



Свойства многокомпонентных сплавов, полученных аддитивными лазерными технологиями

В. П. Бирюков, А. Н. Принц, А. П. Савин, Э. Г. Гудушаури
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова
Российской академии наук, Москва, Россия

В работе представлен обзор работ зарубежных исследований по определению характеристик высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). Показано, что ВЭС на основе объемноцентрированной решетки (ОЦК) твердого раствора более жаропрочны по сравнению с высокоэнтропийным сплавом на основе гранецентрированной решетки (ГЦК) твердого раствора. Представлены результаты полученных квазивысокоэнтропийных сплавов (КВЭС) с новыми свойствами взамен дорогостоящих высокоэнтропийных сплавов путем введения в шихту нескольких серийных порошковых материалов на основе железа, никеля, кобальта и добавок нанокарбидов тантала для повышения износостойкости покрытий, полученных лазерной наплавкой. Введение в состав шихты КВЭС 6% нанокарбида тантала повышает износостойкость в 2,8 раза по сравнению с наплавкой без использования карбида и увеличивает износостойкость в 7,2 раза по сравнению с характеристикой материала основы из стали 40X. Технология лазерной наплавки КВЭС может быть использована для восстановления различных деталей машин, в том числе работающих при повышенных нагрузках и температурах.

Приведены характеристики покрытий, полученных в процессе лазерной наплавки. Указан диапазон варьирования рабочих параметров лазерного излучения: мощности скорости перемещения, диаметра пучка.

Properties of Multicomponent Alloys Obtained by Additive Laser Technologies

V. P. Biryukov, A. N. Prints, A. P. Savin, E. G. Gudushauri
Federal budget - funded research Institute of Machines Science
named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

A review of the research of foreign studies on the characterization of high-entropy alloys (HEA) is given in this article. It has been shown that HEA based on a body-centered lattice (BCL) of a solid solution are more heat-resistant than a highly entropic alloy based on a face-centered lattice (FCL) of a solid solution. The results of the obtained quasi-high-entropy alloys (QHEA) with new properties instead of expensive high-entropy alloys by introducing several serial powder materials based on iron, nickel, cobalt and tantalum nanocarbide additives to increase the wear resistance of coatings obtained by laser welding are presented. The introduction of 6% tantalum nanocarbide into the QHEA charge increases the wear resistance by 2.8 times compared to surfacing without carbide and increases the wear resistance by 7.2 times compared with the characteristic of the base material made of 40X steel. The technology of laser cladding QHEA can be used to restore various parts of machines, including those operating at elevated loads and temperatures.

The characteristics of coatings obtained in the process of laser cladding are given. The range of variation of the operating parameters of the laser radiation is indicated: power of the displacement velocity, beam diameter.

Keywords: high-entropy alloys, quasi-high-entropy alloys, elastic modulus, laser surfacing

Received: 15.11.2019

Accepted: 17.12.2019



Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, квазивысокоэнтропийные сплавы, модуль упругости, лазерная наплавка

Статья поступила: 15.11.2019

Статья принята к публикации: 17.12.2019

ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), также известные как многокомпонентные сплавы или сплавы с несколькими основными элементами, впервые были получены методом литья [1, 2] в 2004 году. ВЭС – полностью новая стратегия конструирования сплава, смешивания большого количества элементов или компонентов. Содержание каждого элемента составляет от 5 до 35 ат.% [3]. Высокоэнтропийные сплавы на основе объемноцентрированной решетки (ОЦК) твердого раствора более жаропрочны по сравнению с высокоэнтропийным сплавом на основе гранецентрированной решетки (ГЦК) твердого раствора. Как показали испытания на сжатие, высокоэнтропийный сплав на основе ОЦК твердого раствора обладал прочностью на уровне 450 МПа при температуре 1300 °С [4]. Особенностью высокоэнтропийных сплавов является способность к упорядочению параметра решетки при отжиге, что сопровождается снижением параметра решетки и некоторым повышением модуля упругости и твердости.

Порошковые смеси Fe, Co, Ni, Cr и Cu были получены путем механического смешивания химически чистых порошков. Размеры частиц порошков составляли 50–120 мкм [5]. В качестве добавок использовали Si (1,2%), Mn (1,2%) и Mo (2,8%). Лазерную наплавку выполняли с использованием CO₂-лазера на подложку стали Q235. Порошковую смесь предварительно наносили на поверхность образца толщиной 1,7–2,0 мм. Обработку проводили при мощности излучения 2 кВт, диаметре луча 4,5 мм и скорости перемещения 400 мм/мин с перекрытием дорожек 30%. Термообработка наплавленных образцов проводилась при температурах 550–950 °С в течение 5 часов. Покрытия FeCoNiCrCu с добавками Si, Mn и Mo или без них идентифицированы как простой твердый раствор с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК). Микротвердость сплава без добавок составила 3750 МПа, что примерно на 50% выше, чем у того же сплава, полученного методом дуговой плавки. Введение Si, Mn и Mo улучшает качество покрытия и значительно увеличивается микротвердость до 4500 МПа.

Сплав FeCoNiCrCu имеет более высокую коррозионную стойкость в 5% растворе H₂SO₄ по срав-

INTRODUCTION

High-entropy alloys (HEA), also known as multicomponent alloys or alloys with several basic elements, were first obtained by casting [1, 2] in 2004. Wind farm – a completely new strategy for the design of the alloy, mixing a large number of elements or components. The content of each element is from 5 to 35 at.% [3]. High-entropy alloys based on a body-centered lattice (BCL) of a solid solution are more heat-resistant than a high-entropy alloy based on a face-centered lattice (FCL) of a solid solution. As compression tests showed, a highly entropic alloy based on bcc solid solution had a strength of 450 MPa at a temperature of 1300 °C [4]. A feature of highly entropic alloys is the ability to order the lattice parameter during annealing, which is accompanied by a decrease in the lattice parameter and a slight increase in the elastic modulus and hardness.

Powder mixtures of Fe, Co, Ni, Cr and Cu were obtained by mechanical mixing of chemically pure powders. The particle sizes of the powders were 50–120 μm [5]. Si (1.2%), Mn (1.2%), and Mo (2.8%) were used as additives. Laser surfacing was performed using a CO₂ laser on a Q235 steel substrate. The powder mixture was preliminarily applied to the surface of the sample with a thickness of 1.7–2.0 mm. The processing was carried out with a radiation power of 2 kW, a beam diameter of 4.5 mm and a travel speed of 400 mm/min with overlapping tracks of 30%. Heat treatment of deposited samples was carried out at temperatures of 550–950 °C for 5 hours. FeCoNiCrCu coatings with or without Si, Mn, and Mo additives were identified as a simple solid solution with a face-centered cubic lattice (FCL). The microhardness of the alloy without additives was 3750 MPa, which is approximately 50% higher than that of the same alloy obtained by the arc melting method. The introduction of Cu, Mn and Mo improves the quality of the coating and significantly increases the microhardness up to 4500 MPa.

The FeCoNiCrCu alloy has higher corrosion resistance in a 5% H₂SO₄ solution compared to the heat-resistant nickel alloy Ni60. Metal powders of Fe, Cr, Co, Si, Ti, Nb, Mo, and W with a purity of more than 99.6% and a size of about 150–250 μm were used to create a charge [6]. The powders were mixed in a specific proportion of 5:5:5:1:1:1:1:1 for 4 hours in a stainless steel vessel using a planetary ball mill. For surfacing, a YLS-6000 IPC fiber laser was used. A powder with a thickness of 1.5 mm was placed on a substrate of W6Mo5Cr4V2 steel with dimensions of ø50×10 mm. Laser surfacing was performed at a radiation power of 4 kW, a travel speed of 6 mm/s, and a spot diameter



нению с жаропрочным никелевым сплавом Ni60. Металлические порошки Fe, Cr, Co, Si, Ti, Nb, Mo и W с чистотой более 99,6% и размером около 150–250 мкм были использованы для создания шихты [6]. Порошки смешивали в определенной пропорции 5:5:5:1:1:1:1:1 в течение 4 часов в сосуде из нержавеющей стали с использованием планетарной шаровой мельницы. Для наплавки применяли волоконный лазер YLS-6000 IPG. Порошок толщиной 1,5 мм был размещен на подложке стали W6Mo5Cr4V2 с размерами $\varnothing 50 \times 10$ мм. Лазерную наплавку выполняли при мощности излучения 4 кВт, скорости перемещения 6 мм/с, диаметра пятна 3,5 мм в среде аргона. После наплавки производили отжиг при температуре 800–1050 °С в течение 4 часов. Наибольшая твердость 10500 МПа достигнута при температуре отжига 850 °С, что значительно превышает твердость образца после наплавки 7800 МПа.

Порошки высокоэнтропийных сплавов $Al_2CrFeCoCuTiNi_x$ ($x=0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$) нанесли на подложку из стали Q235 толщиной 0,8 мм в виде обмазки на основе органического связующего [7]. Лазерную наплавку выполняли на установке DL-HL-T5000B при мощности излучения 2500 Вт, диаметре луча 4 мм, скорости перемещения луча 3 мм/с, в среде аргона. Микротвердость покрытий возрастает с увеличением содержания никеля и достигает максимального значения 1102 HV, что в 4 раза выше материала основы. Покрытие сплавов $Al_2CrFeCoCuTiNi_x$ обладает хорошей коррозионной стойкостью в 1 моль/л растворе NaOH и 3,5% растворе NaCl. С увеличением содержания никеля коррозионная стойкость сначала увеличивается, но затем начинает снижаться. То же самое происходит с износостойкостью покрытия. Максимальная износостойкость получена при содержании никеля 1,0%.

Целью работы было получение квазивысокоэнтропийных сплавов (КВЭС) с новыми свойствами взамен дорогостоящих высокоэнтропийных сплавов путем введения в шихту нескольких серийных порошковых материалов на основе железа, никеля, кобальта и добавок нанокарбидов тантала для повышения износостойкости покрытий, полученных лазерной наплавкой.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В экспериментальных исследованиях использовали лазерный комплекс ИМАШ РАН [8]. Образцы изготавливали из стали 40X размерами $15 \times 20 \times 70$ мм. Для изготовления шихты выбраны порошки на основе железа, никеля и кобальта средней твердо-

сти 3.5 мм в аргона. После surfacing, annealing was performed at a temperature of 800–1050 °C for 4 hours. The highest hardness of 10500 MPa was achieved at an annealing temperature of 850 °C, which significantly exceeds the hardness of the sample after surfacing of 7800 MPa.

Powders of high-entropy $Al_2CrFeCoCuTiNi_x$ alloys ($x=0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$) were applied to a 0.8 mm thick Q235 steel substrate in the form of an organic binder based coating [7]. Laser surfacing was performed on the DL-HL-T5000B unit with a radiation power of 2500 W, a beam diameter of 4 mm, a beam moving speed of 3 mm/s, in an argon medium. The microhardness of the coatings increases with increasing nickel content and reaches a maximum value of 1102 HV, which is 4 times higher than the base material. Coating $Al_2CrFeCoCuTiNi_x$ alloys has good corrosion resistance in 1 mol/l NaOH solution and 3.5% NaCl solution. With an increase in the nickel content, corrosion resistance initially increases, but then begins to decline. The same thing happens with the wear resistance of the coating. Maximum wear resistance was obtained with a nickel content of 1.0%.

The aim of the work was to obtain quasi-high-energy alloys (QHEA) with new properties instead of expensive high-entropy alloys by introducing into the charge several serial powder materials based on iron, nickel, cobalt and tantalum nanocarbide additives to increase the wear resistance of coatings obtained by laser welding.

EQUIPMENT AND RESEARCH METHODS

In experimental studies, the IMASH RAS laser complex was used [8]. Samples were made of 40X steel with dimensions of $15 \times 20 \times 70$ mm. Powders based on iron, nickel and cobalt of medium hardness in a ratio of 2:2:1, respectively, with a particle size of 40–150 μm , powder of tantalum nano-carbide with a particle size of 40–100 nm, were selected for the manufacture of the charge. The composition of the powders can be represented as (Ni-Cr-B-Si, Fe-Cr-Co-Mo, Co-Cr-W) TaC_x ($x=0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0$). Slurry coatings were applied with a thickness of 0.9–1.0 mm. An aqueous solution of hydroxyethyl cellulose was used as a binder material. By varying parameters, we chose the radiation power $P=800\text{--}1000$ W, the processing speed $V=5\text{--}10$ mm/s, and the beam diameter $d=2\text{--}3$ mm. As an additional factor, scanning of a beam with a fixed frequency $f=215$ Hz was considered. A resonance-type scanner with an elastic element on which a mirror is mounted was used. Metallographic studies of deposited coatings were carried out on a PMT-3 microhardness tester with a load of 0.98 N, Altami

сти в соотношении 2:2:1 соответственно с размером частиц 40–150 мкм, порошок нанокарбида тантала с размером частиц 40–100 нм. Состав порошков можно представить в виде (Ni-Cr-B-Si, Fe-Cr-Co-Mo, Co-Cr-W)TaC_x (x=0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0). Шликерные покрытия наносили толщиной 0,9–1,0 мм. В качестве связующего материала использовали водный раствор оксиэтилцеллюлозы. Варьируемыми параметрами были выбраны мощность излучения P=800–1000 Вт, скорость обработки V=5–10 мм/с и диаметр пучка d=2–3 мм. В качестве дополнительного фактора рассматривалось сканирование луча с фиксированной частотой f=215 Гц. Использовался сканатор резонансного типа с упругим элементом, на котором закреплено зеркало. Металлографические исследования наплавленных покрытий проводились на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н, металлографическом микроскопе Альтами МЕТ 1С (производства ООО «Альтами», г. Санкт-Петербург) и цифровом микроскопе АМ413МЛ (производства компании «AnMo Electronics Corporation», Китай). Структура и химический состав наплавленных слоев исследовались на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH (производства компании «TESCAN», Чехия) с системой энергодисперсионного анализа с применением режимов отраженных и вторичных электронов.

Для определения трибологических характеристик наплавленных образцов проводили испытание на абразивное изнашивание по схеме Бринелля-Хаворта [9]. В зону трения подавался кварцевый песок с размером частиц 200–600 мкм, время испытаний составляло 10 минут при нагрузке 15 Н.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лазерная наплавка образцов выполнялась расфокусированным лучом и с поперечными колебаниями луча по нормали к вектору скорости лазерной обработки. Металлографическими исследованиями установлено, что наплавка на минимальной скорости 5 мм/с приводит к существенному снижению микротвердости как дорожек КВЭС, так и дорожек с добавлением нанокарбида тантала. Поэтому обработку образцов для испытаний на изнашивание производили при максимально возможной скорости перемещения луча 8 мм/с. При этом формировался равномерный наплавленный валик и минимальная зона оплавления материала основы образца 5–15 мкм. На рис. 1 (а и б) представлены микрошлифы наплавленных дорожек с содержанием нанокарбида тантала 6% разме-

МЕТ 1С metallographic microscope (manufactured by Altami LLC, St. Petersburg) and AM413ML digital microscope (manufactured by AnMo Electronics Corporation, China). The structure and chemical composition of the deposited layers were studied using a TESCAN VEGA 3 SBH scanning electron microscope (manufactured by TESCAN, Czech Republic) with an energy dispersive analysis system using the modes of reflected and secondary electrons.

To determine the tribological characteristics of the deposited samples, an abrasion test was performed according to the Brinell-Haworth scheme [9]. Quartz sand with a particle size of 200–600 microns was fed into the friction zone, the test time was 10 minutes at a load of 15 N.

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES

Laser surfacing of the samples was carried out by a defocused beam and with transverse oscillations of the beam normal to the laser processing speed vector. Metallographic studies have established that surfacing at a minimum speed of 5 mm/s leads to a significant decrease in microhardness of both CVEC tracks and tracks with the addition of tantalum nano carbide. Therefore, the processing of samples for wear tests was carried out at the maximum possible velocity of the

Focal-πShaper_Q

для 3D-печати (SLM)

совместно с опками aThermoXX преобразователи Focal-πShaper_Q обеспечивают:

- кольцевое пятно в фокусе,
- пониженное искрение и брызги,
- минимизацию пористости,
- стабилизацию условий в течение всего процесса обработки
- мин. термический сдвиг фокуса



Сравнение процессов

<p> D_{beam}: 130 μm A_{beam}: 13478 μm² I_{beam}: 3.7 · 10⁶ W/m² I_{total}: 12.95 · 10⁶ W/m² </p>  <p>Гaussianный лазерный пучок (TEM₀₀)</p> <ul style="list-style-type: none"> • искрение, брызги • пористость 	<p> D_{beam}: 130 μm A_{beam}: 8825 μm² I_{beam}: 5.7 · 10⁶ W/m² I_{total}: 19.95 · 10⁶ W/m² </p>  <p>Кольцевое пятно, Focal-πShaper_Q</p> <ul style="list-style-type: none"> • отсутствие искрения, • минимизация пористости • стабильность результатов
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



info@adloptica.com
www.piShaper.com

рами 0,85×2,3 мм, твердостью 10200–10500 МПа, и 0,88×3,38 мм, твердостью 10400–10900 МПа, полученных расфокусированным лучом и лучом, сканирующим с частотой 215 Гц. Зона проплавления основы при обработке расфокусированным лучом и сканирующим лучом составила 280 и 110 мкм соответственно. Площадь поперечного сечения единичного наплавленного слоя при сканировании луча в 1,53 раза больше, чем при наплавке расфокусированным лучом. Зависимость микротвердости наплавленных покрытий с поперечными колебаниями луча по высоте представлена на рис. 2. С повышением содержания нанокарбида тантала в шихте микротвердость возрастает.

На рис. 3. представлена зависимость износа образцов от содержания нанокарбида тантала. Потеря массы образцов при испытании на абразивное изнашивание уменьшается при повышении процентного содержания порошка TaC в наплавленных слоях. Износостойкость – величина, обратная потере массы образца. В данном эксперименте она увеличилась в 7,2 раза при введении в состав шихты 6% TaC по сравнению с материалом основы сталью 40X и возросла в 2,8 раза по сравнению с наплавкой KBЭС.

Наплавленные покрытия шихтой KBЭС и KBЭС+TaC не склонны к трещинообразованию. В них нет дефектов типа пор и раковин. Необходимо проведение дальнейших исследований на коррозионную стойкость покрытий. Однако уже сейчас можно предположить значительное увеличение коррозионной стойкости в сравнении с серийно выпускаемыми порошками, созданными на основе железа, никеля.

Технология лазерной наплавки KBЭС может быть использована для восстановления различных деталей машин, в том числе работающих при повышенных нагрузках и температурах. Наибольшему износу подвержены шейки валов электрических машин и газоперекачивающих агрегатов, матрицы и пунсоны штамповой оснастки как для холодной, так и для горячей штамповки. Применительно к ним разработана данная технология лазерной наплавки.

ВЫВОДЫ

Предложено покрытие KBЭС. Покрытие имеет микротвердость 4000–4500 МПа и может быть использовано при наплавке различных деталей, работающих при повышенных температурах и давлениях.

Введение в состав шихты KBЭС 6% нанокарбида тантала повышает износостойкость в 2,8 раза по

beam 8 mm/s. In this case, a uniform deposited bead and a minimum fusion zone of the sample base material of 5–15 μm were formed. Figure 1 (a and b) show microsections of deposited paths with a tantalum nanocarbide content of 6%, dimensions 0.85×2.3 mm, hardness 10200–10500 MPa, and 0.88×3.38 mm, hardness 10400–10900 MPa, obtained by defocused beam and beam scanning with a frequency of 215 Hz. The

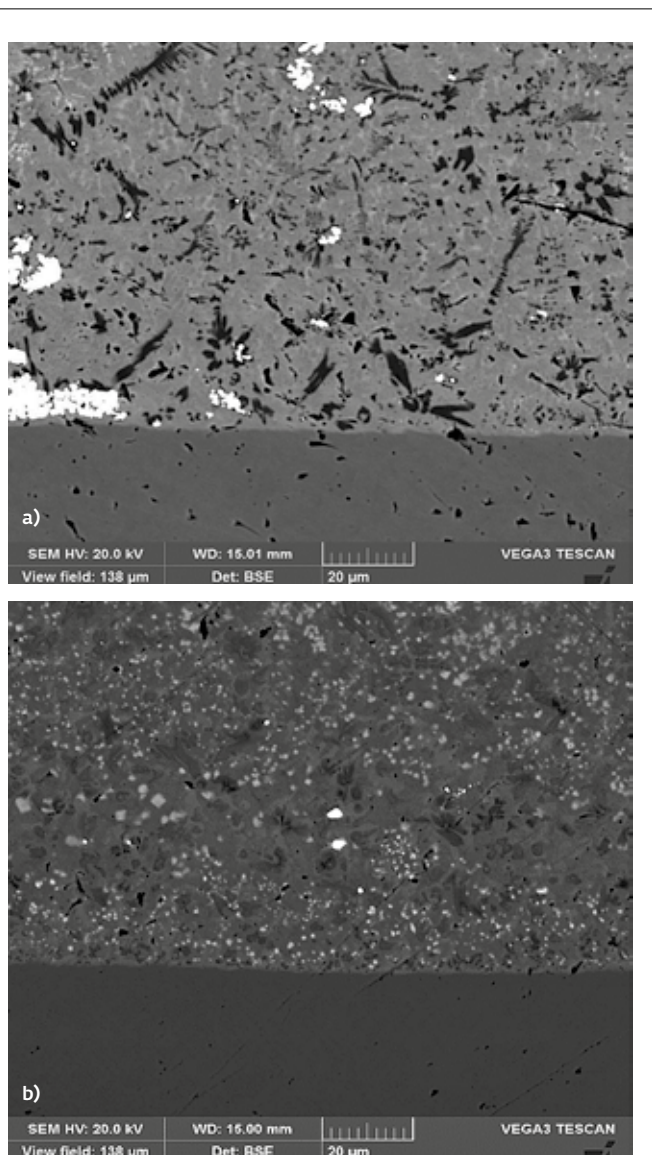
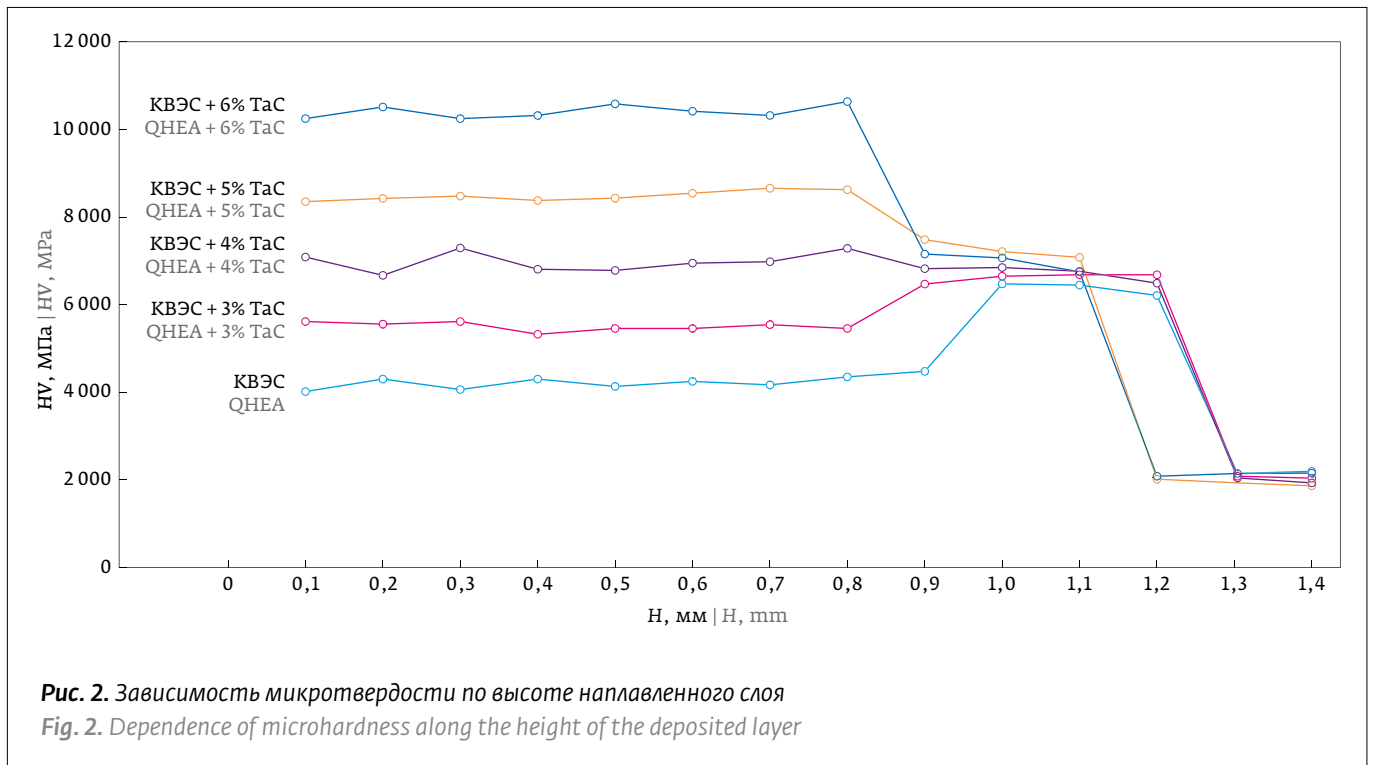


Рис. 1. Микроструктуры наплавленных покрытий на границе с основой, содержание нано карбида тантала 6%: а – наплавка расфокусированным лучом; б – наплавка сканирующим лучом

Fig. 1. Microstructure of the deposited coatings at the border with the base, the content of tantalum nano-carbide is 6%: a – surfacing with a defocused beam; b – surfacing with a scanning beam



сравнению с наплавкой без использования карбида и увеличивает износостойкость в 7,2 раза по сравнению с характеристикой материала основы из стали 40X.

REFERENCES

1. Cantor B., Chang I. T. H., Knight P., Vincent A. J. B. Microstructural Development in Equiatomic Multicomponent Alloys. *Mater. Sci. Eng. A.* 2004; 375-377: 213-218. DOI:/doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257.
2. Yeh J. W., Chen S. K., Gan J. Y., Chin T. S., Shun T. T., Tsau C. H., Chang S. Y. Nanostructured High Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Adv. Eng. Mater.* 2004; 6: 299-303. DOI:/doi.org/10.1002/adem.200300567.
3. Cai Y. P., Wang G. J., Ma Y. J., Cao Z. H., Meng X. K. High hardness dual-phase high entropy alloy thin films produced by interface alloying. *Scripta Materialia.* 2019; 162: 281-285. DOI:/doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.11.004.
4. Firstov S. A., Mileiko S. T., Gorban V. F., Krapivka N. A., Pechkovsky E. P. Elastic Modulus of High-Entropy Single-phase Alloys with BCC Crystalline Lattice. *Composites and Nanostructures.* 2014; 21 (1): 3-17.

penetration zone of the base during processing with a defocused beam and a scanning beam was 280 and 110 μm, respectively. The cross-sectional area of a single deposited layer when scanning a beam is 1.53 times larger than when surfacing with a defocused beam. The dependence of the microhardness of the deposited coatings with transverse beam oscillations in height is shown in Fig. 2. With an increase in the content of tantalum nanocarbide in the mixture, the microhardness increases.

Fig. 3 shows the dependence of the wear of the samples on the content of tantalum nanocarbide. The loss of mass of the samples during the abrasion test decreases with increasing percentage of TaC powder in the deposited layers. Wear resistance – the reciprocal of the loss of mass of the sample. In this experiment,



Лазерный 2D и 3D раскрой и сварка металлов
 Лазерный раскрой и сварка неметаллов
 Лазерная гравировка и маркировка
 Восстановление изделий с помощью лазерной наплавки
 Обучение и переподготовка кадров

249037, г. Обнинск
 Киевское шоссе, 82
 +7 (484) 392-30-61
 +7 (484) 399-60-80
 www.cplit.ru
 www.klitc.ru

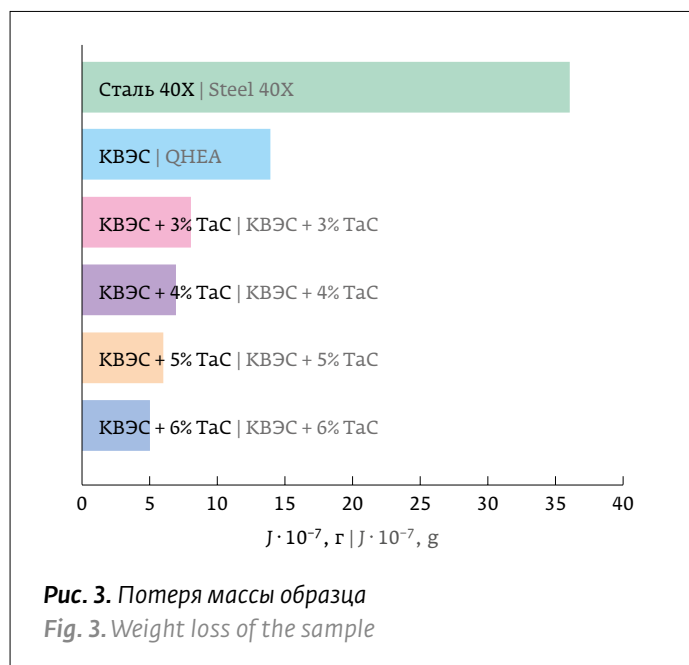




Изготовление инструмента
 Изготовление вырубных и гибочных штампов
 Модернизация и ремонт пресс-форм
 Изготовление нестандартных приспособлений
 Любые виды механической обработки

Лазерная резка и сварка: laser-center2@r-tech.ru, semeniyuk@r-tech.ru
 Инструментальный цех: voronkov@r-tech.ru, info@r-tech.ru

ВАКАНСИИ: 1. Зам. генерального директора/технический директор
 2. Менеджер по продажам



- Zhang H. et al. Synthesis and characterization of FeCoNiCrCu high-entropy alloy coating by laser cladding. *Materials and Design*. 2011; 32:1910–1915. DOI:/doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.001.
- Guo Y., Liu Q. Investigation on annealing strengthening effect of laser cladding Fe5Cr5Co5SiTiNbMoW high-entropy alloy coating. *Journal of Materials Research*. 2018; 33(19):1–8. DOI: 10.1557/jmr.2018.330.
- Qiu X.-W., Liu C.-G. Microstructure and properties of Al2CrFeCoCuTiNi high-entropy alloys prepared by laser cladding. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013; 553: 216–220. DOI:/doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.100.
- Biryukov V. P., Dozorov A. V. Laser systems for hardening and surfacing of parts and for precise sheet layout. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2006; 35(1). С. 46–52. (Russian Source: Бирюков В. П., Дозоров А. В. Лазерные системы для упрочнения, наплавки и точного раскроя листового материала. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2006; 1: 60–66).
- Хрущов М. М., Бабичев М. А. *Абразивное изнашивание*. – М.: Наука. 1970. Hrushchov M. M., Babichev M. A. *Абразивное изнашивание*. – М.: Наука. 1970.

ОБ АВТОРАХ

Бирюков Владимир Павлович, к. т. н.,
laser 52@yandex.ru, ФГБУН Институт машино-
ведения им. А. А. Благонравова Российской акаде-
мии наук, <http://www.imash.ru>, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-3147-0844

Принц Антон Николаевич, ФГБУН Институт
машиноведения им. А. А. Благонравова Рос-
сийской академии наук, <http://www.imash.ru>,
Москва, Россия.
ORCID ID: 0000-0001-6156-8810

Савин Александр Петрович, ФГБУН Институт
машиноведения им. А. А. Благонравова Рос-
сийской академии наук, <http://www.imash.ru>,
Москва, Россия.

Гудушаури Элгуджа Георгиевич, д. т. н., ФГБУН
Институт машиноведения им. А. А. Благонра-
вова Российской академии наук, <http://www.imash.ru>, Москва, Россия.

it increased by 7.2 times with the introduction of 6% TaC into the mixture compared with the base material of 40X steel and increased by 2.8 times compared to the QHEA surfacing.

Deposited coatings with QHEA and QHEA+TaC charge are not prone to crack formation. They have no defects such as pores and shells. Further research is required on the corrosion resistance of coatings. However, now we can assume a significant increase in corrosion resistance in comparison with commercially available powders based on iron and nickel.

QHEA laser cladding technology can be used to restore various parts of machines, including those operating at elevated loads and temperatures. The shafts of electric machines and gas pumping units, dies and punches of die tooling, both for cold and hot stamping, are subject to the greatest wear. In relation to them, this laser surfacing technology has been developed.

CONCLUSIONS

QHEA coverage is proposed. It has a microhardness of 4000–4500 MPa and can be used for surfacing various parts operating at elevated temperatures and pressures. The working parameters of the laser cladding technological process are determined: radiation power, speed of the laser beam, beam diameter.

The introduction of 6% tantalum nanocarbide into the QHEA charge increases the wear resistance by 2.8 times compared to surfacing without carbide and increases the wear resistance by 7.2 times compared with the characteristic of the base material made of 40X steel.

ABOUT AUTHORS

Biryukov Vladimir Pavlovich, Candidate of Eng.Sc.,
laser 52@yandex.ru, FBFR Institute of Machines
Science named after A.A.Blagonravov of the
Russian Academy of Sciences,
<http://www.imash.ru>, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-3147-0844

Prints Anton Nikolaevich, FBFR Institute of Machines
Science named after A.A.Blagonravov of the
Russian Academy of Sciences,
<http://www.imash.ru>, Moscow, Russia.
ORCID ID: 0000-0001-6156-8810

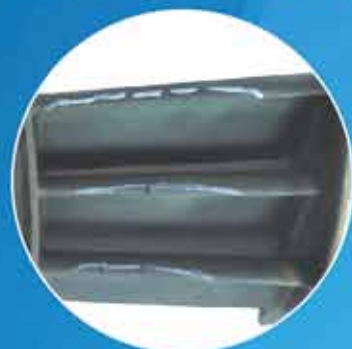
Savin Alexander Petrovich, FBFR Institute of
Machines Science named after A.A.Blagonravov
of the Russian Academy of Sciences, <http://www.imash.ru>, Moscow, Russia.

Gudushauri Elguja Georgievich, Doc. of Eng.Sc.,
FBFR Institute of Machines Science named after
A.A.Blagonravov of the Russian Academy of
Sciences, <http://www.imash.ru>, Moscow, Russia.

ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ РЕМОНТ КОМПОНЕНТОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ГТД: TAURUS 60, НК-12СТ, MAN TURBO и др.

- ремонт компонентов сложной геометрии
- ремонт в труднодоступных местах
- эксплуатационные характеристики восстановленных компонентов – на уровне новых
- стоимость работ – 30-50% от стоимости нового изделия
- срок изготовления – от 10 до 15 рабочих дней
- изготовление «под ключ»

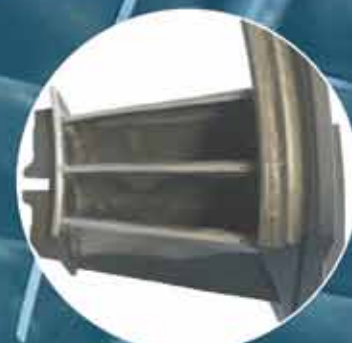
Секции соплового аппарата второй ступени ГТД MAN TURBO (материал – Inconel 939)



До наплавки



После наплавки



После мех. обработки

Полукольцо направляющего аппарата II ступени ГТД TAURUS 60 (материал – сталь А437)



ИЛWCT
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОТДЕЛ

Тел.: 8 (812) 757-22-22

E-mail: ilwt@ilwt.smtu.ru

www.ilwt-stu.ru

