



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ И СОСТАВА ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ

В. П. Бирюков, к. т. н., laser-52@yandex.ru,
ФГБУН Институт машиноведения
им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Лазерная наплавка металлокерамических порошков на крупногабаритные изделия придает их поверхностям новые антифрикционные свойства. В статье приведены результаты исследований влияния химического состава шихты и режимов лазерной наплавки на износостойкость покрытий. Определены предельные значения плотности лазерной энергии, при которых происходит выгорание легирующих элементов и начинается снижение износостойкости. Разработана методика оценки коэффициента износостойкости на базе метода склерометрирования, которая позволяет сократить цикл испытаний и сроки определения износостойкости узлов трения: коленчатых валов, валков прокатных станов, шеек валов газовых и паровых турбин и других.

Для восстановления поверхностей трения деталей машин с применением лазерного излучения используют порошки на никелевой основе. Упрочняющими фазами таких покрытий могут быть карбиды Cr_{23}C_6 , Cr_7C_2 , CrB , Cr_2B , Cr_7C_3 [1,2] или высокопрочные карбиды вольфрама WC , хрома Cr_3C_2 , кремния SiC , титана TiC и др. Они позволяют получать крупные первичные или более мелкие вторичные карбиды этих элементов [3]. Упрочняющие фазы NiCrBSi покрытий имеют большие значения твердости по сравнению с матрицей и вносят существенный вклад в общую твердость покрытий. Однако наличие таких фаз в структуре покрытия может неоднозначно влиять на его износостойкость. Известно, что под действием абразивного зерна крупные карбиды склонны к локальной фрагментации [4]. Наличие крупных упрочняющих частиц может даже приводить

DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF LASER CLADDING MODES AND COMPOSITION OF POWDER MATERIAL ON COATING WEAR RESISTANCE

V. P. Biryukov, PhD., laser-52@yandex.ru FSBES
"A. A. Blagonravov Institute of Machines Science of
RAS", Moscow, Russia

Laser cladding of metal-ceramic powders for large-sized products gives their surfaces new antifriction properties. The results of studies of the effect of the influence of charge chemical composition and laser cladding modes on the coating wear resistance are given in this article. The limiting values of the laser energy density are determined at which the alloying elements burn out and the wear resistance begins to decrease. A technique of estimating the wear resistance coefficient is developed based on sclerometric method that reduces test cycle time and period of determining wear-resistance of friction units: crankshafts, roll mills, shaft necks of steam and gas turbines, etc.

To restore the friction surfaces of machine parts applying laser radiation, nickel-based powders are used. The hardening phases of such coatings can be carbides Cr_{23}C_6 , Cr_7C_2 , CrB , Cr_2B , Cr_7C_3 [1,2] or high strength tungsten carbides WC , chromium Cr_3C_2 , silicon SiC , titanium TiC , etc. They make it possible to obtain large primary or smaller secondary carbides of these elements [3]. Reinforcing phases of NiCrBSi coatings have large hardness values compared with the matrix and contribute significantly to the overall coating hardness. However, the presence of such phases in the structure of the coating can have an ambiguous effect on its wear resistance. It is known that, under the action of abrasive grains, large carbides are prone to local fragmentation [4]. The presence of large hardening particles can even lead to accelerated wear [5]. The introduction of significant amounts of titanium carbide in the chromium-nickel coating can be accompanied by coating embrittlement [6]. In [7], NiCrBSi-TiC composite coatings were characterized by reduced ability under conditions of repeated elastoplastic deformation. This was explained by the presence of large TiC carbides in the coating



к ускоренному износу [5]. Введение в состав хромоникелевого покрытия значительных количеств карбида титана может сопровождаться охрупчиванием покрытия [6]. В работе [7] композиционные покрытия NiCrBSi-TiC характеризовались пониженной способностью в условиях повторяющегося упругопластического деформирования. Это объяснялось наличием в покрытии крупных карбидов TiC, способствующих ускоренному трещинообразованию при пульсирующем механическом контакте. В качестве материалов для покрытий были использованы порошки сплавов системы NiCrBSi гранулометрического состава 40-160 мкм – ПГ-CP2 (0,48% C; 14,8% Cr; до 5% Fe; 2,9% Si; 2,1% B; остальное – Ni) и порошка TiC гранулометрического состава 50-100 мкм в количестве 25 мас. % [8]. Газопорошковая лазерная наплавка проводилась CO₂-лазером непрерывного действия при мощности излучения 1,4-1,6 кВт, скорости 160-180 мм/мин, расходе порошка 2,9-4,9 г/мин, размере лазерного пятна на поверхности 6×1,5 мм. При лазерной наплавке порошков ПГ-CP2 и (75%ПГ-CP2 + 25%TiC) микротвердость покрытий составила соответственно 520±10 и 770±60 HV 0,1. Формирование твердых упрочняющих фаз TiC (2500-2900 HV) и (Ti, Cr)(C, B) (~2000 HV) в покрытии 75% ПГ-CP2 + 25% TiC обуславливает резкое снижение интенсивности изнашивания в 2,2-2,5 раза по сравнению с покрытием ПГ-CP2 при испытании по корунду, твердость которого близка твердости карбидов, боридов и карбоборидов хрома и заметно уступает твердости карбида титана.

Металлокерамические порошки для наплавки содержали 60% карбида вольфрама и 40% порошка на основе никеля по массе [9]. Плазменную наплавку производили при напряжении 25 В и токе 140-160 А и расстоянии от торца плазматрона 14 мм при расходе порошка 25-30 г/мин и скорости перемещения 0,3-0,5 мм/с. Ширина наплавленных дорожек составляла 25-30 мм при толщине 4-6 мм. Испытание на абразивное изнашивание производили по стандарту США ASTM-G65-04. Абразивная износостойкость увеличилась в 2-5 раз, причем большие ее значения наблюдаются при увеличении содержания хрома от 8 до 14%. Твердость порошка на никелевой основе не превышала 50 HRC.

На образцы высокопрочной низколегированной стали Q550 с размерами 10×20×60 мм наносили порошковую обмазку толщиной 1,0 мм с использованием в качестве связующего спирт [10]. Химический состав используемого порошка на основе никеля в весовых процентах: C 0,8-1,2%, B 3-3,5%, Si 3,5-4,0%, Cr 14-16%, Fe 14-15%. В состав шихты для

that promote accelerated cracking during pulsating mechanical contact. As materials NiCrBSi alloys system powders have been used for coatings with particle size distribution of 40-160 microns – ПГ-CP2 (0.48% C; 14.8% Cr; 5% Fe; 2.9% Si; 2.1% B; remaining part – Ni) and TiC powder with particle size distribution of 50-100 microns in an amount of 25 wt% [8]. Gas powder laser cladding was conducted with CO₂ laser at a continuous output power of 1.4-1.6 kW and a speed of 160-180 mm/min, the powder flow rate 2.9-4.9 g/min, laser spot size on the surface of 6 × 1.5 mm. In the case of laser cladding of ПГ-CP2 powders and (75% ПГ-CP2 + 25% TiC), the microhardness of the coatings was 520 ± 10 and 770 ± 60 HV 0.1, respectively. Formation of hard reinforcing phases of TiC (2500-2900 HV) and (Ti, Cr)(C, B) (~ 2000 HV) in the coating 75% ПГ-CP2 + 25% TiC causes a sharp decrease in wear rate by 2.2-2.5 times compared with the ПГ-CP2 coating during the corundum test the hardness of which is close the that of carbides, borides and chromium carboborides and markedly inferior to that of titanium carbide.

Metal-ceramic cladding powders contained 60% tungsten carbide and 40% nickel-based powder by weight [9]. Plasma cladding was performed at a voltage of 25 V and a current of 140-160A and a distance from the end of plasma torch of 14 mm at a rate of powder 25-30 g/min and the travel speed of 0.3-0.5 mm/s. The width of the weld track is 25-30 mm at a thickness of 4-6 mm. The abrasion test was carried out in accordance with ASTM-G65-04. The abrasive wear resistance has increased by a factor of 2-5, with its large values being observed when the chromium content is increased from 8 to 14%. Hardness powder on nickel basis not exceeded 50 HRC.

The samples of high-strength low-alloy steel Q550 with dimensions of 10 × 20 × 60 mm were coated with powder coating using alcohol 1.0 mm thick as a binder [10]. The chemical composition of the nickel-based powder used in the percentages by weight is as follows: C 0.8-1.2%, B 3-3.5%, Si 3.5-4.0%, Cr 14-16%, Fe 14-15%, 20% by weight of monocrystalline tungsten carbide with a particle size of 100-200 μm was introduced into the coating charge composition. The samples were dried at 250 °C for 30 minutes. Laserline LDF4000-100 device with a wavelength of 980 nm, and a maximum laser power of 4.4 kW was used for laser cladding. The size of the laser spot on the surface of the sample was 17 × 1.5 mm, the beam travel speed was 3 mm/s. The argon flow rate was 12 l/min. The wear test was carried out on a MM-2000 friction machine.

Coatings obtained at a radiation power of 3.6 kW have wear resistance by 6.8 times higher than the base material of the sample.

обмазки вводили 20% по массе монокристаллический карбид вольфрама с размером частиц 100–200 мкм. Образцы высушивали при температуре 250 °С в течение 30 минут. Для лазерной наплавки использовали установку фирмы Laserline LDF4000-100 с длиной волны 980 нм, и максимальной мощностью лазера 4,4 кВт. Размер лазерного пятна на поверхности образца составлял 17×1,5 мм, скорость перемещения луча 3 мм/с. Расход аргона составлял 12 л/мин. Испытание на износ проводили на машине трения ММ-2000.

Покрyтия, полученные при мощности излучения 3,6 кВт, имеют износостойкость в 6,8 раза выше, чем материал основы образца.

Целью работы является определение коэффициента износостойкости покрытий в зависимости от химического состава шихты и режимов лазерной наплавки с помощью склерометрирования и испытаний на абразивное изнашивание.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАПЛАВКИ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводили на автоматизированном комплексе ИМАШ РАН [11]. Мощность излучения варьировали в пределах 800–1200 Вт при скорости перемещения луча 5–10 мм/с. Удельная плотность мощности составляла 38–126 Вт·с/мм². Для наплавки выбраны порошки на основе никеля с размером частиц 40–100 мкм марок ПР-НХ15СР2 и ПР-НХ17СР4. В качестве добавок использовали нанопорошки карбидов вольфрама и титана с размером частиц 20–100 нм. Образцы изготавливали из стали 40Х и чугуна ВЧ60-2 с размерами 15×20×60 мм. Толщина наплавленного слоя составляла 0,7–0,8 мм. Металлографические исследования выполняли с использованием микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 0,98Н. 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. Испытания на абразивное изнашивание проводили по схеме Бринелля – Хаворта [12]. К вращающемуся резиновому диску прижимался плоский образец с наплавленным покрытием или образец из основного материала с нагрузкой 15Н. В зону трения подавался кварцевый песок с размером частиц 0,2–0,6 мм. Продолжительность испытаний составляла 10 минут. Кроме того, оценку коэффициента износостойкости покрытия и основного материала выполняли склерометрированием [13]. Нагрузка на индентор при царапании составляла 0,98Н на

The aim of the study is to determine the coefficient of wear resistance of coatings, depending on the charge chemical composition and the modes of laser cladding using sclerometric method and abrasion testing.

EQUIPMENT FOR SURFACING SAMPLES AND RESEARCH METHODS

The experiments were carried out on the automated complex of IMS of RAS [11]. The radiation power varied from 800 to 1200 W, with a beam speed of 5–10 mm/s. The specific power density was 38–126 W·s/mm². For cladding, nickel-based powders with a particle size of 40–100 μm of grades ПР-НХ15СР2 and ПР-НХ17СР4 were chosen. Nano powders of tungsten and titanium carbides with a particle size of 20–100 nm were used as additives. The samples were made of steel 40X and cast iron ВЧ60-2 with dimensions 15×20×60 mm. The thickness of the deposited layer was 0.7–0.8 mm. Metallographic studies were performed using a ПМТ-3 microhardness tester at a load of 0.98 N. The structure and chemical composition of the deposited layers were examined using a TESCAN VEGA 3 SBH scanning electron microscope with the system of energy-dispersive analysis using the modes of reflected and secondary electrons. The tests for abrasive wear were carried out according to the Brinell-Haworth

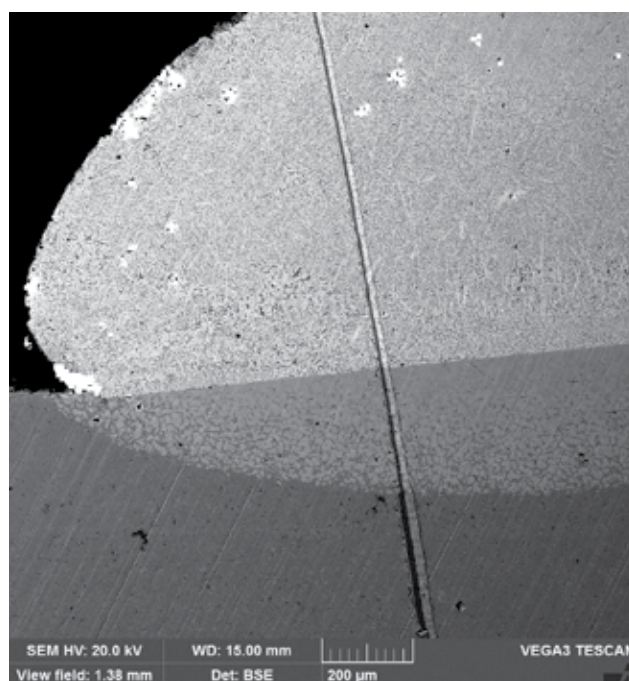


Рис. 1. Микрошлиф единичной наплавленной дорожки порошком ПР-НХ15СР2×200

Fig. 1. Microsection of a single track cladded with ПР-НХ15СР2×200 powder

Таблица 1. Определения коэффициента износостойкости при наплавке чугуна**Table 1.** Determination of the coefficient of wear resistance for cast iron cladding

№ п/п Ser. No	Марка материала основы или порошка Brand of base material or powder	Микротвердость, МПа Microhardness, MPa	Ширина царапины, мкм Scratch width, μm	Коэффициент, С Coefficient, C	Коэффициент износостойкости, расчет / эксперимент Wear resistance coefficient, design / experiment
1	Чугун / Cast iron ВЧ60-2	3 910–4 380	35	1	1/1
2	ПР-НХ15СР2	4 950–5 520	28	1,2	1,5/1,53
3	ПР-НХ15СР2	4 680–5 220	28,5	1	1,18/1,22
4	ПР-НХ15СР2	4 390–4 960	28,9	0,7	0,85/0,088

приборе ПМТ-3. Скорость перемещения алмазного индентора составляла 10 мм/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В первой серии экспериментов лазерную наплавку выполняли порошком ПР-НХ15СР2 на образцы из чугуна ВЧ60-2. В табл. 1 представлены результаты определения микротвердости и износостойкости по ширине царапины в сравнении с испытаниями на абразивное изнашивание при наплавке

scheme [12]. A flat specimen with a fused coating or a sample of the base material with a load of 15 N was pressed against the rotating rubber disc. Quartz sand with a particle size of 0.2–0.6 mm was fed into the friction zone. The duration of the test was 10 minutes. Furthermore, the coefficient of wear resistance of the coating and the base material was estimated using sclerometric method [13]. The indenter load during scratching was 0.98 N on the ПМТ-3 device. The speed of movement of the diamond indenter was 10 mm/s.

чугуна. Коэффициент износостойкости определялся из соотношения [13]: $K=C \cdot b/d$, где b – ширина царапины основного материала, d – ширина царапины наплавленного слоя, измеряемые в микрометрах. C – коэффициент, определяемый с учетом особенностей процесса лазерной наплавки (твёрдость покрытия, режимы обработки и добавки), величина коэффициента C варьируется в пределах 0,7–5,5

При лазерной наплавке образца № 2 глубина зоны оплавления основного материала не превышала 100 мкм. Зона наплавки образцов № 3 и 4 имеет пониженное значение микротвёрдости, связанное с глубоким проплавлением основы на 0,4–0,5 и 0,7–0,8 мм соответственно, что вызвано превышением погонной энергии при обработке образцов.

Во второй серии экспериментов лазерную наплавку на образцы стали 40Х выполняли порошком ПР-НХ17СР4. При оптимальных режимах обработки получены значения микротвёр-

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES

In the first series of experiments, laser cladding was carried out with powder ПР-НХ15СР2 for the samples from cast iron ВЧ60-2. Table 1 presents the results of the determination of microhardness and wear resistance, along the width of the scratch in comparison with the tests for abrasive wear during the cast iron cladding. The coefficient of wear resistance was determined from the equation [13]: $K=C \cdot b/d$, where b is the width of the scratch of the base material, d is the width of the scratch of the clad layer, measured in micrometers. C is the coefficient determined with allowance for the features of the laser cladding process (hardness of the coating, treatment modes and additives), C coefficient magnitude varies within the range of 0,7–5,5.

For laser cladding of sample No. 2, the depth of the burnt-off zone of the base material did not exceed 100 μm . The cladding zones of samples Nos. 3 and 4 has a reduced microhardness value associated with deep penetration into the base for 0.4–0.5 and 0.7–0.8 mm,

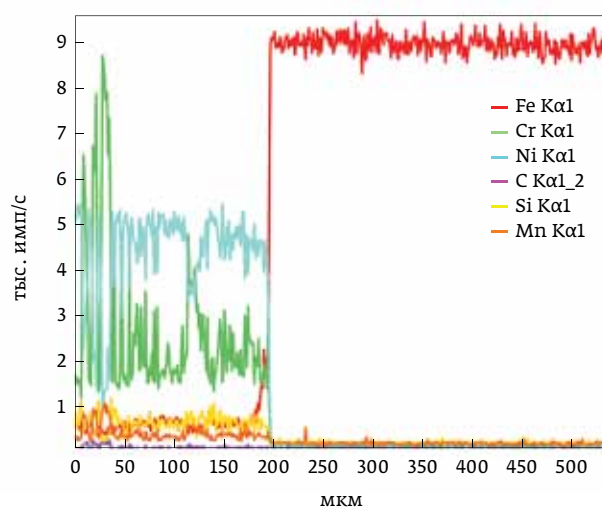
Таблица 2. Определения коэффициента износостойкости при наплавке стали 40Х порошком ПР-НХ17СР4 и с добавками нанокарбида титана

Table 2. Determination of the wear resistance coefficient for cladding of steel 40X with powder ПР-НХ17СР4 and with additives of titanium carbide nano powder

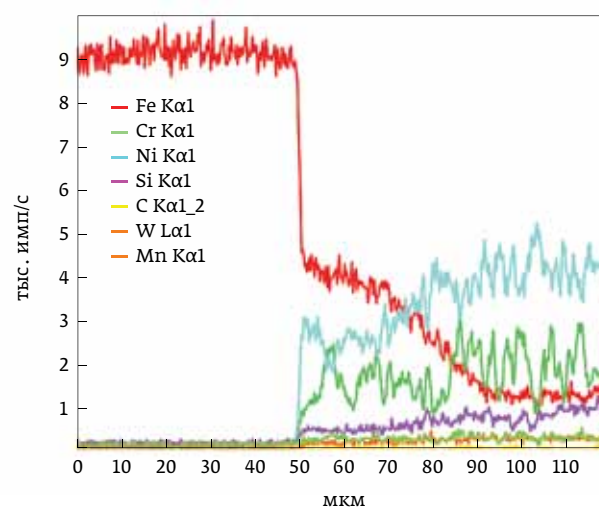
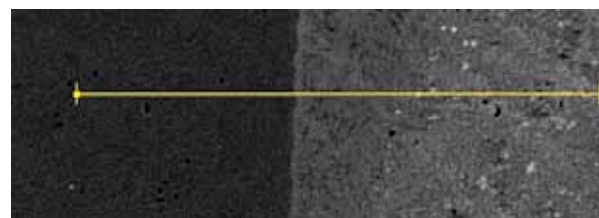
№ п/п Ser. No	Марка материала основы или порошка Brand of base material or powder	Микротвёрдость, МПа Microhardness, MPa	Ширина царапины, мкм Scratch width, μm	Коэффициент, C Coefficient, C	Коэффициент износостойкости, расчет/эксперимент Wear resistance coefficient, design / experiment
1	Сталь / Steel 40X	1970–2260	40	1	1/1
2	ПР-НХ17СР4	7840–10600	18	4,5	10/10,3
3	ПР-НХ17СР4	7180–9640	19,2	3	6,25/6,2
4	ПР-НХ17СР4	7180–9640	20,3	1,8	3,54/3,52
5	1360 с добавками нанокарбида титана 10%	8670–11200	18	5	11,1/11,2
6	1360 с добавками нанокарбида титана 10% 1360 with additives of titanium carbide nano powder 10%,	7650–9870	18,7	3	6.41/6,5
7	1360 с добавками нанокарбида титана 10% 1360 with additives of titanium carbide nano powder 10%,	6580–8960	20,1	1,9	3,78/3,9

Примечание: глубина проплавления основы образцов 6 и 7 составила 0,4 и 0,8 мм соответственно.

Note: the depth of penetration of the base of samples 6 and 7 was 0.4 and 0.8 mm, respectively.



a)



b)

Рис. 2. Распределение химических элементов в наплавленном слое на границе со сталью 40Х: а – наплавка расфокусированным лазерным лучом; б – наплавка сканирующим с частотой 220 Гц лазерным лучом
Fig. 2. Distribution of chemical elements in the clad layer at the interface with steel 40X

дости наплавленного покрытия 7840–10600 МПа. При этом коэффициент износостойкости при склерометрировании равен 10, а при испытании на абразивное изнашивание 10,3 (табл. 2).

При повышенной мощности излучения или низкой скорости перемещения детали (луча) происходит проплавление материала основы на глубину 0,4–1,0 мм. Это приводит к резкому уменьшению микротвердости наплавленного слоя и появлению дефектов в виде пор и трещин. При отклонении от оптимальных режимов наплавки и проплавления основы на глубину более 0,1 мм наблюдается уменьшение износостойкости покрытия.

В третьей серии экспериментов на образцы стали 40Х наплавливали порошок ПР-НХ15СР2 и с добавками нанопорошка карбида вольфрама в количестве 3–7% с размером частиц 20–100 нм. На рис. 1 представлен микрошлиф единичной наплавленной дорожки порошком ПР-НХ15СР2 с нанесенной алмазным индентором царапины. Под зоной наплавки расположена зона лазерной закалки из твердого состояния. Равномерная

respectively, which is caused by excess heat input in the processing of the samples.

In the second series of experiments, laser cladding of 40X steel samples was performed with the ПР-НХ17СР4 powder. Under optimal processing conditions, the microhardness values of the clad layer of 7840–10600 МПа were obtained. At the same time, the coefficient of wear resistance obtained by sclerometric method is 10 (10.3 in the abrasion wear test) (Table 2).

With high radiation power or low speed of the part (beam) travel, the base material is penetrated to a depth of 0.4–1.0 mm. This leads to a sharp decrease in the microhardness of the clad layer and the appearance of defects in the form of pores and cracks. When deviating from the optimal cladding conditions and penetrating into the base to a depth of more than 0.1 mm, a decrease in the wear resistance of the coating is observed.

In the third series of experiments, laser cladding of 40X steel samples was performed with ПР НХ15СР2 powder and additives of tungsten carbide nano powder

Таблица 3. Определения коэффициента износостойкости при наплавке стали 40X порошком ПР-НХ15СР2 и с добавками нанопорошка карбида вольфрама

Table 3. Determination of the wear resistance coefficient for surfacing of steel 40X with powder ПР-НХ15СР2 and with additives of tungsten carbide nano powder

№ п/п Ser. No	Марка материала основы или порошка Brand of base material or powder	Микротвердость, МПа Microhardness, MPa	Ширина царапины, мкм Scratch width, μm	Коэффициент, С Coefficient, C	Коэффициент износостойкости, расчет / эксперимент Wear resistance coefficient, design / experiment
1	Сталь / Steel 40X	2 320–2 440	32	1	1/1
2	ПР-НХ15СР2	6 400–6 600	23	2,5	3,5/3,54
3	ПР-НХ15СР2 С добавками кар- бида вольфрама 3% with additives of tungsten carbide 3% 6920–6600	6 920–6 600	20,5	2,9	4,6/4,58
4	ПР-НХ15СР2 С добавками кар- бида вольфрама 5% with additives of tungsten carbide 5% 7180–8060	7 180–8 060	18,9	3,16	5,8/5,83
5	ПР-НХ15СР2 С добавками кар- бида вольфрама 7% with additives of tungsten carbide 7% 7620–9160	7 620–9 160	17,4	3,85	7,1/7,12

ширина царапины в зоне наплавки свидетельствует о равномерности механических свойств в покрытии.

На рис. 2 показаны микрошлифы и графики распределения химических элементов наплавленного слоя на границе с материалом основы: 2а – наплавка расфокусированным лазерным лучом, 2б – наплавка сканирующим с частотой 220 Гц лазерным лучом. Применение поперечных высокочастотных колебаний лазерного луча приводит к оплавлению стали 40Х на глубину до 50 мкм. На графике (см. рис. 2б) появляется железо, содержание которого практически равно содержанию никеля на границе со сталью 40Х. Химическое соединение материала наплавки и основы свидетельствует о более высокой прочности сцепления покрытия при использовании высокочастотного сканирования луча при одинаковой мощности излучения и скорости перемещения образца. Положительные результаты наплавки получены при плотности энергии излучения до 50 Вт·с/мм². При дальнейшем увеличении плотности энергии происходит выгорание легирующих элементов и разложение карбидной фазы. Износостойкость при этом резко снижается (табл. 3).

in an amount of 3–7% with a particle size of 20–100 nm. Fig. 1 shows microsections of a single track clad with ПР-НХ15СР2 powder with a scratch made with a diamond indenter. There is a zone of laser hardening from the solid state under the cladding zone. Uniform width of a scratch in the cladding zone testifies to uniformity of mechanical properties in coating.

Fig. 2 shows microsections and graphs of distribution of chemical elements of the clad layer at the interface with the base material: 2а – cladding with a defocused laser beam, 2б – cladding with a scanning laser beam at 220 Hz. Application of transverse high-frequency oscillations of the laser beam results in melting of 40X steel to a depth of up to 50 microns. The graph (see Fig. 2b) shows the occurrence of iron with the content practically equal to the nickel content at the interface with steel 40X. The chemical bonding of the cladding material and the substrate indicates a higher adhesion strength of the coating using high-frequency beam scanning at the same radiation power and speed of sample travel. Positive results of cladding were obtained at a radiation energy density of up to 50 W · s/mm². With a further increase in the energy density, the alloying elements burn out and the carbide phase



Разработанная методика определения коэффициента износостойкости с помощью склерометрирования позволяет на образцах-свидетелях металлографическими исследованиями сократить цикл испытаний, а в ряде случаев быть единственным способом, когда невозможно в сжатые сроки определить износостойкость крупногабаритных изделий: коленчатых валов, валков прокатных станов, шеек валов газовых и паровых турбин и других узлов трения. Дальнейшие исследования в этой области позволят более точно определять коэффициент износостойкости с учетом статистического анализа.

ВЫВОДЫ

Разработана методика определения износостойкости покрытий при лазерной наплавке с помощью склерометрирования.

Отклонение коэффициентов износостойкости покрытий при склерометрировании и абразивном изнашивании составило не более 5%.

Показано, что превышение плотности энергии лазерного излучения более $50 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{мм}^2$ приводит к резкому снижению коэффициента износостойкости при лазерной наплавке.

decomposes. Wear resistance in this case is sharply reduced (Table 3).

The developed technique for determining the wear resistance coefficient by means of sclerometric method makes it possible to shorten the test cycle on samples by metallographic studies, and in a number of cases it is the only way when it is impossible to determine the wear resistance of large-sized products in a short time: crankshafts, rolling mill rolls, shafts of gas and steam turbines and other friction assemblies. Further studies in this area will allow more accurate determination of the coefficient of wear resistance, taking statistical analysis into account.

CONCLUSIONS

A technique for determining the wear resistance of coatings in laser cladding using sclerometric method has been developed.

The deviation of the coefficients of wear resistance of coatings with sclerometric method and abrasive wear was not more than 5%.

It is shown that exceeding the energy density of laser radiation above $50 \text{ W} \cdot \text{s} / \text{mm}^2$ leads to a sharp decrease in the coefficient of wear resistance in laser cladding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Q., Zhang D., Lei T., Chen Ch., and Chen W. Comparison of Laser-Clad and Furnace-Melted Ni-Based Alloy Microstructures // Surface and Coatings Technology, 2001, (137), 122–135.
2. Gomez-del R.T., Garrido M.A., Fernandez J.E. et al. Influence of the Deposition Techniques on the Mechanical Properties and Microstructure of NiCrBSi Coatings // Journal of Materials Processing Technology, 2008, (204), № 1–3, p. 304–312.
3. Nurminen J., Nakki J., and Vuoristo P. Microstructure and Properties of Hard and Wear Resistant MMC Coatings Deposited by Laser Cladding // Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009, (27), p. 472–478.
4. Leech P.W., Li X.S., and Alam N. Comparison of Abrasive Wear of a Complex High Alloy Hardfacing Deposit and WC–Ni Based Metalmatrix Composite // Wear, 2012, (294–295), p. 380–386.
5. Van Acker K., Vanhoyweghen D., Persoons R., Vangrunderbeek J. Influence of Tungsten Carbide Particle Size and Distribution on the Wear Resistance of Laser Clad WC / Ni Coatings // Wear, 2005, (258), p. 194–202.
6. Cai B., Tan Y.-F., He L. et al. Tribological Properties of TiC Particles Reinforced Ni-Based Alloy Composite Coatings // Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, (13), p. 1681–1688.
7. Саврай Р. А., Макаров А. В., Соболева Н. Н. и др. Контактная выносливость NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты, 2014 (65), № 4, с. 43–51.
Savraj R. A., Makarov A. V., Soboleva N. N. et al. Kontaktnaya vyносливость NiCrBSi pokrytij, poluchennyh metodom gazoporoshkovoj lazernoj naplavki // Obrabotka metallov: tehnologiya, oborudovanie, instrumenty, 2014 (65), № 4, с. 43–51.
8. Макаров А. В., Соболева Н. Н., Малигина И. Ю. Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой // Трение и износ, 2017, № 4, (38), с. 311–318.
Makarov A. V., Soboleva N. N., Malygina I. Yu. Rol uprochnyayushih faz v soprotivlenii abrazivnomu iznashivaniyu NiCrBSi pokrytij, sformirovannyh lazernoj naplavkoj // Trenie i iznos, 2017, № 4, (38), с. 311–318.
9. Liyanage T., Fisher G., Gerlich A. P. Microstructures and abrasive wear performance of PTAW deposited Ni–WC overlays using different Ni-alloy chemistries // Wear, 2012, (274–275), p. 345–354.
10. Ma Q., Li Y., Wang J., Liu K. Microstructure evolution and growth control of ceramic particles in wide-band laser clad Ni60 / WC composite coatings // Materials and Design, 2016, (92), p. 897–905.
11. Бирюков В. П., Дозоров А. В. Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала / Проблемы машиностроения и надежности машин, № 1, 2006, с. 60–66.
Biryukov V. P., Dozorov A. V. Lazernye sistemy dlya uprochneniya, naplavki detalей i tochnogo raskroya listovogo materiala / Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin, № 1, 2006, с. 60–66.
12. Хрущов М. М., Бабичев М. М. Абразивное изнашивание. – М.: Наука. 1970.
Hrushov M. M., Babichev M. M. Abrazivnoe iznashivanie. – М.: Nauka. 1970.
13. Патент 2644 440, РФ, МПК G01N3 / 56. Способ определения износостойкости покрытия / Бирюков В. П., опублик. 2018.
Patent 2644 440, RF, MPK G01N3 / 56. Sposob opredeleniya iznosostojkosti pokrytiya / Biryukov V. P., publ. 2018.

РЕНТГЕНОВСКИЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ XFEL



В Гамбурге (Германия) при активном участии российских институтов ИЯФ СО РАН, ИЯИ РАН, НИИЭФА, НИЦ "Курчатовский институт" введен в научную эксплуатацию самый крупный в мире сверхпроводящий линейный ускоритель электронов – Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах XFEL. Начались первые эксперименты. Европейский XFEL открывает огромные возможности для изучения химических и физических процессов, происходящих в веществе.

ras.ru

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА НА ОСНОВЕ БЕРИЛЛИЯ ДЛЯ ЭУФ-ДИАПАЗОНА ($\lambda = 11,1\text{--}30,4$ нм)



В Институте физики микроструктур РАН, входящем в федеральный научно-исследовательский центр Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород), подготовлена к промышленному внедрению технология напыления многослойных зеркал на основе бериллия с высоким коэффициентом отражения для диапазона длин волн 11,1–30,4 нм. Оптические системы с такими зеркалами увеличат контраст изображений телескопов для изучения короны Солнца в ЭУФ-диапазоне до 2 раз. В микроэлектронике они повысят эффективность нанолитографов следующего поколения.

ras.ru