



Повышение износостойкости деталей и почвообрабатывающих орудий в сельхозмашиностроении лазерной наплавкой

В. П. Бирюков

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

В работе представлены результаты металлографических и трибологических исследований покрытий с добавлением в состав шихты нано карбида тантала. С помощью полного факторного эксперимента определены геометрические параметры наплавленных покрытий в зависимости от мощности, скорости обработки и диаметра лазерного луча. Получены закономерности изменения коэффициентов трения от давления и скорости скольжения. Задиристость и износостойкость покрытий выше закаленных сталей.

Ключевые слова: лазерная наплавка, волоконные лазеры, наплавочные покрытия, коэффициент трения, сельскохозяйственная техника, задиристость, износостойкость

Статья получена: 06.03.2021

Принята к публикации: 30.03.2021

ВВЕДЕНИЕ

Повышение ресурса работы деталей и узлов трения сельскохозяйственной техники является актуальной задачей. Традиционные конструкционные материалы и технологии термической обработки в большинстве случаев уступают по износостойкости новым технологиям упрочнения и покрытиям с применением концентрированных источников

Enhancement the Wear Resistance of Parts and Tillage Tools in Agricultural Machinery by Laser Cladding

V. P. Biryukov

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

The paper presents the results of metallographic and tribological studies of coatings with the addition of ultrafine titanium carbide powder to the multicomponent charge. With the help of a full factorial experiment, the geometric parameters of the cladded coating were determined depending on the power, processing speed and the diameter of the laser beam. Regularities of the change in the friction coefficients on pressure and sliding speed have been obtained. Scuff resistance and wear resistance of coatings is higher than hardened steels.

Keywords: Laser cladding, Fiber lasers, Cladded coating, Agricultural machinery, Friction coefficient, Scuff Resistance, Wear Resistance, Abrasion Resistance

Received: 06.03.2021

Accepted: 30.03.2021

INTRODUCTION

Increasing the service life of parts and friction units of agricultural machinery is an urgent task. In most cases, traditional structural materials and heat treatment technologies are inferior in wear resistance to new hardening technologies and coatings using concentrated energy sources, in particular, high-power lasers. As a cladding material [1], a spherical nickel-based alloy powder (Ni-Cr-B-Si-Fe-C) with a particle size of 50–150 μm was used. Laser cladding was performed on 316L stainless steel samples with an RFL-C3300 fiber laser (Raycus, Wuhan, China) using a DPSF-2 powder feeder. The

энергии, в частности мощным лазером. В качестве наплавочного материала [1] использовался порошок сплава на основе никеля (Ni-Cr-B-Si-Fe-C) сферической формы с размером частиц 50–150 мкм. Лазерную наплавку выполняли на образцах нержавеющей стали 316L волоконным лазером RFL-C3300 (Raucus, Ухань, Китай) с использованием порошкового питателя ДПСФ-2. Обработку проводили при мощности излучения 1,8 кВт, диаметре пятна 4 мм, скорости перемещения 5 мм/с. Испытания на трение и износ проводили по схеме шар (Al_2O_3 диаметром 10 мм) – плоскость (наплавленный образец или основа) в соответствии со стандартом ASTM G99-05 на машине трения UMT-2. Путь трения составлял 18 м при скорости скольжения 10 мм/с. Средняя микротвердость однослойных и трехслойных покрытий составляла 593 и 640 $HV_{0,2}$ соответственно, что почти в 2,5 раза выше, чем у подложки 316L (около 250 $HV_{0,2}$). Наибольшую износостойкость имело трехслойное покрытие.

Покрытия Ni-Cr-B-Si [2] были нанесены волоконным лазерным источником с коаксиальным порошковым соплом на подложку из низкоуглеродистой стали AISI 1020. Проведены испытания на абразивный износ по стандарту ASTM G65. Лучшие трибологические характеристики были получены для покрытий с меньшим количеством холодных трещин и более высокой объемной долей карбидов.

Определено влияние мощности лазера 1500–1900 Вт, диаметра пятна 3–5 мм и скорости сканирования луча 2–4 мм/с на геометрические параметры, микротвердость и износостойкость, наплавленного покрытия Ni-Cr-B-Si на образцах стали 42CrMo [3]. Микротвердость наплавленных слоев изменялась в пределах 520–690HV. Ширина, высота дорожек наплавки и глубина проплавления составляли 1,47–1,8, 3,57–4,23 и 0,52–1,44 мм соответственно. Полученные результаты показали, что мощность лазера являлась основным фактором, влияющим на высоту покрытия. Наибольший эффект на ширину единичного валика оказывал диаметр пятна. Скорость сканирования имела значительное влияние на глубину расплавленной ванны. Мощность лазера показала наибольшее влияние на микротвердость и износостойкость покрытия. Механизм износа покрытия абразивный и адгезионный.

Лазерная наплавка порошков Ni-Cr и Ni-Cr-TiC на сталь AISI 420 проводилась импульсным Nd:YAG-лазером с одновременной подачей порошка [4]. Исследовано влияние скорости

treatment was carried out at a radiation power of 1.8 kW, a spot diameter of 4 mm, and a travel speed of 5 mm/s. Friction and wear tests were carried out according to the ball (Al_2O_3 10 mm in diameter) – plane (deposited sample or base) scheme in accordance with ASTM G99-05 standard on a UMT-2 friction machine. The friction path was 18 m at a sliding speed of 10 mm/s. The average microhardness of single-layer and three-layer coatings was 593 and 640 $HV_{0,2}$, respectively, which is almost 2.5 times higher than that of the 316L substrate (about 250 $HV_{0,2}$). The three-layer coating had the greatest wear resistance.

Ni-Cr-B-Si [2] coatings were deposited with a fiber laser source with a coaxial powder nozzle on an AISI 1020 mild steel substrate. Abrasion tests carried out according to ASTM G65. Better tribological characteristics were obtained for coatings with fewer cold cracks and a higher volume fraction of carbides.

The influence of the laser power 1500–1900 W, spot diameter 3–5 mm and beam scanning speed 2–4 mm/s on the geometric parameters, microhardness and wear resistance of the deposited Ni-Cr-B-Si coating on 42CrMo steel samples was determined [3]. The microhardness of the deposited layers varied within 520–690 HV. The width, height of the cladding tracks and the penetration depth were 1.47–1.8, 3.57–4.23 and 0.52–1.44 mm, respectively. The results obtained showed that the laser power was the main factor affecting the coating height. The spot diameter had the greatest effect on the width of a single ridge. The scan speed had a significant effect on the depth of the molten bath. The laser power showed the greatest influence on the microhardness and wear resistance of the coating. The wear mechanism of the coating is abrasive and adhesive.

Laser cladding of Ni-Cr and Ni-Cr-TiC powders on AISI 420 steel was carried out with a pulsed Nd:YAG laser with simultaneous powder supply [4]. The influence of the powder feed rate, the radiation power and the beam scanning speed, the influence of each parameter on the laser cladding process was investigated, and the optimal parameters of the laser cladding were selected. It was found that the weight loss of the Ni-Cr-TiC composite coating is less than that of the Ni-Cr and steel substrate.

Fe-WC coatings on mild steel are obtained by laser cladding using a disk laser [5]. The processing was carried out at a laser beam power of 600, 700, and 800 W. The beam scanning speed was the same for all coatings and amounted to 600 mm/min. The spot diameter was 1.64 mm. Two modes of powder feeding were used, 6.25 g/min and 12.5 g/min.



подачи порошка, мощности излучения и скорости сканирования луча, влияние каждого параметра на процесс лазерной наплавки и выбраны оптимальные параметры лазерной наплавки. Было установлено, что потеря массы композитного покрытия Ni-Cr-TiC меньше, чем у Ni-Cr и подложки из стали.

Покрyтия Fe-WC на малоуглеродистую сталь получены лазерной наплавкой с использованием дискового лазера [5]. Обработку выполняли при мощности луча лазера 600, 700 и 800 Вт. Скорость сканирования луча была одинаковой для всех покрытий и составляла 600 мм/мин. Диаметр пятна составлял 1,64 мм. Применялись два режима подачи порошка 6,25 г/мин и 12,5 г/мин. Наибольшая микротвердость и коррозионная стойкость наблюдались для покрытий, полученных при расходе порошка 12,5 г/мин.

Для получения покрытий из порошка Стеллит-6/WC использовался дисковый лазер на Yb:YAG с номинальной мощностью 1 кВт [6]. Покрyтия наносили на борсодержащую сталь B27. Обработку выполняли при мощности лазерного луча 550 Вт, скорости подачи 400 мм/мин и расходе порошка 10 г/мин. Установлено, что покрытия Стеллит-6/WC способствовали увеличению долговечности сельскохозяйственных орудий, используемых для обработки почвы.

Порошки сплавов на основе никеля (Ni) с различным содержанием кобальта (Co) были нанесены на поверхность стальной подложки из 42CrMo с помощью волоконного лазера [7]. С увеличением содержания Co количество карбидов и боридов $M_7(C, B)_3$, $M_{23}(C, B)_6$ и M_2B постепенно уменьшаются. Микротвердость снижается, но износостойкость наплавленного слоя постепенно повышается с увеличением содержания Co. Износостойкость слоя NiCo30 в 3,6 раза выше, чем у слоя NiCo00. С увеличением содержания Co механизм износа покрытия меняется с абразивного на адгезионный.

Лазерную наплавку порошков на основе железа Fe-Cr-Ni-Mo-Mn-C-Si выполняли на сталь AISI 4130 [8]. Покрyтия имели высокую износостойкость и коррозионную стойкость. Микроструктура в основном состояла из дендритов и эвтектических фаз, таких как $(\gamma+\alpha)$ -Fe и твердый раствор Fe-Cr(Ni). Наплавленные покрытия на основе Fe имели более низкие коэффициенты трения, чем подложка, и основным механизмом износа являлся умеренный абразивный износ.

Покрyтие на основе никеля было нанесено на поверхность стали 42CrMo с помощью воло-

The highest microhardness and corrosion resistance were observed for coatings obtained at a powder flow rate of 12.5 g/min.

To obtain coatings from Stellite-6/WC powder, a Yb:YAG disk laser with a nominal power of 1 kW was used [6]. The coatings were applied to B27 boron steel. The treatment was carried out at a laser beam power of 550 W, a feed rate of 400 mm/min, and a powder flow rate of 10 g/min. It was found that Stellite-6/WC coatings contributed to an increase in the durability of agricultural implements used for soil cultivation.

Nickel (Ni) based alloy powders with different cobalt (Co) contents were applied to the surface of a 42CrMo steel substrate using a fiber laser [7]. With an increase in the Co content, the amount of carbides and borides $M_7(C, B)_3$, $M_{23}(C, B)_6$, and M_2B gradually decreases. The microhardness decreases, but the wear resistance of the deposited layer gradually increases with an increase in the Co content. The wear resistance of the NiCo30 layer is 3.6 times higher than that of the NiCo00 layer. The wear resistance of the NiCo30 layer is 3.6 times higher than that of the NiCo00 layer. With an increase in Co content, the wear mechanism of the coating changes from abrasive to adhesive.

Laser cladding of iron-based powders Fe-Cr-Ni-Mo-Mn-C-Si was performed on AISI 4130 steel [8]. The coatings had high wear resistance and corrosion resistance. The microstructure mainly consisted of dendrites and eutectic phases such as $(\gamma+\alpha)$ -Fe and Fe-Cr(Ni) solid solution. Fe-based coatings had lower coefficients of friction than the substrate and the main wear mechanism was moderate abrasive wear.

A nickel-based coating was applied to the surface of 42CrMo steel using a 6 kW fiber laser [9]. The addition of Mo powder resulted in a crack-free composite coating. The main phases of the Ni45 + 10% Mo laser cladding layer are (Fe, Ni), Cr₂₃C₆, Cr₃C₂, Mo₂FeB₂ and Cr₂B₃. Composite coating Ni45 + 10% Mo had wear resistance 1.7 times higher than that of Ni45 coating and 2.4 times higher than that of 42CrMo steel.

The influence of processing parameters on the microhardness and wear resistance of an alloy based on Ni and titanium carbide (TiC) was investigated [10]. The results show that microhardness correlates with laser power and TiC powder additives. The amount of wear decreased with an increase in the proportion of TiC powder. The optimum machining parameter was a coating hardness of 62 HRC to obtain minimal volumetric wear.



конного лазера мощностью 6 кВт [9]. При добавлении порошка Мо было получено композитное покрытие без трещин. Основными фазами слоя лазерной наплавки Ni45+10% Мо являются (Fe, Ni), Cr₂₃C₆, Cr₃C₂, Mo₂FeB₂ и Cr₂B₃. Композитное покрытие Ni45 + 10% Мо имело износостойкость в 1,7 раза выше, чем покрытие Ni45 и в 2,4 раза выше, чем у стали 42CrMo.

Исследовано влияние параметров обработки на микротвердость и износостойкость сплава на основе Ni и карбида титана (TiC) [10]. Результаты показывают, что микротвердость коррелирует с мощностью лазера и добавками порошка TiC. Объем износа уменьшался с увеличением доли порошка TiC. Оптимальным параметром обработки была твердость покрытия 62 HRC для получения минимального объемного износа.

Целями работы являются определение параметров зон лазерной наплавки и трибологических характеристик покрытий при введении в шихту нано порошка карбида тантала.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В экспериментальных исследованиях использовали лазерную систему ИМАШ РАН. Образцы изготавливали из сталей 45(490–525HV), 65Г(570–625HV) с размерами 15×20×70 мм. Для изготовления шихты выбраны порошки на основе железа (Fe-Cr-Ni-Si) и никеля (Ni-Cr-B-Si) в соотношении 3:1 соответственно с размером частиц 40–150 мкм. Порошок нано карбида тантала TaC 5 и 10 об.% добавляли в шихту с размером частиц 40–100 нм. Шликерные покрытия наносили толщиной 0,67–0,8 мм. В качестве связующего материала использовали водный раствор оксиэтилцеллюлозы. Металлографические исследования наплавленных покрытий выполняли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н, металлографическом микроскопе Альтами МЕТ 1С и цифровом микроскопе АМ417. Структура и химический состав наплавленных слоев исследовались на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного анализа с применением режимов отраженных и вторичных электронов. Для определения трибологических характеристик наплавленных образцов проводили испытание при нормальной температуре по схеме плоскость (наплавленный образец) – кольцо (сталь ШХ15, 60–62). Скорость скольжения и давление на образец изменялись дискретно в интервале 0,25–3,5 м/с и 1–6 МПа соответственно. В качестве смазочного материала использовали

The objectives of the work are to determine the parameters of the laser cladding zones and the tribological characteristics of multicomponent coatings when an ultradispersed titanium carbide powder is introduced into the charge.

EQUIPMENT AND RESEARCH METHODS

In experimental studies, the IMASH RAS laser system was used. Samples were made from steels 45 (490–525HV), 65G (570–625HV) with dimensions 15 × 20 × 70 mm. For the manufacture of the charge, powders based on iron (Fe-Cr-B-Si) and nickel (Ni-Cr-B-Si) in a ratio of 3: 1, respectively, with a particle size of 40–150 microns were selected. Powder of ultrafine titanium carbide TiC 5 and 10 wt.% Was added to the charge with a particle size of 0.5–5 microns. Slip coatings were applied with a thickness of 0.67–0.8 mm. An aqueous solution of hydroxyethyl cellulose was used as a binder. Metallographic studies of the cladded coating were carried out on a PMT-3 microhardness tester at a load of 0.98 N, an Altami MET 1C metallographic microscope, and an AM417 digital microscope. The structure and chemical composition of the deposited layers were investigated using a TESCAN VEGA 3 SBH scanning electron microscope with an energy dispersive analysis system using reflected and secondary electron modes. To determine the tribological characteristics of the deposited samples, a test was carried out at normal temperature according to the plane (deposited sample) – ring (steel ШХ15, 60–62 steel) scheme. The sliding speed and pressure on the sample varied discretely in the range 0.25–3.5 m/s and 1–6 MPa, respectively. M10G2 oil was used as a lubricant. Abrasive wear tests were carried out according to the disk-plane scheme. A flat sample with a deposited coating with a load of 15 N was pressed against a rotating rubber disk. Quartz sand with a particle size of 200–600 microns was used as an abrasive. The test duration was 10 minutes.

The radiation power P=700–1000 W, the processing speed V=7–10 mm/s, and the beam diameter d=2.5–3.5 mm were chosen as the variable parameters. Scanning of the beam with a fixed frequency f=217 Hz was considered as an additional factor. To construct mathematical models when performing a full factorial experiment (FFE), the height H and width B of the deposited beads were considered as responses of the system. Table shows the levels of experimental factors.

Since PFE 23 was performed, the number of experiments was 8 for each series.

Табл. Уровни факторов эксперимента

Table. Experiment factor levels

Фактор z_i Factor z_i	Верхний уровень фактора z_i^+ Upper factor level z_i^+	Нижний уровень фактора z_i^- Lower factor level z_i^-	Центр плана z_i^0 Plan center z_i^0	Интервал варьирования λ_i Variation interval λ_i	Зависимость кодированной переменной от натуральной Dependence of the encoded variable on the natural
$P, \text{Вт}$ P, W	1000	700	850	150	$x_i = \frac{P_i - 850}{150}$
$V, \text{мм/с}$ $V, \text{mm/s}$	9	7	8	1	$x_i = V_i - 8$
$d, \text{мм}$ d, mm	3,5	2,5	3	0,5	$x_i = \frac{d_i - 3}{0,5}$

масло M10G2. Испытания на абразивное изнашивание проводили по схеме диск-плоскость. К вращающемуся резиновому диску прижимался плоский образец, с наплавленным покрытием нагрузкой 15 Н. В качестве абразива использовали кварцевый песок с размером частиц 200–600 мкм. Продолжительность испытаний составляла 10 минут.

Варьируемыми параметрами были выбраны мощность излучения $P=700-1000$ Вт, скорость обработки $V=7-10$ мм/с и диаметр пучка $d=2,5-3,5$ мм. В качестве дополнительного фактора рассматривалось сканирование луча с фиксированной частотой $f=217$ Гц. Для построения математических моделей при выполнении полного факторного эксперимента (ПФЭ) в качестве откликов системы рассматривались высота H и ширина B наплавленных валиков. В таблице представлены уровни факторов эксперимента.

Поскольку выполнялся ПФЭ 2^3 , количество экспериментов составило 8 для каждой серии.

Уравнение регрессии имеет вид:

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

где: y – отклик системы;

x_i – уровни факторов;

b – коэффициенты уравнения регрессии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лазерная наплавка образцов выполнялась на оптимальных режимах расфокусированным лучом и с поперечными колебаниями луча по нормали к вектору скорости лазерной обработки. Микротвердость наплавленных

The regression equation is:

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

where: y – system response;

x_i – levels of factors;

b – coefficients of the regression equation.

EXPERIMENTAL RESEARCH RESULTS

Laser cladding of the samples was carried out in optimal modes with a defocused beam and with transverse oscillations of the beam along the normal to the laser processing speed vector. The microhardness of the cladded coating was (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si), (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si + 5 wt% TiC), (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si + 10 wt% TiC) – 792–920, 870–998, 960–1270 HV. Fig. 1 (a, b) shows microsections of deposited tracks with an ultrafine titanium carbide content of 10 wt.% with dimensions 0.77×2.04 mm, and 0.79×4.26 mm, obtained by a defocused beam and a beam scanning at a frequency of 217 Hz, respectively.

The penetration zone of the base during processing with a defocused beam and a scanning beam was 174 and 56 μm , respectively, which indicates a high adhesion strength of the coating. The dimensions of the disordered blocks of the structure were 3–5 μm . The cross-sectional area of a single deposited layer when scanning the beam is 2.16 times larger than when cladding with a defocused beam.

The equation for determining the height of the roller without scanning, H , is:

$$H = 0,695 + 0,035x_1 - 0,0725x_2 + 0,0075x_1x_2 + 0,0125x_1x_3 - 0,01x_2x_3 + 0,01x_1x_2x_3. \quad (2)$$

покрытий составила (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si), (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si + 5об% TaC), (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si + 10об% TaC) – 670–750, 870–980, 960–1280 HV. На рис. 1(а, б) представлены микрошлифы наплавленных дорожек с содержанием нано карбида тантала 10 об.% с размерами 0,77×2,04 мм, и 0,79×4,26 мм, полученных расфокусированным лучом и сканирующим с частотой 217 Гц лучом соответственно.

Зона проплавления основы при обработке расфокусированным лучом и сканирующим лучом составила 174 и 56 мкм соответственно, что свидетельствует о высокой прочности сцепления покрытия. Размеры разупорядоченных блоков структуры составляли 3–5 мкм. Площадь поперечного сечения единичного наплавленного слоя при сканировании луча в 2,16 раза больше, чем при наплавке расфокусированным лучом.

Уравнение для определения высоты валика без сканирования, H имеет вид:

$$H = 0,695 + 0,035x_1 - 0,0725x_2 + 0,0075x_1 x_2 + 0,0125x_1 x_3 - 0,01x_2 x_3 + 0,01x_1 x_2 x_3. \quad (2)$$

Bead height when cladding with transverse beam vibrations, H_c :

$$H_c = 0,70125 + 0,03125x_1 - 0,04625x_2 + 0,00875x_3 + 0,01875x_1 x_3 + 0,01625x_2 x_3 + 0,00125x_1 x_2 x_3. \quad (3)$$

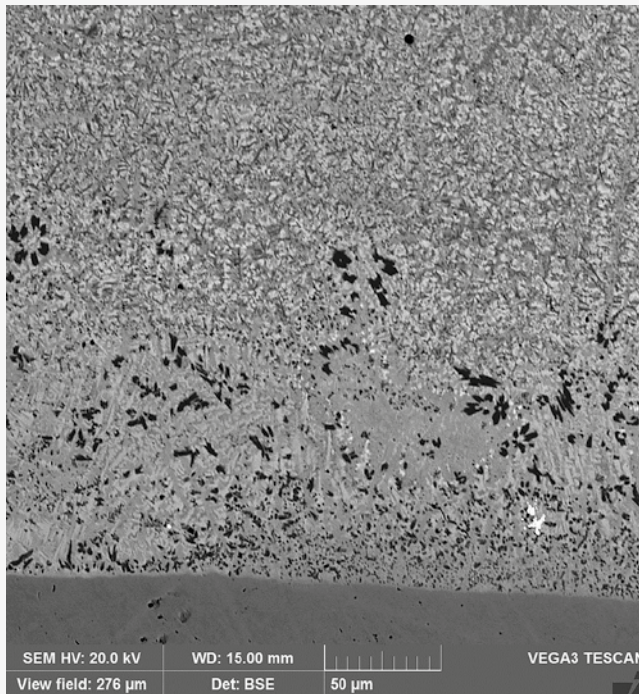
Width of the deposited bead without beam scanning, B :

$$B = 1,87375 + 0,11625x_1 - 0,09375x_2 + 0,06125x_3 - 0,02125x_1 x_2 + 0,00375x_2 x_3 - 0,00875x_1 x_2 x_3. \quad (4)$$

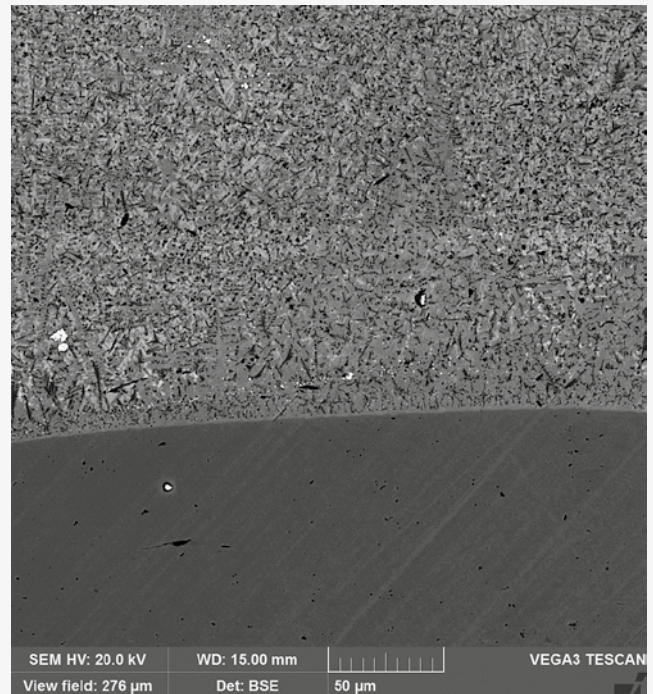
Width of deposited beads with transverse oscillations of the beam B_c :

$$B_c = 4,34625 + 0,43375x_1 - 0,26875x_2 + 0,11625x_3 - 0,26625x_1 x_2 - 0,03875x_2 x_3 + 0,02375x_1 x_2 x_3. \quad (5)$$

Calculations were carried out according to the regression equations (2–5), which were compared with the results of the experiment. The calculated values differ from the actual values of the depth and width of the hardening zones by no more than 2.98%.



a)



b)

Рис. 1. Микроструктуры наплавленных покрытий на сталь 45 с содержанием нано карбида тантала 10 об.%: а – наплавка расфокусированным лучом; б – наплавка сканирующим лучом

Fig. 1. Microstructures of deposited coatings on steel 45 with a nano tantalum carbide content of 10 wt.%. a – surfacing with a defocused beam; b – surfacing with a scanning beam

Высота валика при наплавке с поперечными колебаниями луча H_c :

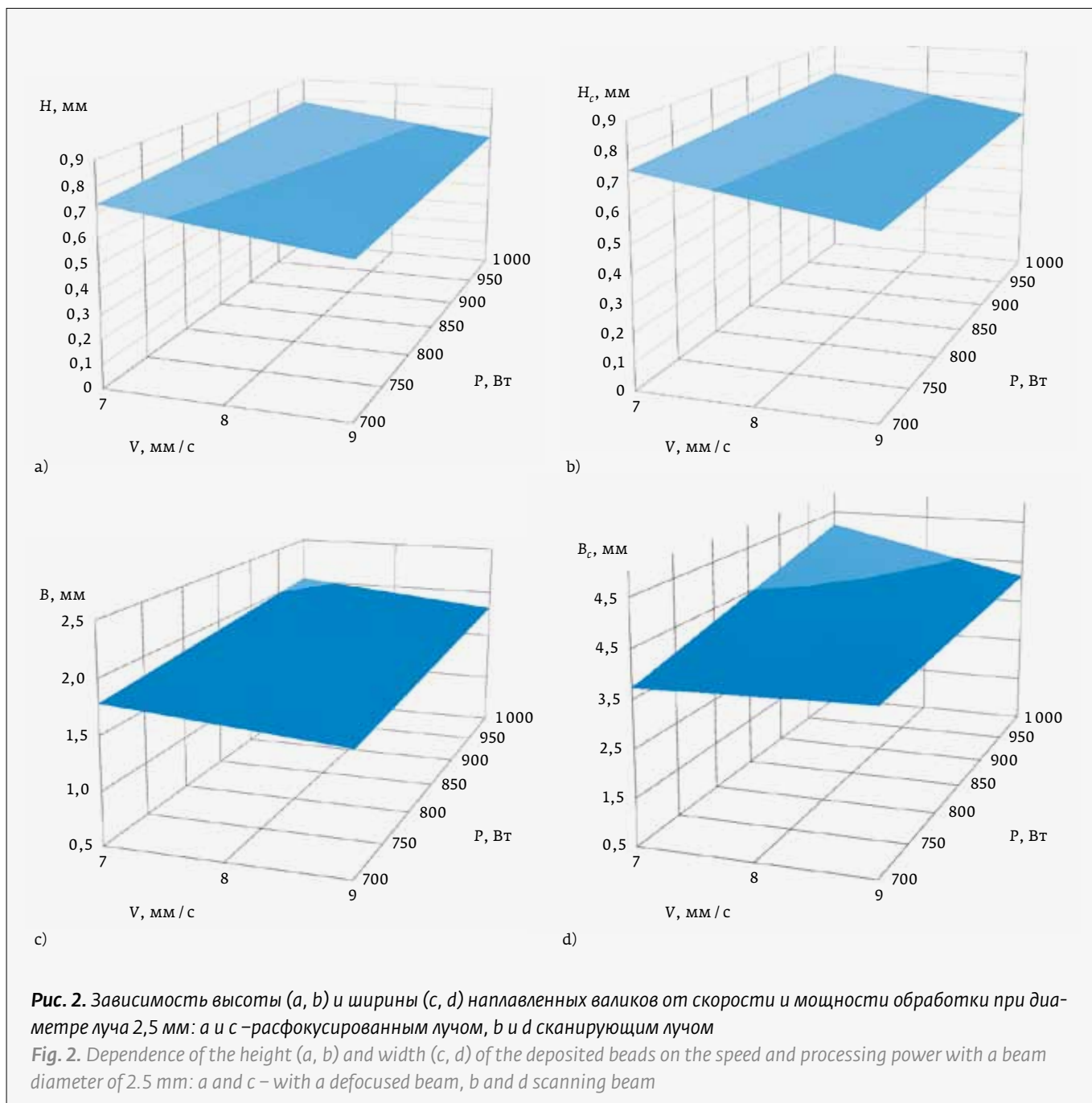
$$H_c = 0,70125 + 0,03125x_1 - 0,04625x_2 + 0,00875x_3 + 0,01875x_1 x_3 + 0,01625x_2 x_3 + 0,00125x_1 x_2 x_3. \quad (3)$$

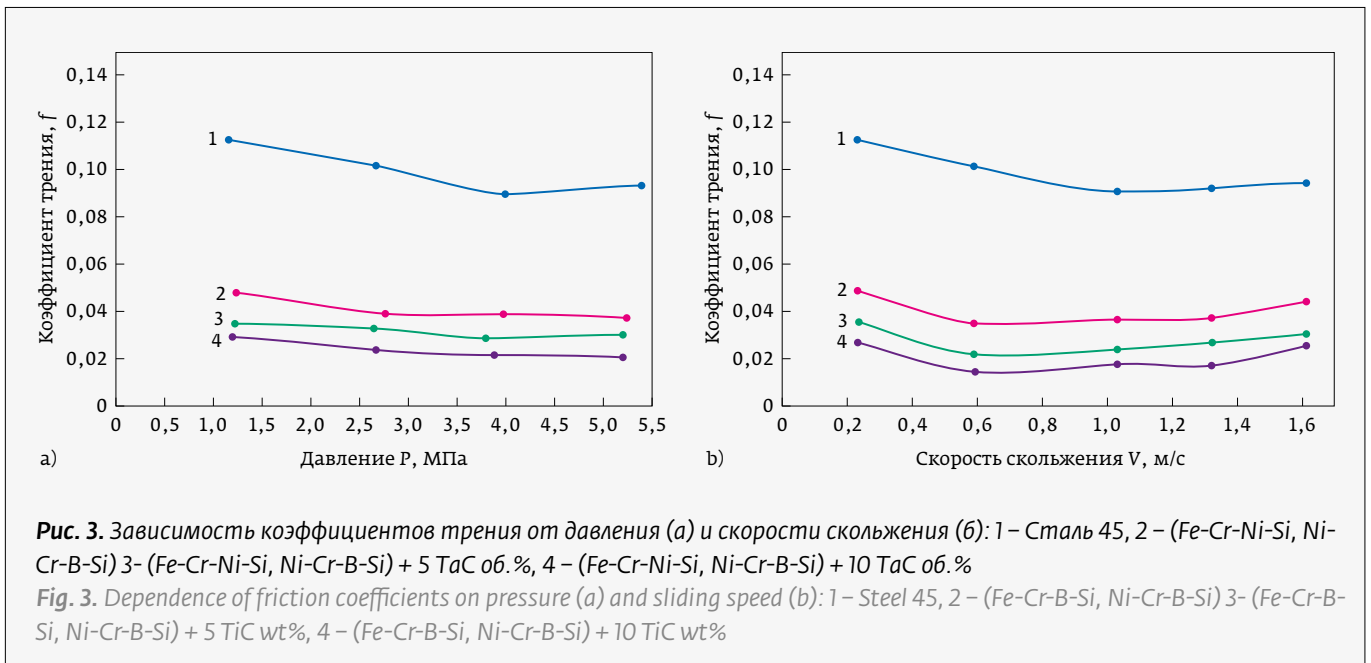
Ширина наплавленного валика без сканирования луча B :

$$B = 1,87375 + 0,11625x_1 - 0,09375x_2 + 0,06125x_3 - 0,02125x_1 x_2 + 0,00375x_2 x_3 - 0,00875x_1 x_2 x_3. \quad (4)$$

For dependences of the type $H(P, V)$, $B(P, V)$, comparative surfaces were constructed using the MsExcel program (Fig. 2) with a spot diameter of 2.5 mm.

The radiation power has the greatest influence on the geometrical parameters of the deposited beads. With increasing power, the width and height of the welded tracks grow. With increasing travel speed, the depth and width of the rollers decreases. With an increase in the diameter of the laser radiation, the height and width of the rollers increase.





Ширина наплавленных валиков с поперечными колебаниями луча V_c :

$$V_c = 4,34625 + 0,43375x_1 - 0,26875x_2 + 0,11625x_3 - 0,26625x_1 x_2 - 0,03875x_2 x_3 + 0,02375x_1 x_2 x_3. \quad (5)$$

The dependence of the friction coefficients of steel 45 in the hardened state and cladded coatings is shown in Fig. 3. One of the most important characteristics of friction units is a low coefficient of friction, which affects the indicators of fuel and lubricant consump-

Современным компаниям – инновационные решения!

Многоосевые координатные системы с высокими скоростями перемещений/вращений и прецизионной точностью

Компания **Aerotech**, США, широко известна во всем мире своими **уникальными решениями** в области многоосевых координатных систем с высокими скоростями перемещений/вращений и прецизионной точностью. Особый интерес для российских пользователей-экспериментаторов представляют, так называемые **кастомные системы** или, другими словами, **системы под конкретный заказ**.
 Нередко, пользователю нужны системы с **6-ю**, или даже **8-ю** степенями свободы. На фото представлена одна из таких систем с **8-ю** степенями свободы (**5 поступательных и 3 вращательных**) на гранитной основе, с гранитным порталом и тремя механическими платформами, собранными по гибридной схеме с механическими и «воздушными» подшипниками: **5-ть** поступательных и **3** вращательных. На гранитном портале размещаются платформы для параллельных процессов, что позволяет заметно **уменьшить площадь**, занимаемую координатной системой.
Области применения: подобная система может быть использована для высокоточной обработки материалов, программной микросборки и контроля процессов с помощью различных инструментов и многое другое.

Официальным представителем компании **Aerotech** (США) в РФ является компания **«ЕвроЛэйз»**.

www.eurolase.ru
ЕВРОЛЭЙЗ
 PHOTONICS

По уравнениям регрессии (2-5) проведены расчеты, которые сопоставлены с результатами эксперимента. Расчетные значения отличаются от фактических значений глубины и ширины зон закалки не более чем на 2,98%.

Для зависимостей типа $H(P, V)$, $B(P, V)$ построены сравнительные поверхности с помощью программы MsExcel (рис. 2) при диаметре пятна 2,5 мм.

Наибольшее влияние на геометрические параметры наплавленных валков имеет мощность излучения. С увеличением мощности растут ширина и высота наплавленных дорожек. С ростом скорости перемещения глубина и ширина валков уменьшается. С увеличением диаметра лазерного излучения высота и ширина валков растет.

Зависимость коэффициентов трения стали 45 в закаленном состоянии и наплавленных покрытий представлена на рис. 3. Одной из важнейших характеристик узлов трения является низкий коэффициент трения, который влияет на показатели расхода топлива и смазочных материалов при эксплуатации сельскохозяйственной техники. Как правило, пары трения с низким коэффициентом трения имеют более высокую нагрузку заедания. С увеличением нагрузки с 1,2 до 4,0 МПа на закаленные образцы стали 45 коэффициент трения падает с 0,11 и 0,09. При дальнейшем увеличении нагрузки для улучшенного образца коэффициент трения возрастает. Коэффициент трения для многокомпонентного покрытия изменяется в пределах 0,04-0,05. Минимальный коэффициент трения 0,018-0,025 получен на покрытии с добавками 10 об.% nano порошка TaC. С увеличением скорости скольжения (рис. 3, б) от 0,25 до 1,3 м/с, при нагрузке 2,0 МПа, коэффициент трения для стали 45 уменьшается с 0,11 до 0,092. При дальнейшем увеличении скорости до 1,6 м/с незначительно увеличивается. Для наплавленных покрытий в интервале 0,6-1,6 м/с коэффициент трения плавно возрастает.

На рис. 4 приведены закономерности изменения нагрузки заедания от скорости скольжения. Закаленные образцы стали 45 уступают наплавленным многокомпонентным покрытиям и с добавлением порошка nano карбида тантала. При давлении 5,5 МПа заедание наступает на скорости в 1,5-3 раза меньшей для закаленного образца стали 45 по сравнению с наплавкой многокомпонентным покрытием и с добавками 10 TaC об.% соответственно.

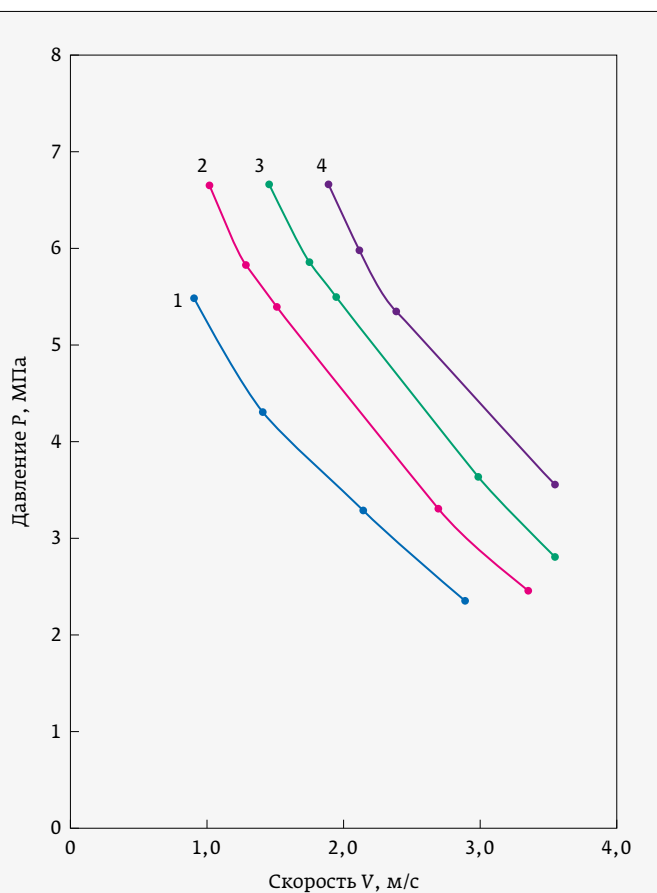


Рис. 4. Зависимость нагрузки заедания от скорости скольжения: 1 – Сталь 45, 2 – (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si) + 5 TaC об.%, 3 – (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si) + 10 TaC об.%, 4 – (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si) + 10 TiC об.%

Fig. 4. Dependence of the seizing load on the sliding speed: 1 – Steel 45, 2 – (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si) + 5 TiC mass%, 3 – (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si) + 5 TiC mass%, 4 – (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si) + 10 TiC mass%

tion during the operation of agricultural machinery. As a rule, friction pairs with a low coefficient of friction have a higher seizure load. With an increase in the load from 1.2 to 4.0 MPa on hardened samples of steel 45, the friction coefficient decreases from 0.11 and 0.09. With a further increase in the load for the improved specimen, the coefficient of friction increases. The coefficient of friction for a multi-component coating varies in the range of 0.04-0.05. The minimum friction coefficient of 0.018-0.025 was obtained on a coating with additives of 10 wt.% of TiC ultrafine powder. With an increase in the sliding speed (Fig. 3, b) from 0.25 to 1.3 m/s, with a load of 2.0 MPa, the friction coefficient for steel 45 decreases from 0.11 to 0.092. With a further increase in speed to 1.6 m/s, it increases slightly. For cladded coating in the range of 0.6-1.6 m/s, the friction coefficient increases smoothly.

На рис. 5. показаны интенсивности изнашивания закаленных образцов стали 45 и наплавленных покрытий. Износостойкость, величина обратная интенсивности изнашиванию, возрастает для многокомпонентного покрытия на 30% закаленную сталью 45 и на 57 и 67% по сравнению с с добавкой в шихту 5 и 10 об.% нанопорошка TaC соответственно.

Испытания на абразивное изнашивание при трении незакрепленным абразивным зерном образцов закаленной стали 65Г и с наплавленными на нее покрытиями (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si), (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si) + 5 TaC об.%, (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si) + 10 TaC об.% показали, что потери массы образцов составили $0,064 \cdot 10^{-4}$, $0,046 \cdot 10^{-4}$, $0,032 \cdot 10^{-4}$ и $0,028 \cdot 10^{-4}$ кг соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в работе результаты показывают, что повышение надёжности деталей основных агрегатов и рабочих органов сельскохозяйственной техники возможно при применении новых современных технологий нанесения покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, оказывающими существенное влияние на долговечность продукции сельхозмашиностроения.

Fig. 4 shows the regularities of the change in the seizing load from the sliding speed. Hardened samples of steel 45 are inferior to deposited multicomponent coatings and with the addition of ultrafine titanium carbide powder. At a pressure of 5.5 MPa, jamming occurs at a rate 1.6-3 times lower for a hardened sample of steel 45, in comparison with cladding with a multicomponent coating and with 10 TiC mass additives.% respectively.

In fig. 5. Shown are the wear rates of hardened specimens of steel 45 and deposited coatings. Wear resistance, which is the reciprocal of the wear rate, increases for many component coatings by 1.4 times as compared to hardened steel 45 and by 2.4 and 3 times as compared to the addition of 5 and 10 wt% TiC ultrafine powder to the charge, respectively.

Tests for abrasive wear during friction with a loose abrasive grain of samples of hardened steel 65G and with coatings deposited on it (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si), (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si) + 5 TiC mass%, (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si) + 10 TiC mass% showed that the weight loss of the samples was $0.064 \cdot 10^{-4}$, $0.046 \cdot 10^{-4}$, $0.033 \cdot 10^{-4}$ and $0.029 \cdot 10^{-4}$ kg, respectively.

DISCUSSION OF THE RESULTS

The results obtained in the work show that an increase in the reliability of parts of the main units and working

ЭССЕНТОПТИКС  ESSENTOPTICS

PHOTON RT

Спектрофотометр для Оптиков | Spectrophotometer for Coaters



185 – 5200 nm

УНИКАЛЬНО ШИРОКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ
ДИАПАЗОН В ОДНОМ ПРИБОРЕ

—
WORLD-RECORD WAVELENGTH RANGE
IN ONE INSTRUMENT

ООО «ЭссентОптикс»

23а-81, ул. 40 лет Победы, Боровляны, Минская обл., Минский р-н, 223053 Беларусь
Тел.: +375-17-5112025 | Факс: +375-17-5112026 | www.essentoptics.com

Лазерная наплавка многокомпонентных покрытий, с добавлением nano порошка карбида тантала, может быть использована при восстановлении изношенных кулачковых и коленчатых валов, поршневых пальцев, посадочных мест валов под подшипники качения и других деталей сельхозмашин. Кроме того, эта технология может применяться для повышения износостойкости почвообрабатывающих орудий, лемехов, дисковых борон, лап культиваторов, которые изготавливаются из сталей 45 и 65Г. Потери на простой сельскохозяйственных машин в период выполнения сезонных полевых работ, связанных с уборкой и возделыванием сельхозкультур приводят к значительным экономическим затратам.

Большое значение для эффективной работы лап культиваторов и дисковых борон имеет эффект самозатачивания режущей кромки. Применение технологии лазерной наплавки многокомпонентными материалами с добавлением nano порошка карбида тантала с толщиной слоя 0,5-0,8 мм практически не изменяет геометрию режущих кромок и в то же время обеспечивает самозатачивание орудий. Введение в состав шихты порошка на основе никеля значительно повысит коррозионную стойкость покрытий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология лазерной наплавки многокомпонентных покрытий с добавками nano карбида тантала 5 и 10 об.%. Износостойкость этих покрытий значительно выше закаленной стали 45. При скорости скольжения 2,5 м/с давление заедания наплавленных покрытий с nano карбидами было в 1,8-2,5 раза выше по сравнению с закаленной сталью 45. Покрытия с nano карбидами тантала имели низкие коэффициенты трения 0,02-0,034.

REFERENCES

1. **Shaoxiang Q., Yongkang Z., Yibo D. et al.** Microstructure and Mechanical Properties of Nickel-Based Coatings Fabricated through Laser Additive Manufacturing. *Metals*. 2021;11:53-66. <https://doi.org/10.3390/met11010053>.
2. **De Sousa J. M.S., Ratusznei F., Pereira M. et al.** Abrasion resistance of Ni-Cr-B-Si coating deposited by laser cladding process. *Tribology International*. 2020; 143:106002. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106002>.
3. **Hu G., Yang Y., Qi K. et al.** Investigation of the Microstructure and Properties of NiCrBSi Coating Obtained by Laser Cladding with Different Process Parameters. *Trans Indian Inst. Met.* 2020;73:2623-2634. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02065-w>.
4. **Saeedi R., Razavi R. S., Bakhshi S. R. et al.** Optimization and characterization of laser cladding of NiCr and NiCr-TiC composite coatings on AISI 420 stainless steel. *Ceramics International*. 2021;47: 4097-4110. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.284>.
5. **Bartkowski D., Bartkowska A., Jurčí P.** Laser cladding process of Fe/WC metal matrix composite coatings on low carbon steel using

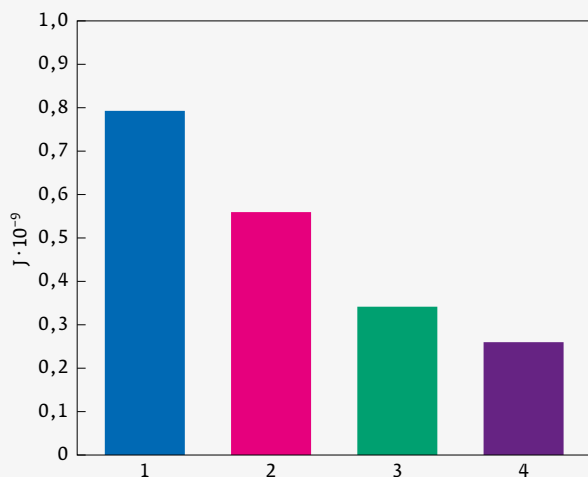


Рис. 5. Интенсивности изнашивания образцов:

1 – Сталь 45, 2 – (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si) 3- (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si) + 5 TaC об.%, 4 – (Fe-Cr-Ni-Si, Ni-Cr-B-Si) + 10 TaC об.%

Fig. 5. Wear rates of samples: 1 – Steel 45, 2 – (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si) 3- (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si) + 5 TiC mass%, 4 – (Fe-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si) + 10 TiC mass%

bodies of agricultural machinery is possible with the use of new modern technologies for applying coatings with high performance characteristics, which have a significant impact on the durability of agricultural machinery products.

Laser cladding of multicomponent coatings, and with the addition of ultradispersed titanium carbide powder, can be used for the restoration of worn camshafts and crankshafts, piston pins, shaft seats for rolling bearings and other parts of agricultural machinery. Furthermore, this technology can be used to increase the wear resistance of tillage implements, plowshares, disc harrows, cultivator paws, which are made of 45 and 65G steels. Losses on idle time of agricultural machines during the period of seasonal field work associated with harvesting and cultivation of agricultural crops lead to significant economic costs.

The effect of self-sharpening of the cutting edge is of great importance for the effective operation of the tines of cultivators and disc harrows. The use of laser cladding technology with multicomponent materials with the addition of ultradispersed titanium carbide powder with a layer thickness of 0.5-0.8 mm practically does not change the geometry of the cutting edges and at the same time ensures self-sharpening of tools. The introduction of a nickel-based powder into the composition of the charge will significantly increase the corrosion resistance of the coatings.



- Yb : YAG disk laser. *Optics and Laser Technology*. 2021;136: 106784. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106784>.
6. **Bartkowski D., Bartkowska A.** Wear resistance in the soil of Stellite-6 / WC coatings produced using laser cladding method. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2017;64:20–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.12.013>
 7. **Wang K, Chang B, Lei Y. et al.** Effect of Cobalt on Microstructure and Wear Resistance of Ni-Based Alloy Coating Fabricated by Laser Cladding. *Metals*. 2017;7:551. <https://doi.org/10.3390/met7120551>.
 8. **Fan L., Chen H., Dong Y. et al.** Wear and corrosion resistance of laser-cladded Fe-based composite coatings on AISI 4130 steel. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2018;25: 716–728. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1619-2>.
 9. **Kaiming W., Yulong L., Hanguang F.** A study of laser cladding NiCrBSi / Mo composite coatings. *Surface Engineering*. 2018; 34: 267–275. <https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1259096>.
 10. **Lian G., Zhang H., Zhang Y.** Computational and Experimental Investigation of Micro-Hardness and Wear Resistance of Ni-Based Alloy and TiC Composite Coating Obtained by Laser Cladding. *Materials*. 2019;12:793–819. <https://doi.org/10.3390/ma12050793>.

АВТОР

Бирюков Владимир Павлович – к. т. н., laser-52@yandex.ru, научный сотрудник, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

CONCLUSION

The technology of laser cladding of multicomponent coatings with additions of ultrafine powder of titanium carbide 5 and 10 wt.% Has been developed. The wear resistance of the coatings is 1.4 times higher than that of hardened steel 45 and 2.4 and 3 times higher than the addition of 5 and 10 wt% TiC to the charge, respectively. At a sliding speed of 2.5 m/s, the seizing pressure of cladded coating with nano carbides was 1.8–2.5 times higher than that of hardened steel 45. Coatings with ultradispersed carbides had friction coefficients of 0.018–0.033. The abrasive wear resistance of the coating with 10 wt% TiC is 2.2 times higher than the hardened steel 65C.

ABOUT AUTHOR

Biryukov Vladimir, Candidate of Technical Sciences, laser-52@yandex.ru, Senior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russia

Победители конкурса Лазерной ассоциации дипломных работ в области лазерной техники и технологий 2021 года (участники – выпускники 2020 года)

Магистры

1. В номинации «Новый принцип»: **Колмаков Александр Андреевич** (Томск, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники).

Агрегирование диэлектрических наночастиц на поверхности кристаллов нано-бата лития электрическими полями, наведенными засветкой лазерными пучками.
Руководитель – д. ф.-м. н., проф. Шандаров Сергей Михайлович.

2. В номинации «Лучшее конструкторское решение»: **Ермаков Александр Сергеевич** (Саранск, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва).

Апконверсионные фторидные материалы для увеличения эффективности солнечных батарей.

Руководитель – к. ф.-м. н., доц. Ляпин Андрей Александрович.

3. В номинации «Лучшее технологическое решение»: **Сердюк Ксения Владимирович** (Санкт-Петербург, Государственный университет аэрокосмического приборостроения).

Оптический дифракционный призмный спектральный прибор.

Руководитель – к. т. н., доц. Москалец Олег Дмитриевич.

4. В номинации «Лучшее инновационное решение»: **Ни Роман Вячеславович** (Томск, Томский государственный университет).

Формирование псевдоизображений кожного покрова человека по данным измерений элементов матрицы обратного рассеяния.

Руководитель – д. ф.-м. н., проф. Самохвалов Игнатий Викторович.

Бакалавры

1. В номинации «Новый принцип»: **Цюрко Дмитрий Евгеньевич** (Оренбург, Оренбургский государственный университет).

Генерация и распространение акустических волн в конденсированных средах.

Руководитель – д. ф.-м. н., проф. Летута Сергей Николаевич.

2. В номинации «Лучшее конструкторское решение»: **Гнеушев Роман Юрьевич** (Орел, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева).

Устройство для диагностики патологий верхнечелюстных пазух носа.

Руководитель – к. т. н., доц. Дрёмин Виктор Владимирович.

3. В номинации «Лучшее технологическое решение»: **Лещева Александра Сергеевна** (Казань, Казанский научно-исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ).

Термическая обработка образцов из сплава РН1, полученного методом селективного лазерного плавления.

Руководитель – к. т. н., доц. Горунев Андрей Игоревич.

4. В номинации «Лучшее инновационное решение»: **Халхаров Доржи Дашиевич** (Томск, Томский государственный университет).

Метод дистанционного измерения концентрации паров щелочных металлов в мезосфере по интенсивности сигналов резонансной флуоресценции.

Руководитель – д. ф.-м. н., доц. Бобровников Сергей Михайлович.