



Влияние лазерного легирования и наплавки на механические и триботехнические свойства поверхностей сталей

В. П. Бирюков

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

В работе представлены результаты металлографических и триботехнических исследований образцов стали 20Х13 легированной с помощью лазерного луча порошком Fe-Cr-V-W-Mo и с добавлением в шихту 5 об. % nano-порошка карбида тантала. Элементный анализ показал, что легирующие элементы, находящиеся в шихте распределены равномерно по глубине слоя. Поперечные колебания лазерного луча привели к повышению производительности процесса лазерного легирования. В результате анализа результатов триботехнических испытаний, установлено, что легированные слои имели более низкие коэффициенты трения при добавке в шихту nano карбидов тантала, и более высокую износостойкость по сравнению с основной шихтой и исходной сталью.

Ключевые слова: лазерное легирование, триботехника, микроструктурирование поверхности, энергетическое оборудование

Статья получена: 04.07.2022

Статья принята: 29.08.2022

ВВЕДЕНИЕ

Контролируемое формирование определенного микроструктурного состояния в поверхностных слоях за счет введения различных добавок в шихту карбидов, оксидов и нитридов металлов, полу-

The Effect of Laser Alloying and Surfacing on the Mechanical and Tribotechnical Properties of Steel Surfaces

V. P. Biryukov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The paper presents the results of metallographic and tribotechnical studies of the samples of 20Kh13 steel alloyed with Fe-Cr-V-W-Mo powder using a laser beam and with the addition of 5 vol. % nano-powder of tantalum carbide to the charge. Elemental analysis showed that the alloying elements in the charge are distributed evenly over the depth of the layer. Transverse oscillations of the laser beam led to an increase in the productivity of the laser alloying process. The analysis of the tribotechnical tests results revealed that the alloyed layers had lower friction coefficients when adding tantalum nano carbides to the charge, and higher wear resistance compared to the main charge and the initial steel.

Key words: laser alloying, triboengineering, surface microstructuring, power equipment

The article received: 04.07.2022

The article is accepted: 29.08.2022

INTRODUCTION

Controlled formation of a certain microstructural state in the surface layers due to the introduction of various additives into the charge of carbides, oxides and nitrides of metals obtained by laser alloying and surfacing can significantly increase the service life of machine parts and structural elements of power equipment [1]. Laser surface alloying is aimed at changing the microstructure and composition of the near-surface region of the substrate by smelting it with a high-power beam and a powder mixture to form a zone with

ченных лазерным легированием и наплавкой, могут значительно увеличить срок службы деталей машин и конструктивных элементов энергетического оборудования [1]. Лазерное поверхностное легирование направлено на изменение микроструктуры и состава приповерхностной области подложки путем ее плавления лучом высокой мощности и порошковой смеси для формирования зоны с новыми улучшенными характеристиками [2, 3]. Добавление керамических частиц в железо (Fe) матрицу позволяет сочетать в себе преимущества высокой твердости и износостойкости керамических частиц и превосходной ударной вязкости матрицы Fe, что является эффективным способом повышения ресурса работы конструкционных сталей [4–6].

На образец из нержавеющей стали AISI 304 [7] размером $50 \times 30 \times 5$ мм было нанесено шликерное покрытие порошком TiC с размером частиц 10–14 мкм с органическим связующим толщиной 150 мкм. Обработку выполняли на импульсном YAG лазере (ALPHALASER, Германия) с максимальной мощностью 200 Вт, с частотой импульсов в диапазоне 0,5–20 Гц, диаметром луча 1,5 мм. Пиковая мощность составляла 1–3,5 кВт. Среднее значение микротвердости составило 800–1200, 500–800, 400–600, 380–680, 550–600 $HV_{0,05}$ для образцов, обработанных с пиковой мощностью излучения 1–1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5 кВт соответственно. Средняя твердость поверхности из нержавеющей стали 304 ($220 HV_{0,05}$) повышается до 400–1200 $HV_{0,05}$ в зависимости от параметров лазерной обработки.

Материалом подложки была нержавеющая сталь [8] марки 304 с размерами $50 \times 50 \times 6$ мм. Порошки для лазерного легирования Al, Si, Ti, Ni и WC(10, 20, 30%) с размером частиц 20–50 мкм смешивали в вакуумной шаровой мельнице в течение 2 ч. Шликерное покрытие наносили толщиной 0,7 мм со связующим веществом, содержащим ацетат целлюлозы, и сушили в печи при 80 °C в течение 1 часа. Лазерное легирование образцов выполняли при мощности излучения волоконного лазера (YLS-5000, IPG Photonics) 1800 Вт, диаметре луча 3 мм, скорости его перемещения 0,01 м/с. Триботехнические испытания легированных образцов выполняли на машине трения Brooks, без смазочного материала по схеме «шар (WC диаметром 9,5 мм, твердостью 1700 HV)-диск (исследуемый образец)», при комнатной температуре, с нагрузкой 100 Н, линейной скоростью скольжения 0,031 м/с, с радиусом скольжения 3 мм и пути трения 56,5 м. Средняя микротвердость покрытия с 20% WC составляет 960,5 $HV_{0,2}$, что в 4,4 раза

new improved characteristics [2, 3]. The addition of ceramic particles to the iron (Fe) matrix allows combining the advantages of high hardness and wear resistance of ceramic particles and excellent impact strength of the Fe matrix, which is an effective way to increase the service life of structural steels [4–6].

The slurry coating with TiC powder with a particle size of 10–14 μm with an organic binder 150 μm thick was applied to the AISI 304 stainless steel sample with dimensions $50 \times 30 \times 5$ mm [7]. The treatment was performed on a pulsed YAG laser (ALPHALASER, Germany) with a maximum power of 200 W, with a pulse frequency in the range of 0.5–20 Hz, with a beam diameter of 1.5 mm. The peak power was 1–3.5 kW. The average microhardness was 800–1200, 500–800, 400–600, 380–680, 550–600 $HV_{0,05}$ for samples treated with peak radiation power 1–1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 kW, respectively. The average surface hardness of 304 ($220 HV_{0,05}$) stainless steel increases to 400–1200 $HV_{0,05}$ depending on the laser treatment parameters.

The substrate material was 304 grade stainless steel [8] with dimensions of $50 \times 50 \times 6$ mm. Powders for laser alloying of Al, Si, Ti, Ni and WC (10, 20, 30%) with a particle size of 20–50 μm were mixed in a vacuum ball mill for 2 hours. The slurry coating was applied 0.7 mm thick with a binder containing cellulose acetate and dried in an oven at 80 °C for 1 hour. Laser alloying of the samples was performed at a fiber laser radiation power (YLS-5000, IPG Photonics) of 1800 W, a beam diameter of 3 mm, and its travel speed of 0.01 m/s. Tribotechnical tests of the alloyed samples were performed on a Brooks friction machine, without lubricant according to the «ball (WC with a diameter of 9.5 mm, hardness of 1700 HV)-disk (test sample)» scheme, at room temperature, with a load of 100 N, linear sliding speed of 0.031 m/s, with a sliding radius of 3 mm and the friction distance of 56.5 m. The average microhardness of a coating with 20% WC is 960.5 $HV_{0,2}$, which is 4.4 times greater than that of the substrate and much higher than that of a coating without WC. With an increase in the WC content, the maximum coefficient of friction of the coatings increases. The coating with 20% WC has the lowest wear degree, which is mainly associated with abrasive wear.

An 8 mm thick steel plate made of 304 grade stainless steel was used as the substrate material [9]. Tungsten carbide (WC) and 316 L stainless steel powders with particle sizes of 15–100 microns were used for laser surfacing. For processing, an IPG fiber laser with a power of 10 kW, an optical head with a coaxial nozzle for feeding of powder, a GTV powder feeder with two hoppers and a KUKA robot for controlling the position of the head were used. The diameter of the laser beam



больше, чем у подложки, и намного выше, чем у покрытия без WC. С увеличением содержания WC увеличивается максимальный коэффициент трения покрытий. Покрытие с 20% WC обладает самой низкой степенью износа, которая в основном связана с абразивным износом.

В качестве материала подложки [9] использовалась стальная пластина толщиной 8 мм из нержавеющей стали марки 304. Для лазерной наплавки были использованы порошки карбида вольфрама (WC) и из нержавеющей стали 316 Л с размерами частиц 15–100 мкм. Для обработки применяли волоконный лазер IPG мощностью 10 кВт, оптическую головку с коаксиальным соплом для подачи порошка, устройство подачи порошка GTV с двумя бункерами и робот KUKA для управления положением головки. Диаметр лазерного луча составлял 2,2 мм. Длина прохода составляла 60 мм. После нанесения первого слоя головка перемещалась вертикально вверх на 0,6 мм. Микротрещины можно было обнаружить в композитах после нанесения пяти слоев при мощности излучения лазера 800 Вт, скорости перемещения головки 0,3 м/мин, и содержании 16,7% WC.

Для экспериментов использовали пластины из мягкой стали [10] A36 с размерами 75×60×10 мм. Порошки стали AISI 420+VC (10, 20, 30, 40 мас. %) перемешивали в течение 12 ч для достижения равномерного распределения. Для процесса наплавки был использован диодный лазер мощностью 8 кВт с длиной волны 975 нм и 6-осевой робот KUKA. Обработку выполняли при мощности лазера 3200 Вт, скорости сканирования 5 мм/с и расходе порошка 0,618 г/с. Для предварительного нагрева подложки была выбрана температура 250 °С. Коэффициент перекрытия лазерных треков составлял 25%. Увеличение содержания VC приводило к увеличению микротвердости матрицы. Эрозионная стойкость AISI 420 SS увеличивалось с увеличением доли VC. Однако улучшения не наблюдалось, когда доля VC была выше 30 мас. %.

Для выполнения лазерной наплавки [11] были использованы порошки из стали AISI 431, изготовленных с помощью распыления водой, с размерами частиц 69–101 мкм, и из стали AISI 316L, изготовленных распылением газом, с размерами частиц 45–106 мкм. В качестве подложки использовали углеродистую сталь ASTM A-36 в виде пластины толщиной 6,35 мм. Для лазерной наплавки был взят дисковый лазер (TruDisk 6002, Thumpf Inc) с максимальной мощностью 6000 Вт и диаметром волокна 200 мкм. Система перемещения состояла из высокоточного робота (модель KR 60 HA, KUKA) и дис-

was 2.2 mm. The length of the passage was 60 mm. After applying the first layer, the head moved vertically upwards by 0.6 mm. Microcracks could be detected in composites after applying five layers at a laser radiation power of 800 W, a head movement speed of 0.3 m/min, and a content of 16.7% WC.

For experiments, plates made of mild steel [10] A36 with dimensions of 75×60×10 mm were used. Steel powders AISI 420 + VC (10, 20, 30, 40 wt%) were mixed for 12 hours to achieve uniform distribution. An 8 kW diode laser with a wavelength of 975 nm and a 6-axis KUKA robot were used for the surfacing process. The treatment was performed at a laser power of 3200 W, a scanning speed of 5 mm/s and a powder consumption of 0.618 g/s. A temperature of 250 °C was selected for preheating of the substrate. The overlap coefficient of the laser tracks was 25%. An increase in the VC content led to an increase in the microhardness of the matrix. The erosion resistance of AISI 420 SS increased with an increase in the proportion of VC. However, no improvement was observed when the VC share was above 30% wt.

To perform laser surfacing [11], powders were used from AISI 431 steel, made by spraying with water, with particle sizes 69–101 μm, and from AISI 316L steel, made by gas spraying, with particle sizes 45–106 μm. Carbon steel ASTM A-36 was used as a substrate in the form of a 6.35 mm thick plate. A disk laser (TruDisk 6002, Thumpf Inc) with a maximum power of 6000 W and a fiber diameter of 200 μm was used for laser surfacing. The moving system consisted of a high-precision robot (model KR 60 HA, KUKA) and a disk powder feeding system (model PF21-GTV). The laser head is manufactured at the Fraunhofer Institute of Laser Technology (ILT) with built-in autofocus to maintain a constant distance of 25 mm from the sample surface. Processing was performed at a power of 800, 1000, 1400 and 1600 W and 1900, 2100, 2400 and 2600 W for AISI 431 and AISI 316L steels, respectively, and scanning speeds of 9, 14 and 16 mm/s with a beam diameter of 3.2 mm. For the AISI 316L filler metal, higher values of the mixing coefficient from 15 to 41% were obtained. For surfacing powder made out of AISI 431 stainless steel, the use of power values of 1400 and 1600 W at scanning speeds of 9, 14 and 16 mm/s allowed to obtain from 10 to 20% of the mixing coefficient of the base material with the additive. The microhardness was $522 \pm 4 \text{ HV}_{0.5}$ and $356 \pm 12 \text{ HV}_{0.5}$ for coatings with AISI 431 and AISI 316L powders, respectively.

The substrate material in the study [12] was a 35CrMo steel plate with a diameter of 150 mm and a thickness of 15 mm. Three types of new stainless steel powder systems obtained by vacuum spraying were used as



ковой системы подачи порошка (модель PF21-GTV). Лазерная головка изготовлена в институте лазерных технологий Фраунгофера (ILT) со встроенным автофокусом, для поддержания постоянным расстояния 25 мм от поверхности образца. Обработку выполняли на мощностях 800, 1000, 1400 и 1600 Вт и 1900, 2100, 2400 и 2600 Вт для сталей AISI 431 и AISI 316L соответственно и скорости сканирования 9, 14 и 16 мм/с при диаметре луча 3,2 мм. Для присадочного металла AISI 316L были получены более высокие значения коэффициента перемешивания от 15 до 41%. Для наплавочного порошка из нержавеющей стали AISI 431 использование значений мощностей 1400 и 1600 Вт при скоростях сканирования 9, 14 и 16 мм/с позволило получить от 10 до 20% коэффициента перемешивания основного материала с присадочным. Микротвердость составила $522 \pm 4 \text{ HV}_{0,5}$ и $356 \pm 12 \text{ HV}_{0,5}$ для покрытий порошками AISI 431 и AISI 316L соответственно.

Материалом подложки в исследовании [12] была стальная пластина 35CrMo с диаметром 150 мм толщиной 15 мм. В качестве сырья для лазерной наплавки были использованы три типа новых порошковых систем из нержавеющей стали, полученных методом вакуумного распыления. Полученные частицы порошка из нержавеющей стали имели сферическую форму с размером в диапазоне 60–150 мкм. Порошковые смеси изготавливали с добавлением 9, 12 и 15 мас. % VC. Обработку проводили при мощности лазерного луча 2,2 кВт, диаметре пятна 4 мм, скорости сканирования 8 мм/с, с шагом 2 мм, при расходе порошка 18 г/мин. Испытания образцов на износ проводились в условиях сухого трения с использованием машины возвратно-поступательного движения (MFT 4000) по схеме «шар (сталь GCr15 диаметром 5 мм) – плоскость (испытываемый образец)» с длиной хода 7 мм, нормальной нагрузкой 15 Н, скоростью скольжения 150 мм/мин, продолжительностью 1 час. Микротвердость покрытий увеличивалась с повышением содержания VC и составила 521, 565, 603 HV при его содержании 9, 12, 15% соответственно. Образцы с содержанием в шихте 12% VC показали самую высокую износостойкость и низкий коэффициент трения 0,7 по сравнению с покрытиями, имеющими 9 и 15% VC.

Порошки сплавов на основе железа [13] состояли из 26,00 мас. % FeTi30 (180–380 мкм и 23–38 мкм), 16,57 мас. % FeV50 (180–380 мкм и 20–38 мкм), 6,23 мас. % графита (180–380 мкм и 0,8–1,2 мкм, чистота 99,50%) и 51,20 мас. % порошков чистого железа (180–380 мкм). Смешанные порошки предварительно нанесли на поверхность из низкоуглеродистой стали

raw materials for laser surfacing. The resulting stainless steel powder particles had a spherical shape with a size in the range of 60–150 μm . Powder mixtures were made with the addition of 9, 12 and 15%wt. VC. The treatment was carried out at a laser beam power of 2.2 kW, a spot diameter of 4 mm, a scanning speed of 8 mm/s, in increments of 2 mm, with a powder consumption of 18 g/min. Wear tests of the samples were carried out under dry friction conditions using a reciprocating machine (MFT 4000) according to «ball (steel GCr15 with a diameter of 5 mm) and plate (test sample)» scheme with a stroke length of 7 mm, normal load of 15 N, sliding speed of 150 mm/min, duration of 1 hour. The microhardness of the coatings increased with an increase in the VC content and amounted to 521, 565, 603 NV with its content of 9, 12, 15%, respectively. Samples with a charge content of 12%VC showed the highest wear resistance and a low coefficient of friction of 0.7 compared to coatings having 9 and 15% VC.

Iron-based alloy powders [13] consisted of 26.00% wt. of FeTi30 (180–380 μm and 23–38 μm), 16.57%wt. of FeV50 (180–380 μm and 20–38 μm), 6.23%wt. of graphite (180–380 μm and 0.8–1.2 μm , purity 99.50%) and 51.20%wt. of pure iron powders (180–380 μm). The mixed powders were pre-applied to a surface made of low-carbon steel with a thickness of about 1.0 mm using a binder made of sodium silicate. The laser coating was applied using a LASERLINE LDF-4000 semiconductor laser. The surfacing was performed with a laser beam diameter of 4 mm, a laser power of 2050 W, a scanning speed of 5 mm/s and an overlap coefficient of 25%. Metallographic studies have shown that layers of laser surfacing based on iron were obtained, reinforced with micro and submicro/nano-carbides TiC-VC with dimensions of 0.09–0.43 μm . The microstructure of the deposited layer consisted entirely of lamellar martensite. The hardness of the facing layer increased slightly, but the corrosion resistance increased significantly due to the formation of a passivating film and the fine crushing of carbides.

The coating material [14] was prepared from iron-based powder (80 wt.%, average particle size ~103.76 μm), B_4C powder (purity >99.5%, 10 wt.%, average particle size ~80.30 μm) and Nb powder (purity >99.5%, 10 wt.%, average particle size ~80.88 μm). Laser surfacing was performed by coaxially feeding of the powder onto a medium-carbon steel substrate. After the experiment, test samples with a size of 20×10×10 mm were cut out.

The sliding friction test was carried out on a multifunctional material surface properties tester (MFT-4000, China) at a normal load of 10 N, a reciprocating dis-



толщиной около 1,0 мм с использованием связующего из силиката натрия. Нанесение лазерного покрытия выполнялось полупроводниковым лазером LASERLINE LDF-4000. Наплавку выполняли при диаметре лазерного луча 4 мм, мощности лазера 2050 Вт, скорости сканирования 5 мм/с и коэффициенте перекрытия 25%. Металлографические исследования показали, что получены слои лазерной наплавки на основе железа, армированы микро и субмикро/нано-карбидами TiC-VC с размерами 0,09–0,43 мкм. Микроструктура наплавленного слоя полностью состояла из пластинчатого мартенсита. Твердость облицовочного слоя незначительно увеличилась, однако значительно возросла коррозионная стойкость из-за образования пассивирующей пленки и измельчения карбидов.

Материал для нанесения покрытия [14] был приготовлен из порошка на основе железа (80 мас. %, средний размер частиц ~103,76 мкм), порошка B_4C (чистота >99,5%, 10 мас. %, средний размер частиц ~80,30 мкм) и порошка Nb (чистота >99,5%, 10 мас. %, средний размер частиц ~80,88 мкм). Лазерную наплавку выполняли при коаксиальной подаче порошка на подложку из среднеуглеродистой стали. После эксперимента были вырезаны тестовые образцы размером 20×10×10 мм.

Испытание на трение скольжение проводили на многофункциональном тестере свойств поверхности материалов (MFT-4000, Китай) при нормальной нагрузке 10 Н, расстоянии возвратно-поступательного движения 5 мм, скорости скольжения 220 мм/мин, времени 40 минут и температуре 25 ± 1 °С. Материалом контртела пары трения был шар из циркония (твердость: HRC > 90) диаметром 5 мм. Основными фазами в покрытии на основе железа были твердые растворы Fe-Cr, с включениями Nb и B_4C и с равномерно распределенными NbC и Fe_2B . Твердость композитного покрытия составляла 866,36 HV_{0,5}, что в 3,95 и 4,16 раза выше, чем у подложки и покрытий на основе железа, соответственно. Образующийся в структуре измельченные зерна NbC и Fe_2B способствуют повышению твердости покрытия. Средний коэффициент трения композитного покрытия составлял 0,405, что в 0,775 раза меньше, чем у покрытия на основе железа, и в 0,879 раза меньше, чем у подложки. Механизм износа покрытия изменился с абразивного износа на адгезионный износ из-за добавления порошков Nb и B_4C .

Целями нашей работы было определение влияния состава порошковой шихты при легировании стали и триботехнических свойств упрочненных образцов.

tance of 5 mm, a sliding speed of 220 mm/min, a time of 40 minutes and a temperature of 25 ± 1 °С. The material of the friction pair counterbody was a zirconium ball (hardness: HRC > 90) with a diameter of 5 mm. The main phases in the iron-based coating were Fe-Cr solid solutions, with inclusions of Nb and B_4C and with evenly distributed NbC and Fe_2B . The hardness of the composite coating was 866.36 HV_{0,5}, which is 3.95 and 4.16 times higher than that of the substrate and iron-based coatings, respectively. The crushed grains of NbC and Fe_2B formed in the structure contribute to an increase in the hardness of the coating. The average friction coefficient of the composite coating was 0.405, which is 0.775 times less than that of the iron-based coating, and 0.879 times less than that of the substrate. The wear mechanism of the coating has changed from abrasive wear to adhesive wear due to the addition of Nb and B_4C powders.

The purpose of our work was to determine the influence of the powder charge composition during steel alloying and the tribotechnical properties of the hardened samples.

THE EQUIPMENT AND RESEARCH METHODS

20Kh13 steel samples with dimensions of 12×20×70 mm were used for laser alloying. The samples were processed at the automated laser technological complex of the Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences. A slurry coating of Fe-Cr-V-W-Mo powders was applied to the surface of the samples and with the addition of 5 vol.% nano-powder of tantalum carbide (TaC) to the charge using an organic binder. To determine the optimal alloying modes, the radiation power was changed in the range of 700–1000 W, the speed of movement was 5–9 mm/s, the spot diameter was 1.9–2.5 mm. The treatment was carried out with a defocused and oscillating beam with a frequency of 214 Hz. The energy density of the laser radiation was changed in the range of 28.4–96.7 W·s/mm². On the first batch of the samples, the modes were tested, on the second batch the optimal parameters of processing were identified. Metallographic studies were carried out using digital microscopes, a metallographic microscope and a PMT-3 microhardness tester.

Friction and wear tests were carried out according to the following scheme: «the wide side of a flat sample (20Kh13 steel after alloying with a powder of a given composition) is the end of a rotating bushing (counterplate of 40Kh, 49–53 HRC steel)». For lubrication, TP22C turbine oil was supplied to the friction zone at 1 drop per second.

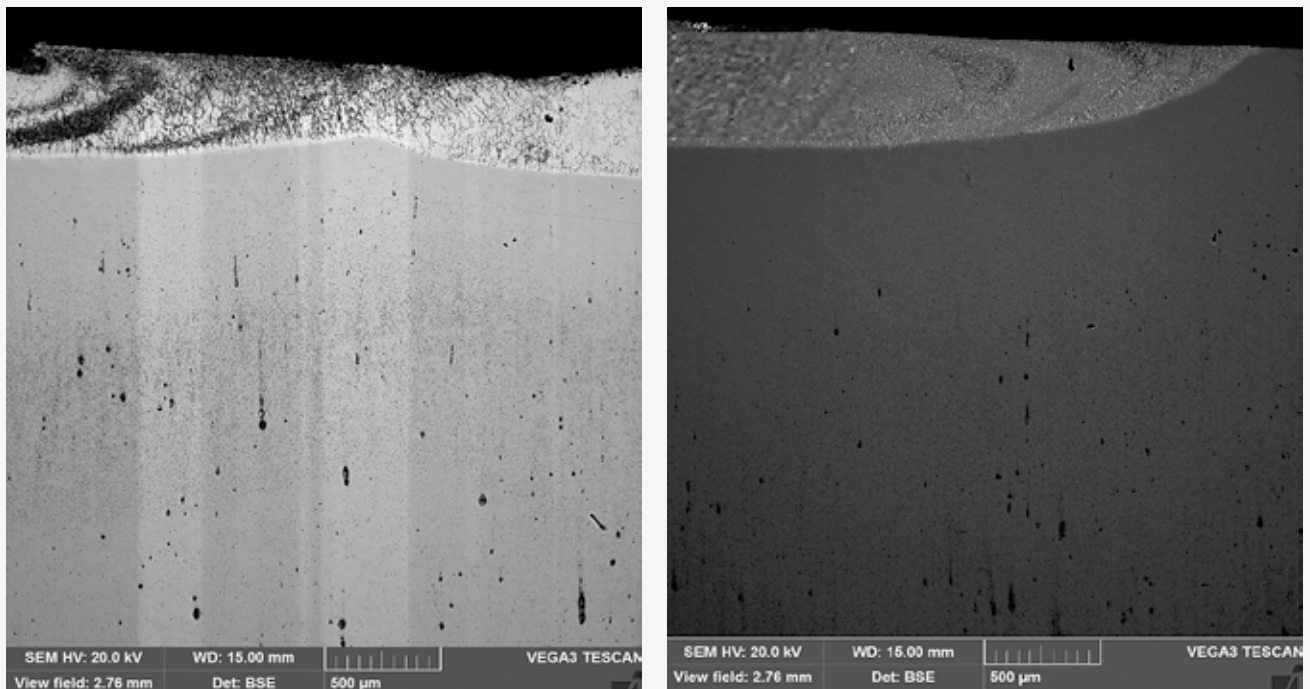


Рис. 1. Микрошлифы зон лазерного легирования стали 20X13: а – Fe-Cr-V-W-Mo, б – Fe-Cr-V-W-Mo + 5% TaC
 Fig. 1. Micro-sections of 20Kh13 steel laser alloying zones: a) Fe-Cr-V-W-Mo, b) Fe-Cr-V-W-Mo + 5% TaC

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для лазерного легирования использовали образцы стали 20X13 с размерами 12×20×70 мм. Обработку образцов выполняли на автоматизированном лазерном технологическом комплексе ИМАШ РАН. На поверхность образцов наносили

THE RESULTS OF THE EXPERIMENTAL STUDIES

According to the results of metallographic studies, the depth and width of the laser alloying zones with a defocused and oscillating beam were 0.36–0.53 mm, 0.34–0.52 mm, 1.7–2.1 mm and 3.7–4.6 mm, respectively. Figure 1 shows micro-sections of

Диагностика и компоненты

- Фотоприемники с усилителем, лавинные, балансные
- Изоляторы Фарадея 400-1250 нм, до 60 дБ, до 15 мм
- Селекторы импульсов на 250-2700 нм до 2 МГц
- Измерители длительности импульсов, SPIDER
- Электроника ФАПЧ для синхронизации
- Спектрометры 190-3450 нм



АВЕСТА
ЛАЗЕРЫ И ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Фемтосекундные лазерные системы

- Параметрические генераторы 200-9000 нм
- Волоконные лазеры на 780, 1030-1064, 1560 нм
- Лазеры со средней мощностью до 50 Вт
- Оптический синтезатор частоты ("комб-генератор")
- Титан-сапфировые генераторы от 6 до 100 фс
- Системы с пиковой мощностью до 20 ТВт



www.avesta.ru

fs@avesta.ru

тел.: (495) 241-00-92

ООО "Авеста-Проект", г. Троицк, г. Москва

шликерное покрытие из порошков Fe-Cr-V-W-Mo и с добавлением в шихту 5 об. % nano-порошка карбида тантала (TaC) с использованием связующего на органической основе. Для определения оптимальных режимов легирования изменяли мощность излучения в пределах 700–1000 Вт, скорость перемещения 5–9 мм/с, диаметр пятна 1,9–2,5 мм. Обработку проводили расфокусированным и колеблющимся лучом с частотой 214 Гц. Плотность энергии лазерного излучения изменяли в пределах 28,4–96,7 Вт·с/мм². На первой партии образцов обрабатывали режимы, на второй партии обработку на оптимальных параметрах. Металлографические исследования проводили с использованием цифровых микроскопов, металлографического микроскопа и микротвердомера ПМТ-3.

Испытания на трение и износ проводили по схеме: «широкая сторона плоского образца (сталь 20Х13 после легирования порошком заданного состава) – торец вращающейся втулки (контроль сталь 40Х, 49–53 HRC)». Для смазки в зону трения подавали масло турбинное ТП22С по 1 капле в секунду.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам металлографических исследований глубина и ширина зон лазерного легирования расфокусированным и колеблющимся лучом составила 0,36–0,53 мм, 0,34–0,52 мм, 1,7–2,1 мм и 3,7–4,6 мм соответственно. На рис. 1 представлены микрошлифы зон легирования порошками Fe-Cr-V-W-Mo (рис. 1, а) и Fe-Cr-V-W-Mo + 5% TaC (рис. 1, б) полученные на оптимальных режимах обработки при поперечных колебаниях луча. Площадь поперечного сечения зон легирования значительно в 1,8–2,5 раза выше, чем при воздействии расфокусированным лучом, а значит и производительность обработки возрастает во столько же раз. Микротвердость легированных дорожек порошком Fe-Cr-V-W-Mo и Fe-Cr-V-W-Mo + 5% TaC составила 6750–6980 МПа и 7360–8640 МПа соответственно.

На рис. 2 (а, б) и 3 (а, б) показаны зоны легирования Fe-Cr-V-W-Mo и Fe-Cr-V-W-Mo + 5% TaC соответственно, основы и химический состав этих зон. Из приведенных результатов следует, что легирующие элементы практически равномерно распределены в оплавленном слое по его глубине за исключением углерода. Это может быть связано с внедрившимися частицами алмазных зерен в поверхность шлифа из суспензии для полирования.

the alloying zones with Fe-Cr-V-W-Mo powders (Fig. 1, а) and Fe-Cr-V-W-Mo+5%TaC (Fig. 1, б) obtained under the optimal processing modes with transverse beam oscillations. The cross-sectional area of the alloying zones is significantly, 1.8–2.5 times higher than when exposed to a defocused beam, which means that the processing performance increases by the same number of times. The microhardness of the alloyed tracks with Fe-Cr-V-W-Mo and Fe-Cr-V-W-Mo+5%TaC powder was 6750–6980 MPa and 7360–8640 MPa, respectively.

Fig. 2 (а, б) and 3 (а, б) show the alloying zones of Fe-Cr-V-W-Mo and Fe-Cr-V-W-Mo+5%TaC, respectively, the bases and chemical composition of these zones. It follows from the above results that the alloying elements are almost evenly distributed in the smelted layer along its depth, with the exception of the carbon. This may be due to particles of diamond grains embedded in the surface of the micro-section from the polishing suspension.

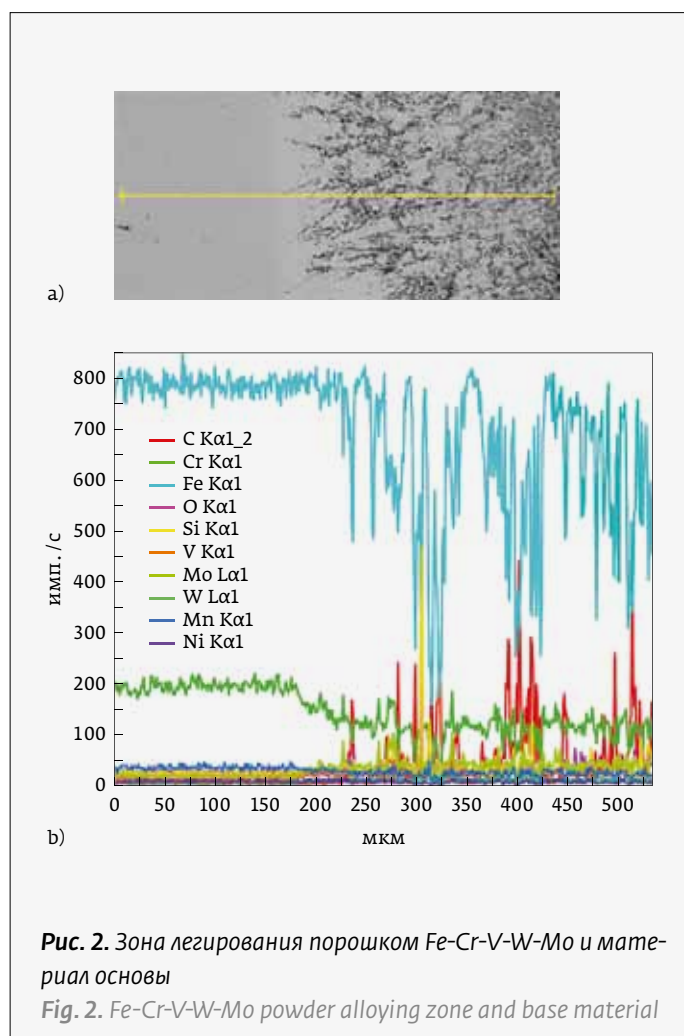


Рис. 2. Зона легирования порошком Fe-Cr-V-W-Mo и материал основы
Fig. 2. Fe-Cr-V-W-Mo powder alloying zone and base material

На рис. 4. Представлены результаты испытаний на интенсивность изнашивания образцов. Анализ результатов триботехнических испытаний показал, что интенсивность изнашивания составила для стали 20X13 $0,57 \cdot 10^{-9}$, для легированных слоев Fe-Cr-V-W-Mo и Fe-Cr-V-W-Mo + 5% TaC $0,22 \cdot 10^{-9}$ и $0,099 \cdot 10^{-9}$, а коэффициенты трения 0,115, 0,078 и 0,075 соответственно при давлении на образцы 0,6 МПа.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты показали, что при лазерном легировании элементы входящие в состав шихты распределяются достаточно равномерно по глубине слоя. Разработанная технология лазерного легирования с использованием поперечных колебаний луча имеет значительно большую производительность, чем при обработке на тех же режимах расфокусированным лучом. Процесс легирования с использованием лазерного излучения может быть применен к деталям запорной арматуры, кромкам лопаток турбин, шейкам валов и другим деталям работающим при повышенных температурах и нагрузках для значительного увеличения их износостойкости. Введение

In Fig. 4. the results of the tests on the wear intensity of the samples are presented. Analysis of the results of the tribotechnical tests showed that the wear intensity was 0.57×10^{-9} for 20X13 steel, for the alloyed layers Fe-Cr-V-W-Mo and Fe-Cr-V-W-Mo+5% TaC 0.22×10^{-9} and 0.099×10^{-9} , and the friction coefficients were 0.115, 0.078 and 0.075, respectively, at a pressure of 0.6 MPa on the samples.

DISCUSSION OF THE RESULTS

The results obtained showed that during laser alloying, the elements included in the charge are distributed fairly evenly over the depth of the layer. The developed technology of laser alloying using transverse beam oscillations has significantly higher productivity than when processing in the same modes with a defocused beam. The process of alloying using laser radiation can be applied to the parts of shut-off valves, the edges of turbine blades, shaft necks and other parts operating at elevated temperatures and loads to significantly increase their wear resistance. The introduction of nano carbides during alloying and surfacing [15] of coatings showed an increase in wear resistance compared to the base material and powders without carbides. However,



ООО «Лазерные компоненты» - надёжный поставщик компонентой базы для аэрокосмической отрасли и смежных производственных направлений

Комплектующие для оптических каналов гиросtabilизированных оптико-электронных систем:

- фотоприемные устройства и сенсоры различных диапазонов высокого разрешения
- УФ камеры, тепловизоры
- лазерные дальномеры
- системы лазерного сканирования LiDAR



Навигационные приборы (IMU, AHRS, INS, а также волоконно-оптические и МЭМС гироскопы и акселерометры).

Радиочастотное и оптоэлектронное измерительное оборудование:

- анализаторы спектра, шумов и цепей;
- датчики и усилители мощности;
- генераторы сигналов;
- оптические аттенуаторы и рефлектометры;
- осциллографы и UP-конверторы;
- тестеры радиосвязи и сетей 5G.



www.lasercomponents.ru
 тел.: +7 (495) 845-12-10
 117105, г. Москва, Варшавское шоссе, д.9, стр. 1Б, офис 504
sales@lasercomponents.ru

нано карбидов при легировании и наплавке [15] покрытий показало повышение износостойкости по сравнению с материалом основы и порошками без карбидов. Однако экономически выгоднее когда количество нано карбидов не превышает 10% от объема шихты. Высокое содержание карбидов в ряде случаев приводит к образованию трещин в покрытии, но ряд авторов [16, 17] нашли технические решения позволяющие минимизировать их образование. Лазерная наплавка износостойких покрытий показала высокий ресурс работы восстанавливаемых деталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология лазерного легирования стали 20Х13 с применением поперечных колебаний лазерного луча, позволила существенно, в 1,8–2,5 раза повысить производительность обработки. Введение порошка нано карбида тантала в состав шихты повысило износостойкость в 2,2 и в 5,7 раза по сравнению с легированием порошком Fe-Cr-V-W-Mo и с материалом основы соответственно. Коэффициенты трения для легированных слоев с TaC несколько ниже, чем без карбида и в 1,53 раза ниже, чем у стальных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Duriagina Z., Kulyk V., Kovbasiuk T., Vasylyv B., Kostryzhev A. Synthesis of Functional Surface Layers on Stainless Steels by Laser Alloying. *Metals*. 2021; 11; 434–453. <https://doi.org/10.3390/met11030434>.
2. Draper C. W., Poate J. M. Laser surface alloying. *International Metals Reviews*. 1985; 30; 85–108. <https://doi.org/10.1179/imtr.1985.30.1.85>.
3. Majumdar J. D., Manna I. Laser processing of materials. *Sadhana*. 2003; 28; 495–562. <https://doi.org/10.1007/BF02706446>.
4. Li J. F., Zhu Z. C., Peng Y. X., Shen G. A comparative study on microstructure Evolution and wear resistance of different-sized tungsten carbide modified Fe based laser cladding coatings. *Opt. Laser Technol.* 2022; 147; 107672. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.129>.
5. Miracle D. B. Metal matrix composites-From science to technological significance, *Compos. Sci. Technol.* 2005; 65; 2526–2540. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>.
6. Liu J. H., Zhu J., Yong L., Lai Z. First-principles study on the mechanical properties of vanadium carbides VC and V4C3. *Mater. Lett.* 2008; 62; 3084–3086. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.01.136>.
7. Sahoo K. M., Masanta M. Effect of pulse laser parameters on TiC reinforced AISI304 stainless steel composite coating by laser surface engineering process. *Optics and Lasers in Engineering*. 2015; 67; 36–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.10.010>.
8. Li C., Li S., Liu C., Zhang Y., Deng P., Guo Y., Wang J., Wang Y. Effect of WC addition on microstructure and tribological properties of bimodal aluminum composite coatings fabricated by laser surface alloying. *Materials Chemistry and Physics*. 2019; 234; 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.089>.
9. Wang J., Li L., Tao W. Crack initiation and propagation behavior of WC particles reinforced Fe-based metal matrix composite produced by laser melting deposition. *Optics & Laser Technology*. 2016; 82; 170–182. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.03.008>.
10. Zhang Z., Yu T., Kovacevic R. Erosion and corrosion resistance of laser clad AISI 420 stainless steel reinforced with VC. *Appl. Surf. Sci.* 2017; 410; 225–240. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.137>.
11. Figueredo E. W. A., Apolinario L. H. R., Santos M. V., Silva A. C. S., Avila J. A., Lima M. S. F., Santos T. F. A. Influence of laser beam power and scanning

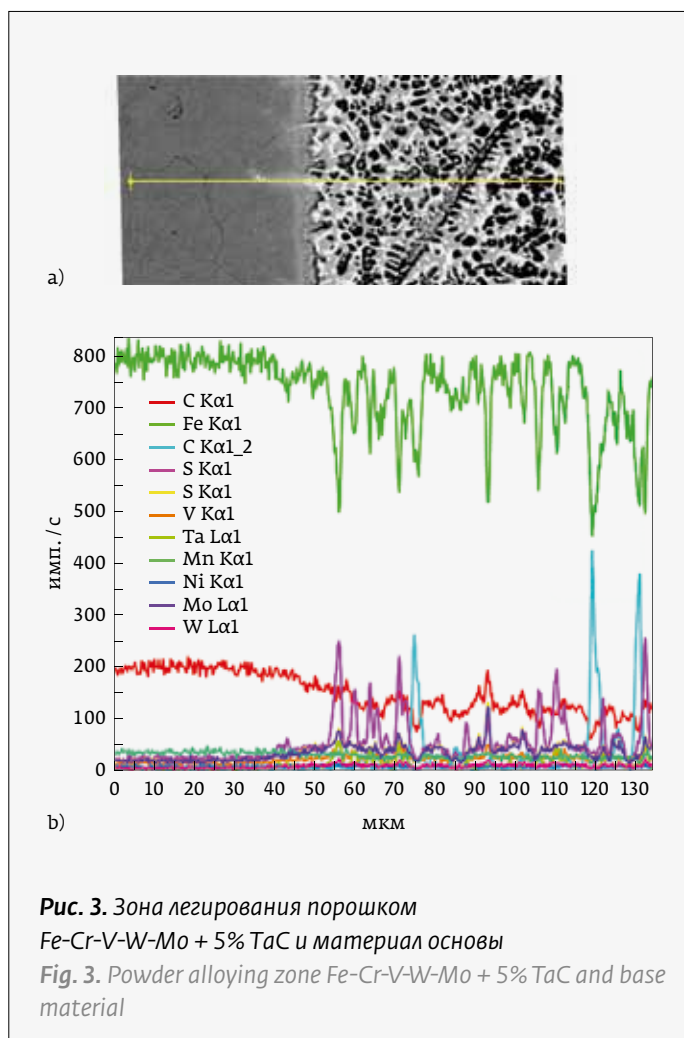


Рис. 3. Зона легирования порошком

Fe-Cr-V-W-Mo + 5% TaC и материал основы

Fig. 3. Powder alloying zone Fe-Cr-V-W-Mo + 5% TaC and base material

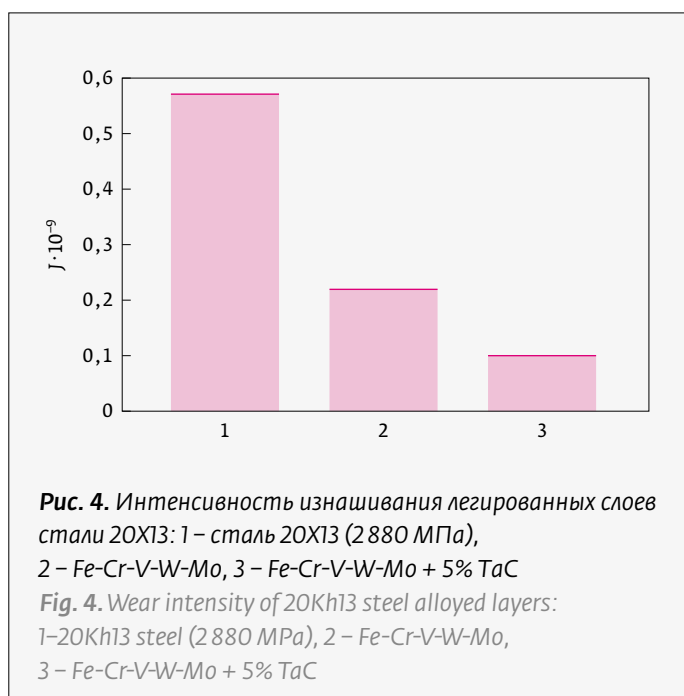


Рис. 4. Интенсивность изнашивания легированных слоев

стали 20Х13: 1 – сталь 20Х13 (2880 МПа),

2 – Fe-Cr-V-W-Mo, 3 – Fe-Cr-V-W-Mo + 5% TaC

Fig. 4. Wear intensity of 20Kh13 steel alloyed layers:

1–20Kh13 steel (2880 MPa), 2 – Fe-Cr-V-W-Mo,

3 – Fe-Cr-V-W-Mo + 5% TaC

- speed on the macrostructural characteristics of AISI 316L and AISI 431 stainless steel depositions produced by laser cladding process. *J. Mater. Eng. Perform.* 2021;30:3298–3312. DOI:10.1007/s11665-021-05676-6.
12. Li X., Zhang C. H., Zhang S., Wu C. L., Zhang J. B., Chen H. T., Abdullah A. O. Design, preparation, microstructure and properties of novel wear-resistant stainless steel-base composites using laser melting deposition. *Vacuum.* 2019; 165: 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.04.016>.
 13. Zhang H., Chong K., Zhao W., Sun Z. P. Laser cladding in-situ micro and sub-micro/nano Ti-V carbides reinforced Fe-based layers by optimizing initial alloy powders size. *Mater. Lett.* 2018; 220: 44–46. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.02.130>.
 14. Chen L. Y., Yu T. B., Xu P. F., Zhang B. In-situ NbC reinforced Fe-based coating by Laser cladding: simulation and experiment. *Surf. Coat. Technol.* 2021;412: 127027. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127027>.
 15. Biryukov V. P., Petrovskii V. N., Murzakov M. A., Fishkov A. A. The effect of nanocarbidized refractory metals on the tribological properties of coatings of laser welding. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability.* 2015; 44; 6; 545–548. <https://doi.org/10.3103/S1052618815050040>.
 16. Kan W. H., Ye Z. J., Zhu Y., Bhatia V. K., Dolman K., Lucey T., Tang X. Fabrication and characterization of microstructure of stainless steel matrix composites containing up to 25 vol % NbC. *Materials Characterization.* 2016; 119: 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.07.019>.
 17. Jing P., Wang H., Chen W., Chen L., Yin H., Wu H., Li D. Effect of Ti addition on microstructure and tribological properties of laser cladding Ni35/WC coating in an oxygen-free environment. *Surface and Coatings Technology.* 2022; 440; 128480. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128480>.

АВТОР

Бирюков В. П., к. т. н., Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-9278-6925

it is more economically advantageous when the amount of nano carbides does not exceed 10% of the charge volume. The high content of carbides in some cases leads to the formation of cracks in the coating, but a number of authors [16, 17] have found technical solutions to minimize crack formation. Laser surfacing of wear-resistant coatings shows a high service life of the parts being restored.

CONCLUSION

The technology of laser alloying of 20Kh13 steel with the use of transverse oscillations of the laser beam has been developed, which has significantly increased processing productivity by 1.8–2.5 times. The introduction of tantalum nano carbide powder into the charge increased wear resistance by 2.2 and 5.7 times compared to alloying with Fe-Cr-V-W-Mo powder and with the base material, respectively. The friction coefficients for the alloyed layers with TaC are slightly lower than without carbide and 1.53 times lower than for steel samples.

AUTHOR

Biryukov V. P., Cand. of Sc. (Eng.), Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russia
ORCID: 0000-0001-9278-6925



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Цена 2600 руб.

Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б.

ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 648 с. ISBN 978-5-94836-447-6

Книга посвящена новейшим технологиям, которые дают возможность на основе данных о виртуальных моделях твердых тел изготавливать физические модели в результате быстрых и легких производственных процессов. Авторы книги – признанные специалисты в области аддитивных технологий, имеющие многолетний опыт работы и исследований. Первое издание задумывалось как базовый учебник, объединивший все литературные источники, посвященные целям и задачам аддитивного производства (АП). Второе издание существенно переработано и дополнено, новая информация включена в дополнительные разделы и главы. Разработчики АП и представители промышленности найдут полезные сведения в этой книге, поскольку она поможет понять состояние дел в отрасли и перспективы дальнейших исследований. Издание предназначено также для преподавателей, студентов и аспирантов, изучающих аддитивное производство, может быть использовано в качестве автономного курса или как модуль в большой программе по технологии производства.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosfera.ru; sales@technosfera.ru