) that the depth and width values of the hardening zone were 0.694 and 9.523, and 0.34 and 9.897 mm, respectively. These samples had greater resistance to the abrasive wear than in the case of bulk hardening. It should be noted that in the circular laser mode, the heating is performed to a greater depth, and the depth of the laser hardening zone is significantly less than in the linear processing mode. When performing heat hardening with a round spot of a defocused laser beam (Fig. 3c), the hardness values in the contact area of runs are lower than on the runs. Despite this, the achieved abrasive wear resistance is higher than in the case of bulk hardening in a furnace.

To determine the stress condition of the samples under study, the coercive field strength (H_c) values were measured before and after the laser heat treatment. The measured H_c values are given in Table 2. The thermal stresses in the samples under study in the initial conditions were almost absent. The maximum residual stresses at the level of 650 MPa were available in the samples after the furnace heat treatment with water quenching. The level of residual thermal stresses after the furnace heat treatment with oil quenching was lower and amounted to 560 MPa. The maximum values of thermal stresses after the laser hardening process were significantly lower than the stresses after the furnace hardening, namely at the level of 360–420 MPa. The results obtained in this study were used for the approximate calculation of the residual life of the products. With due regard to our data, as well as the results of other researchers [13, 14], the values of $H_c = 12.5$ A/cm were taken as the critical ones while corresponding to the stresses at the level of 700 MPa. The absolute value is $\Delta H_c = H_{c\text{crit}} - H_{c0} = 12.5 - 7.0 = 5.5$ A/cm. The relative value is $\Delta H_c / H_{c\text{init.}} = 0.785$ that was taken as 100% (design) service life of the samples made of 65G steel. Then, after the bulk heat treatment with water quenching, the predicted service life of the samples in terms of thermal stress level was 20.4%, and after oil quenching – 35.7%. Moreover, the hardness of samples after water quenching (530 HV) was 1.15 times higher than after oil quenching (460 HV). Therefore, the abrasive wear resistance of the samples quenched in water should be approximately 1.15 times higher than was shown by the abrasive resistance tests.

ВЫСТАВКА
ОБОРУДОВАНИЯ, ПРИБОРОВ
И ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ,
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ И СВАРОЧНОЙ
ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

4-6 ДЕКАБРЯ
МВЦ "КАЗАНЬ ЭКСПО"
КАЗАНЬ 2024

ГЛОБАЛЬНЫЙ
ФОРУМ
ПО МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

TEMO
ТЕХНОЛОГИИ
МЕТАЛЛООБРАБОТКИ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ



INVEST
TATARSTAN



ВИКО
Всероссийское инновационное
централизованное
объединение малого бизнеса

5000+ ПОСЕТИТЕЛЕЙ

ВЫСТАВКА МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО
И СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ДЕМОНСТРАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ
В РАБОТЕ

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ
СПЕЦИАЛИСТОВ ОТРАСЛИ

B2B - ВСТРЕЧИ



ООО ВИКО
+7(965) 585-14-29
expo-kazan@mail.ru
vicoexpo.ru/expomach

- Лялякин В. П., Соловьев С. А., Аулов В. Ф. Состояние и перспективы упрочнения и восстановления деталей почвообрабатывающих машин сварочно-наплавочными методами. *Труды ГОСНИТИ*. 2014; 115; 96–104.
2. Nath A. K., Sarkar S. Laser transformation hardening of steel. *Advances in laser materials processing*. 2018; 11; 257–298. DOI: 10.1016/B978-0-08-101252-9.00011-X.
 3. Telasang G., Majumdar J. D., Padmanabham G., Manna I. Wear and corrosion behavior of laser surface engineered AISI H13 hot working tool steel. *Surface and Coatings Technology*. 2015; 261; 69–78. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.058.
 4. Yilbas B. S., Malik J., Patel F. Laser gas assisted treatment of AISI H12 tool steel and corrosion properties. *Optics and Lasers in Engineering*. 2014; 54; 8–13. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.10.004.
 5. Maharjan N., Zhou W., Zhou Y., Wu N. Underwater laser hardening of bearing steels. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019; 47; 52–56. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.08.020.
 6. Moradi M., Arabi H., Nasab S. J., Benyounis K. Y. A comparative study of laser surface hardening of AISI 410 and 420 martensitic stainless steels by using diode laser. *Optics and Laser Technology*. 2019; 111; 347–357. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.10.013.
 7. Park C., Kim J., Sim A., Sohn H., Jang H., Chun E. J. Influence of diode laser heat treatment and wear conditions on the fretting wear behavior of a mold steel. *Wear*. 2019; 434–435; 202961. DOI: 10.1016/j.wear.2019.202961.
 8. Yuan Q., Chai L., Shen J., Wang H., Guan H., Guo N., Li Y. Microstructural characteristics, hardness and wear resistance of a typical ferritic/martensitic steel surface-treated by pulsed laser. *Surface and Coatings Technology*. 2021; 418; 127261. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127261.
 9. Heitkemper M., Fischer A., Bohne Ch., Pyzalla A. Wear mechanisms of laser-hardened martensitic high-nitrogen-steels under sliding wear. *Wear*. 2001; 250; 477–484. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00659-7.
 10. Pellizzari M., De Flora M. G. Influence of laser hardening on the tribological properties of forged steel for hot rolls. *Wear*. 2011; 271; 2402–2411. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.044.
 11. Pyndak V. I., Novikov A. E. Tribotechnical and energy assessment of parts of working members of cultivating machines after carburizing and laser hardening. *Metal Science and Heat Treatment*. 2016; 58 (3–4); 226–230. DOI: 10.1007/s11041-016-9994-7.
 12. Bogachyova N. D. Применение размагничивания в технике. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. – СПб. 2010. 263 с. ISBN 978-5-903002-18-4.
Богачева Н. Д. Применение размагничивания в технике. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. – СПб. 2010. 263 с. ISBN 978-5-903002-18-4.
 13. Lyalyakin V. P., Krivorotov V. I., Lukanin B. E., Muratov R. Ch., Tolkacheva A. V. Применение метода коэрцитиметрии для оценки остаточных напряжений в плоских ножах, упрочненных ТВЧ-борированием. *Труды ГОСНИТИ*. 2023; 1 (150); 93–102. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-1-93-102.
Лялякин В. П., Криворотов В. И., Луканин Б. Е., Муратов Р. Ч., Толкачева А. В. Применение метода коэрцитиметрии для оценки остаточных напряжений в плоских ножах, упрочненных ТВЧ-борированием. *Труды ГОСНИТИ*. 2023; 1 (150); 93–102. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-1-93-102.
 14. Nerazrushayushchij kontrol' i diagnostika. Spravochnik. / Pod redakcijej V. V. Klyueva. – M. Mashinostroenie. 2003. 657s. ISBN: 5-217-03178-6.
Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. / Под редакцией В. В. Клюева. – М. Машиностроение. 2003. 657с. ISBN: 5-217-03178-6.

АВТОРЫ

- Бирюков Владимир Павлович, ведущий научный сотрудник, к. т. н., Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия. ORCID 0000-0001-9278-6925
- Криворотов Валерий Иванович, заместитель начальника отдела САС, к. т. н., ООО НТО «ИРЭ-Полюс», г. Фрязино, Моск. обл., Россия. ORCID 0009-0008-6520-7500
- Луканин Борис Евгеньевич, начальник сектора сертификации и аттестации отдела САС, ООО НТО «ИРЭ-Полюс», аспирант, Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана. Мытиши, Москва, Россия. ORCID 0009-0008-8277-0688

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Авторы внесли равный вклад в работу над этой статьей.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

The laser beam hardening is compared favorably with the bulk heat treatment in terms of the indicators determining the operational specifications. The level of thermal residual stresses in the samples after laser hardening was 1.6–1.8 times lower than the stress level after the bulk furnace hardening. The samples after the linear mode application demonstrated the highest abrasive wear resistance. The samples after laser hardening with a circular mode and a round spot with two runs were behind on this indicator with a very insignificant difference between them.

However, when compared to the samples hardened in the circular (67.3%) and linear (63.7%) laser hardening modes, the samples after laser hardening with a round spot have higher values of the calculated projected service life (71% of the design life). However, the residual life values were of the same order and were close in values, so the decisive factor for the technology selection was the abrasive wear resistance.

CONCLUSION

The laser hardening technology for 65G steel using the linear transverse oscillations of a laser beam has been developed and tested in the pilot production conditions that has made it possible to obtain a hardening zone with the width of up to 10 mm. The abrasive wear resistance has been increased by 2.5 and 1.7 times compared to 65G steel in the initial condition and after bulk hardening, respectively.

Based on the experimental assessment results of the thermal residual stress level after the bulk furnace hardening and laser hardening of the samples made of 65G steel, a calculation has been made in relation to the predicted subsequent service life of the parts of tilling mechanisms and machines.

AUTHORS

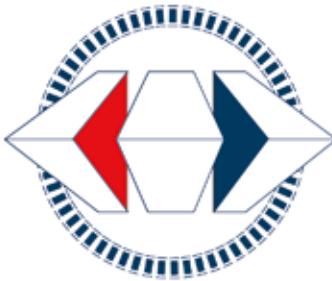
- Biryukov Vladimir Pavlovich, leading researcher, Ph.D. in technical sciences, Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
ORCID 0000-0001-9278-6925
- Krivorotov Valeriy Ivanovich, deputy head of the attestation and certification department, Ph.D. in technical services, Scientific and Technical Association "IRE-Polyus" LLC, Fryazino, Moscow region, Russia.
ORCID 0009-0008-6520-7500
- Lukanin Boris Evgenievich, head of the certification and attestation unit of the attestation and certification department, Scientific and Technical Association "IRE-Polyus" LLC, postgraduate student, Mytishchinskiy branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi, Moscow, Russia.
ORCID 0009-0008-8277-0688

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

COMPETING INTERESTS

The authors declare that they have no conflicts of interest.



26–28 ноября 2024

РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННИК

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ-ВЫСТАВКА

**ПРОМЫШЛЕННАЯ ПОЛИТИКА:
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ
И КАДРОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ,
МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО**

**ДЕМОНСТРАЦИЯ ПЕРЕДОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ**

**КОММУНИКАЦИОННАЯ ПЛОЩАДКА
РАЗВИТИЯ ДЕЛОВЫХ СВЯЗЕЙ,
ПРЯМОГО КОНТАКТА
С ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ
ПАРТНЁРАМИ**



**ПРИНЯТЬ
УЧАСТИЕ**



**Минпромторг
России**



ПРАВИТЕЛЬСТВО
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ОПЕРАТОР ФОРУМА:



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ | КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

PROMEXPO.EXPOFORUM.RU