



ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ И СОСТАВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА АБРАЗИВНУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ

В.П.Бирюков, к. т. н., *laser-52@yandex.ru*,
А.А.Фишков, ФГБУН Институт машиноведения
им. А.А.Благовравого Российской академии наук
(ИМАШ РАН);
Д.Ю.Татаркин, *dTatarkin@ntoire-polus.ru*,
Е.В.Хриптович, ООО НТО "ИРЭ-Полус";
Д.П.Быковский, аспирант,
В.Н.Петровский, к. т. н., *vnpetrovskij@mephi.ru*,
НИЯУ МИФИ

Для продления рабочего ресурса изделий, подверженных абразивному изнашиванию, широко применяют наплавку. При этом наплавленный слой должен иметь хорошую прочность сцепления с основой и содержать минимум дефектов. Но какой технологии наплавки следует отдать предпочтение: электродуговой, электромагнитной или лазерной? Представлены результаты исследований режимов лазерной наплавки для различных групп деталей машин и агрегатов. Определены характерные дефекты, образующиеся в результате изнашивания поверхностных тонкослойных и толстослойных слоев.

Технология наплавки известный способ повышения износостойкости изделий и повышения их ресурса работы. Однако, с появлением и развитием различных способов нанесения наплавленных слоев, проявилось различие в конечных результатах. Многочисленные исследования износостойкости наплавленных слоев, полученных электромагнитной наплавкой, показывают, что отсутствие карбидных фаз в слоях резко снижает износостойкость покрытий, выполненных из ферротитана [1]. При электродуговой наплавке для изделий, работающих в условиях гидроабразивного изнашивания, следует отдавать предпочтение тем наплавленным покрытиям, которые содержат карбидные фазы, обладающие большей износостойкостью

INFLUENCE OF MODES OF LASER CLADDING AND COMPOSITION OF POWDER MATERIALS ON ABRASION RESISTANCE OF THE COATINGS

V.P.Biryukov, D.S., *laser-52@yandex.ru*,
A.A.Fishkill, FSBI Blagonravov Mechanical
Engineering Institute of Russian Academy of Sciences
(MEI of RAS);
D.Y.Tatarkin, *dTatarkin@ntoire-polus.ru*,
E.V.Khriptovich, LLC TS "IRE-Polus";
D.P.Bykovsky, graduate student,
V.N.Petrovsky, D.S., *vnpetrovskij@mephi.ru*,
NNRU MEPHI

To extend the working life of the parts subject to abrasion, surfacing is widely used. Furthermore, the pad weld should have good adhesive strength to the substrate and contain minimum of defects. But which cladding technology should be preferred: electric, electromagnetic or laser one? The results of laser cladding research for different groups of machine parts and assemblies are given below. The characteristic defects resulting from wear of the surface of thin-film and thick-layers are defined.

Cladding technology has been a known way to improve the wear resistance of products and to improve their operational life. However, with the advent and development of various application methods of pad welds, the difference in the final results has become apparent. Numerous studies of the wear resistance of the pad welds obtained by electromagnetic cladding show that the absence of carbide phases in the welds greatly reduces the wear resistance of coatings made from ferrotitanium [1]. With electric surfacing for the parts operating under hydroabrasive wear, one should prefer the pad welds, which contain carbide phases, with greater wear resistance compared to the martensitic-austenitic structure [2]. On the contrary, the study of the nickel coating with a hardness of HRC 38–42 with no carbide phases obtained using laser cladding gas and fiber lasers showed that this technology increases the wear resistance in 2x [3, 4].

The pad weld should be free from defects (pores, cavities, cracks) and have good cohesive strength of

по сравнению с мартенсито-аустенитными структурами [2]. А изучение никелевых покрытий с твердостью HRC 38–42, наоборот, не имеющих карбидные фазы, полученных лазерной наплавкой с помощью газовых и волоконных лазеров показало, что при этой технологии износостойкость повышается в 2 раза [3, 4].

Наплавленный слой не должен содержать дефектов (пор, раковин, трещин) и иметь хорошую прочность сцепления наплавленного слоя с основой. Какими же способами можно этого добиться? Разберемся, как влияют режим лазерной наплавки и состав порошков на износостойкость изделия. Способы подачи присадочных материалов в зону лазерной наплавки можно разделить на две основные группы [5]. Первая – это предварительное нанесение присадочных материалов на обрабатываемую поверхность, вторая – подача материалов непосредственно в зону обработки одновременно с воздействием лазерного излучения. Наиболее распространен способ предварительного нанесения покрытий с помощью шликерных обмазок. Способ отличается большим КПД благодаря высокой поглощательной способности, обусловленной наличием связующего вещества и высоким коэффициентом использования присадочного материала. Применение шликерного покрытия подразумевает проведение операции предварительного нанесения присадочного материала, которая обычно не механизирована и выполняется с использованием шпателя или других инструментов вручную. Связующее вещество шликерных покрытий не должно быть токсичным и иметь способность обеспечивать технологичность изготовления паст. Однако способ подачи присадочного материала путем его принудительной подачи непосредственно в ванну расплава материала основы, благодаря автоматизации процесса, обладает высокой воспроизводимостью.

Лазерная наплавка изделий горнодобывающей промышленности, бурового инструмента производится с помощью композиционных порошковых материалов, содержащих мягкую матрицу с твердыми карбидными включениями, обеспечивающими повышение стойкости к абразивному изнашиванию покрытий [6–11]. Из композитов, составленных на металлической основе, хорошо себя зарекомендовал в качестве твердой фазы карбид вольфрама [12]. Он обладает большой растворимостью в стальной матрице и даже некоторой пластичностью в сравнении с другими карбидами, что обеспечивает его эффективное использование при электронно-лучевой

the pad weld with the substrate. What are the ways to achieve this? Let us examine the effect of laser cladding mode and the composition of the powders on the wear resistance of the parts. The methods of feeding filler material to a laser cladding zone can be divided into two major groups [5]. First is a prior application of dopant materials to the treated surface, the second one is to feed materials directly into the processing zone simultaneously with the action of the laser radiation. The most common method of prior coating is to use slip pasters. The process is distinct for higher efficiency due to its high absorption capacity, due to the presence of the binder and the high rate of use of filler material. Application of the coating slip includes an operation of pre-coating the filler material, which is generally mechanized and performed using a spatula or other hand instrument. Binder of slip coatings should not be toxic and should possess the ability to provide manufacturability of pastes. However, the method of feeding the filler material by force feeding directly into the molten bath of the base material, due to the automation of the process, has a high reproducibility.

Laser cladding of the products of mining, drilling tools is made via composite powder materials comprising soft matrix with solid carbide inclusions, which assure increased resistance to abrasion coatings [6–11]. Among the metal-based composites, tungsten carbide has been well-proven as a solid phase [12]. It has a high solubility in the steel matrix, and even possesses some plasticity in comparison with the other carbides, which provides its effective use in electron beam cladding (EBC). As the binder phase for EBC, R6M5 steel is preferable characterized by high heat resistance and wear resistance. Thus, the beads plated with high-speed steel are 5-fold superior than the beads of high-chrome cast iron by abrasion resistance, and 4-fold higher by time between regrinds [13]. With high heating and cooling rates of the small volume of the molten bath it is possible to retain some residual austenite and dissolve larger amount of the hardening phase in the solid solution. Destruction during abrasive wear of the carbide steel with metastable matrix increases almost 7-fold as compared with the material without phase transformation under the same test conditions. [14] Furthermore, this steel has an effect of superplasticity that may allow to relax thermal stress and eliminate the formation of the cracking pattern in the hardened layer during the rapid cooling, thereby increasing its durability.

This research had several objectives: the development of technology of laser cladding coatings



наплавке (ЭЛН). В качестве связующей фазы при ЭЛН предпочтительно использовать сталь Р6М5, отличающуюся высокой теплостойкостью и износостойкостью. Так валки, плакированные быстрорежущей сталью, превосходят валки из высокохромистого чугуна по сопротивлению износу в 5 раз, а по сроку между переточками – в 4 раза [13]. При высоких скоростях нагрева и охлаждения малого объема ванны расплава, возможно, сохранить некоторое количество остаточного аустенита и растворить большее количество упрочняющей фазы в твердом растворе. Работа разрушения при абразивном изнашивании карбидостали с метастабильной матрицей возрастает почти в 7 раз по сравнению с материалом без фазовых превращений при тех же условиях испытаний [14]. Более того, данная сталь обладает эффектом сверхпластичности, что, возможно, позволит релаксировать термические напряжения и исключить образование сетки трещин в упрочненном слое в процессе быстрого охлаждения, тем самым, увеличивая его износостойкость.

Настоящая работа преследовала несколько целей: разработку технологии лазерной наплавки покрытий толщиной 3–5 мм при ширине слоя до 30 мм, разработку композиционных покрытий с высотой валиков 0,5–0,85 мм и оптимизацию режимов обработки для повышения абразивной износостойкости наплавленных слоев.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для экспериментов по отработке технологии покрытий с толщиной слоя 3–5 мм было использовано универсальное оборудование ООО НТО "ИРЭ-Полус", содержащее волоконный лазер ЛС-5, робот КУКА, оптическую головку фирмы PRECITEC и технологический стол. В качестве наплавочных материалов были выбраны порошки на никелевой основе, изготовленные фирмой Хёгенас, Швеция и ОАО "ПОЛЕМА", Россия (Тула). Размер частиц порошка составлял 40–150 мкм. Мощность лазерного излучения варьировалась в пределах 1800–3800 Вт. Скорость перемещения оптической головки составляла: в поперечном направлении 0,1–2 м/с и в продольном направлении 1–15 мм/с. Лазерную наплавку предварительно насыпанного порошка с толщиной слоя 3–5 мм производили на стальные плиты с размерами 140×140×20 мм. Образцы вырезали электроискровым методом размерами 25×70×20 мм.

Для наплавки композиционных покрытий была использована установка HUFFMAN HC-205,

3–5 mm thick with a layer width of up to 30 mm, the development of composite coatings with beads 0.5–0.85 mm high, and the optimization of treatment modes to increase the abrasive wear resistance of pad welds.

RESEARCH METHODOLOGY

Versatile equipment by LLC TS "IRE-Polus" containing fiber laser LS-5, KUKA robot, optical head by PRECITEC and technology table were used for the experiments to simulate the coating technology with a layer thickness of 3–5 mm. Nickel-based powders manufactured by Hëgenas, Sweden and JSC "POLEMA", Russia (Tula), were chosen as surfacing materials. The particle size of the powder has been 40 to 150 microns. Laser power has been varied from 1800–3800 watts. Speed of moving the optical head has been as follows: in the transverse direction – 0.1 to 2 m/s, in the longitudinal direction – 1 to 15 mm/s. Laser cladding of the pre-poured powder with a layer thickness of 3 to 5 mm has been performed on steel plates sized 140×140×20 mm. The samples have been cut by electric spark method sized 25×70×20 mm.

Installation, complete with a fiber laser, manufactured by LLC TS "IRE-Polus" has been used for the deposition of composite coatings. The laser power has been varied in the range of 300–600 W, the deposition rate has been 4 to 11 mm/s. The distance from the nozzle face to the substrate has been varied in the range of 4 to 7 mm. Argon gas flowing at a pressure of 0.2 MPa at a flow rate of 6 l/min has been used as a protective carrier gas. The powder consumption fed via feeder has been 0.33 to 1.93 g/min. Powder PR-10P6M5, sieved to fraction of up to 40 to 60 microns, has been used for surfacing with the addition of the powder blend by Hëgenas 44712 (Sweden) in an amount of 3 to 70%, containing tungsten carbide with cobalt binder phase in an amount of 12%.

Metallurgical studies have been performed on a scanning electron microscope EVO 50 by Carl Zeiss (Germany), a digital microscope AM413ML, metallographic microscope Altami MET 1C.

The microhardness of the samples has been measured by the Vickers method on PMT-3 and HVS-1000 apparatuses with automatic loading of the indenter with the load value $P=1$ N. The dwell time under load has been $t=20$.

Sample testing for abrasion has been conducted on friction machine BH-4 according to Brinell-Haworth scheme upgraded in MEI of RAS [15]. Weigh of the samples has been performed on electronic scales VIBRA HT / HTR 220TE with accuracy to 0.0001 g.

укомплектованная волоконным лазером мощностью 3,5 кВт, произведенным в ООО НТО "ИРЭ-Полюс". Мощность лазерного излучения варьировалась в интервале 300–600 Вт, скорость наплавки 4–11 мм/с. Расстояние от торца сопла до подложки изменялось в пределах 4–7 мм. В качестве защитного и транспортирующего газа использовали газ аргон, протекающий под давлением 0,2 МПа со скоростью 6 л/мин. Расход порошка, подаваемого с помощью питателя, составлял 0,33–1,93 г/мин. Для наплавки использовали порошок ПР-10Р6М5, просеянный до фракции 40–60 мкм, с добавлением в состав шихты порошка 44712 фирмы Хегенс (Швеция) в количестве 3–70%, содержащего карбид вольфрама с кобальтовой связующей фазой в количестве 12%.

Металлографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе марки EVO 50 производства фирмы Carl Zeiss (Германия), цифровом микроскопе AM413ML, металлографическом микроскопе Альтами MET IC.

Микротвердость образцов измерялась по методу Виккерса на приборах ПМТ-3, HVS-1000 с автоматическим нагружением индентора при величине нагрузки $P=1$ Н. Время выдержки под нагрузкой было выбрано $t=20$ с.

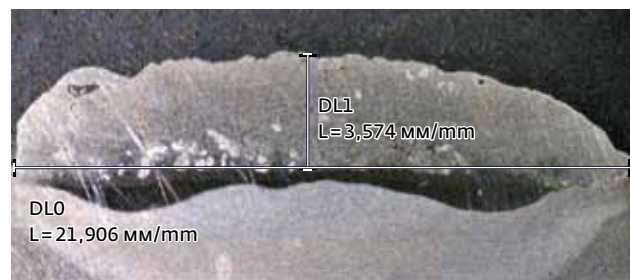


Рис.1. Микрошлиф наплавленной единичной дорожки за один проход, $\times 7$

Fig. 1. Microsection of surfaced single track in a single pass, $\times 7$

For the development of processing modes of the thick coatings powder by Hëgenas has been used (declared hardness is HRC 58) with different thickness of the poured layer of 3 to 5 mm. The pad welds with a thickness of 3 to 4.3 mm and a width of 20 to 30 mm per pass have been obtained [16]. Figure 1 shows the microsection of a single build-up track. When selecting the optimal conditions the radiation power, movement speed and the diameter of the laser beam on the surface of the powder have been varied. Changes regularity of microhardness of the pad welds have been identified. Overlap zone of the surfaced

Испытания образцов на абразивное изнашивание проводилось на машине трения БХ-4 по модернизированной в ИМАШ РАН схеме Бринелля-Хаворта [15]. Взвешивание образцов выполняли на электронных весах VIBRA HT/HTR 220TE с точностью измерения 0,0001 г.

Для отработки технологических режимов толстослойных покрытий применяли порошок фирмы Хёгенас (заявленная твердость HRC 58) с различной толщиной насыпанного слоя 3-5 мм. Получены наплавленные слои толщиной 3-4,3 мм и шириной 20-30 мм за один проход [16]. На рис.1 представлен микрошлиф единичной наплавленной дорожки. При выборе оптимальных режимов варьировали мощность излучения, скорость перемещения и диаметр лазерного луча на поверхности порошка. Были выявлены закономерности изменения микротвердости в наплавленном слое. Зона перекрытия наплавленных дорожек показана на рис.2. В ней отсутствуют дефекты типа пор, трещин и раковин, также как и в дорожках наплавки при оптимальных режимах обработки.

При изменении режимов наплавки микротвердость в наплавленном слое изменялась в широких пределах 6120-12000 МПа. При высокой плотности энергии лазерного луча часть легирующих элементов и углерода выгорает, и микротвердость в наплавленном слое понижается, появляются дефекты в виде пор. При низких значениях плотности энергии лазерного излучения происходит не полное сплавление порошкового материала и снижается микротвердость наплавленных слоев.

В таблице 1 представлены результаты испытаний на абразивное изнашивание, выполненных по схеме Бринелля-Хаворта. К вращающемуся резиновому диску прижимался плоский образец с наплавленным покрытием. В зону трения подавался кварцевый песок с размером частиц 200-600 мкм. Продолжительность испытаний составляла 10 минут. По результатам испытаний трех образцов определяли среднюю величину потери массы наплавленного покрытия на каждом режиме обработки.

В результате проведенных исследований на абразивное изнашивание первой партии образцов были найдены оптимальные режимы лазерной наплавки порошковых покрытий. Вторая партия образцов наплавлялась порошками различной твердости и обеих фирм производителей порошковых материалов. На рис.3 представлена зависимость абразивного износа от твердости наплавленного слоя и образца стали 40Х (испы-

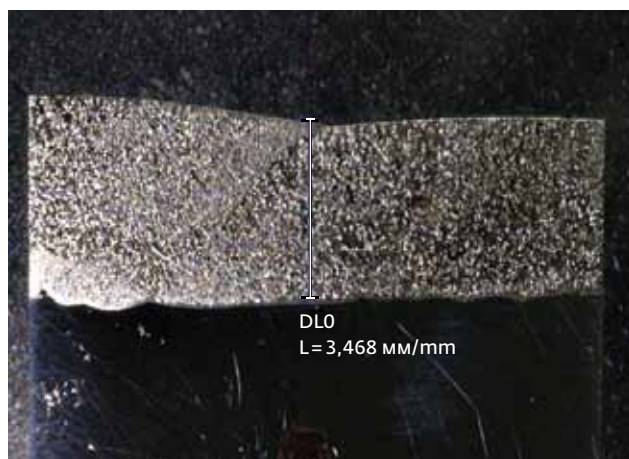


Рис.2. Микрошлиф зоны перекрытия наплавленных слоев $\times 10$

Fig. 2. Microsection of overlapping area of pad welds, $\times 10$

track is shown in Figure 2. It is free from the defects such as pores, cracks and cavities, as well as in surfacing tracks treated under optimal conditions.

When changing the cladding modes, microhardness in the pad weld has varied widely 6120 to 12000 МПа. With high density energy of a laser beam, a portion of alloying elements and carbon is burned, and the microhardness of the pad weld is reduced, such defects as pores appear. With low density energy of the laser radiation, incomplete fusion of the powder material occurs, thus decreasing the microhardness pad welds.

Table 1 shows the test results for abrasion made according to Brinell-Haworth scheme. A flat specimen

Табл. 1. Результаты испытаний на абразивный износ по схеме Бринелля-Хаворта

Table 1. Results of tests on abrasion according to Brinell-Haworth scheme

№	Марка порошка Powder make	Микротвердость, МПа Microhardness, МПа	Потеря массы, $\text{Кг} \cdot 10^{-4}$ Weight loss, $\text{kg} \cdot 10^{-4}$
1	1360	7180-8300	0,071
2	1360	7180-10800	0,035
3	1360	6120-9180	0,052
4	1360	7040-9540	0,048
5	1360	7180-8340	0,062

тания проводили по схеме Бринелля-Хаворта). Из приведенных данных следует, что наплавленные слои с твердостью HRC 58–61 (порошки фирмы Хёгенас - 1 и ОАО "ПОЛЕМА" - 2) по износостойкости в 10 раз выше, чем нормализованная сталь 40X (HB180) и в 4,6 раза выше, чем улучшенная сталь 40X (HB 250–270).

Отработку режимов лазерной наплавки порошка ПР-10Р6М5 проводили на единичных наплавленных валиках. Для проведения металлографических исследований были изготовлены шлифы. Наплавленные образцы разрезали перпендикулярно наплавленному дорожке. Общий вид наплавленного валика и его микроструктура представлен на рис.4 (а и б).

Геометрические параметры наплавленных валиков [17] (А: 0,5–0,85 мм – толщина наплавленного слоя; В: 0,05–0,2 мм – глубина проплавления основы; С: 1,2–1,4 мм – ширина зоны наплавки) зависят от скорости перемещения оптической головки, расхода порошкового материала, мощности лазерного излучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования химического состава наплавленных слоев и зоны проплавления основы показали, что химический состав соответствует химическому составу наплавляемой шихты. Измерения проводили от поверхности наплавленного слоя к основе по пяти точкам. В таблице 2 приведен элементный состав покрытия с 7% порошка 44712.

Микротвердость наплавленных слоев изменялась в широких пределах. Так при наплавке

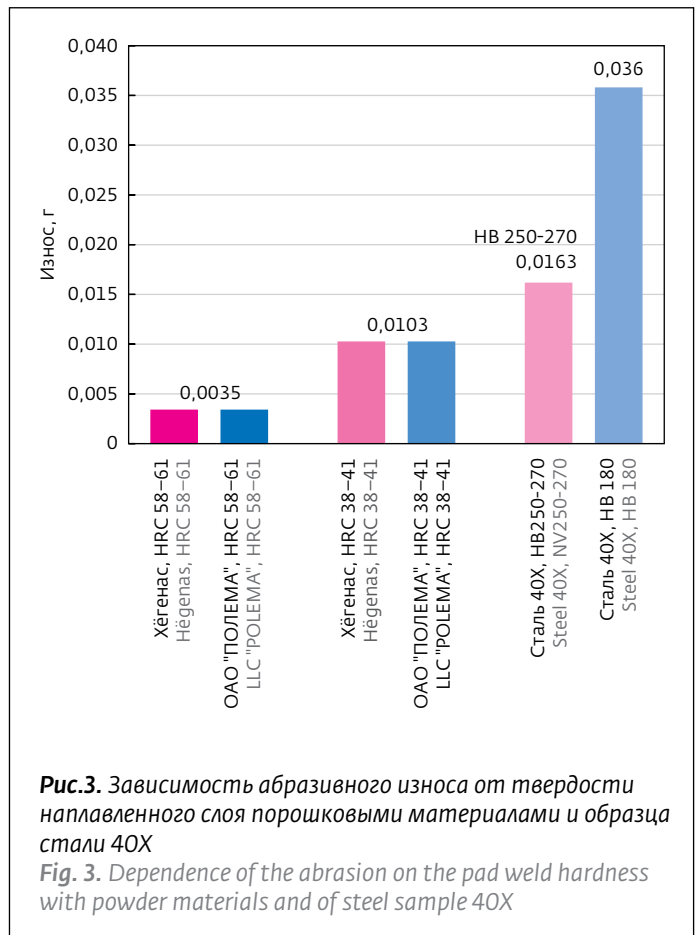


Рис.3. Зависимость абразивного износа от твердости наплавленного слоя порошковыми материалами и образца стали 40X

Fig. 3. Dependence of the abrasion on the pad weld hardness with powder materials and of steel sample 40X

with weld coating has been attached to the rotating rubber disk. The friction zone has been fed with quartz sand with a particle size of 200 to 600 microns. The duration of the test has been 10 minutes. According to

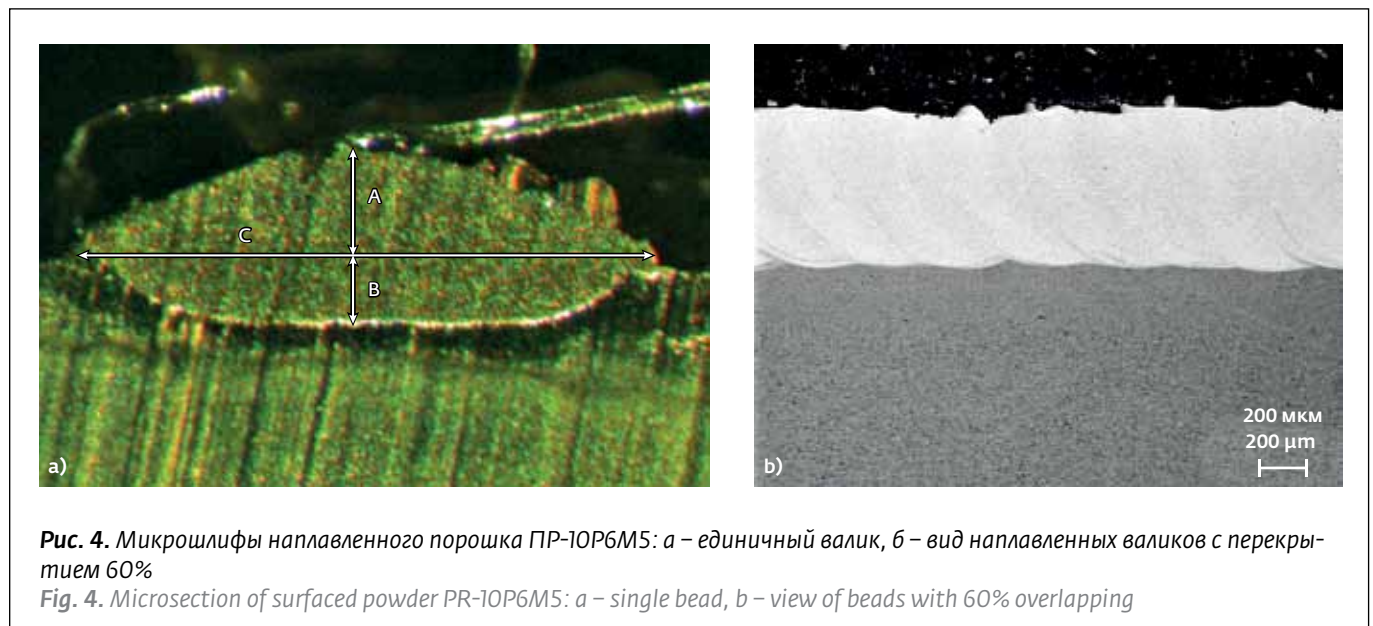


Рис. 4. Микршлифы наплавленного порошка ПР-10Р6М5: а – единственный валик, б – вид наплавленных валиков с перекрытием 60%

Fig. 4. Microsection of surfaced powder PR-10P6M5: a – single bead, b – view of beads with 60% overlapping

порошка ПР-10Р6М5 без добавок она варьировалась в пределах 6000–9600 МПа.

При введении карбида вольфрама микротвердость в наплавленных слоях изменялась в пределах 9900–14000 МПа. На рис.5 представлен график, полученный при измерении микротвердости зоны наплавки и подложки от поверхности к основе с шагом 100 мкм.

Для определения влияния лазерной наплавки на абразивную износостойкость проводились испытания в ИМАШ РАН образцов на машине трения БХ-4, при описанных выше, условиях испытаний. В таблице 3 приведены результаты испытаний на абразивный износ.

На рис.6а–в представлены испытанные образцы наплавленные с различным коэффициентом перекрытия дорожек. В процессе отработки режимов установлено, что при минимальном содержании карбида вольфрама 3–7% (образцы 2–4) возможна лазерная наплавка с перекрытием дорожек 60% (рис.6а). При этом припуск на шлифование не более 0,2 мм (рис.6б). С увеличением содержания карбида вольфрама с 10 до 70% при наложении дорожек на поверхности появляются трещины. Поэтому образцы 5–13 наплавливались с перекрытием дорожек 40% (рис.6в). Это привело к существенному ухудшению топографии поверхностного слоя и при шлифовании на глубину 0,3 мм видны необработанные участки наплавленных дорожек (рис.6в). В результате испытаний на абразивное изнашивание получено повышение износостойкости композиционного покрытия в 28 раз по сравнению с материалом основы, сталью 3 и в 9 раз по сравнению с наплавленным покрытием порошком ПР10-Р6М5 после шлифования.

Максимальная износостойкость получена при 10% содержании порошка 44712 от объема шихты. При дальнейшем увеличении карбидной фазы большая ее часть предположительно распадается при более высоких температурах расплавленной зоны, связанных с увеличением карбидной фазы, на вольфрам и углерод, которые не оказывают достаточного сопротивления при абразивном изнашивании. Следует отметить, что образцы № 5–13 не имели сплошной площади контакта с резиновым диском, и часть абразивных частиц не оказывала режущего или царапающего дей-

Таблица 2. Результаты послойного анализа элементного состава покрытия с 7% порошка 44712

Table 2. Results of the tests of the elemental composition of a coating with 7% of powder 44712

Точка анализа Test point	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	W
1	1,70	3,61	0,56	83,30	0,40	4,51	5,73
2	1,85	3,44	0,49	83,55	0,33	4,37	5,99
3	1,69	3,44	0,52	83,61	0,30	4,43	6,00
4	–	–	1,27	98,4	–	–	–
5	–	–	1,33	98,5	–	–	–

the results of the tests of three samples, the average value of the loss of mass of the coating surfaced on each processing mode was determined.

The studies on the abrasion of the first sample batch revealed the optimal modes for laser cladding of powder coatings. The second batch of samples has been surfaced with the powders of different hardness, and those of both powder materials manufacturers. Figure 3 shows the dependence of abrasion on the hardness of the pad weld and the sample of 40X steel (the tests have been carried out according to Brinell-Haworth scheme). From the given data, it follows that the pad welds with a hardness of HRC 58–61 (–1 for Hägenas powders and – 2 for JSC "POLEMA" powders) is 10-fold higher according to wear resistance than that of the normalized 40X steel (NV180) and is 4.6-fold higher than 40X improved steel (HB 250–270).

Processing of laser cladding modes for PR-10P6M5 powder has been carried out on single weld bead. Thin

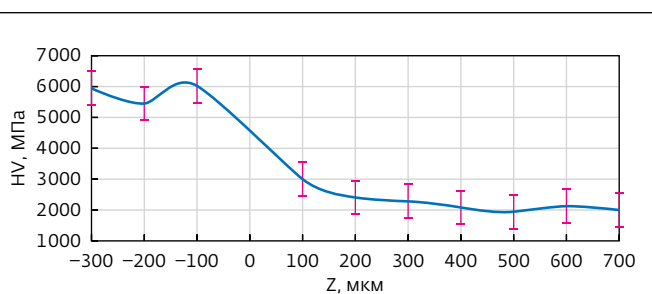


Рис. 5. Изменение микротвердости в вертикальном направлении от поверхности наплавленного слоя к подложке. (точка "0" соответствует переходной области между касательной к поверхности образца и наплавленным слоем)

Fig. 5. Change of the microhardness in the vertical direction from the surface of the pad weld to the substrate. (Point "0" corresponds to the transition region between the tangent to the sample surface and the pad weld)

ствия на поверхность образца. Этим возможно и объясняется столь высокое повышение износостойкости на машине трения БХ-4. Для уточнения влияния, зависимости процентного содержания карбида вольфрама, на абразивную износостойкость необходима дальнейшая обработка технологии лазерной наплавки с целью получения качественной поверхности после шлифования.

В результате проведенных исследований были отработаны режимы лазерной наплавки для различных групп деталей машин и агрегатов и определены характерные дефекты поверхностных слоев, образующиеся в результате изнашивания. Отметим, что толстослойные покрытия востребованы для деталей горнодобывающей и перерабатывающей промышленности: броневых плит, щек, дробилок и т.п. Тонкослойные покрытия применяются при ремонте локальных повреждений поверхностей трения валков прокатных станков, штампов и других деталей. Обе технологии дополняют друг друга и имеют многочисленные практические приложения. На абразивную износостойкость покрытий влияет состав порошкового материала и технология обработки. Так при наплавке порошка композиционного покрытия с долевым содержанием карбида вольфрама до 7%

sections have been prepared for the metallographic studies. Weld samples have been cut perpendicular to the weld tracks. General view of the weld bead and its microstructure is shown in Fig. 4 (a and b).

The geometrical parameters of weld beads [17] (A: 0.5–0.85 mm – thickness of the pad weld; B: 0.05–0.2 mm – depth of penetration of the basics C: 1,2–1.4 mm – width of the deposition zone) depend on the speed of movement of the optical head, the consumption of the powder material, the laser power.

RESEARCH RESULTS

The studies of the chemical composition of the pad welds and base penetration zone have shown that the chemical composition corresponds to the chemical composition of the surfaced charging material. The measurements have been carried out on the surface of the pad weld to a base in five points. Table 2 shows the elemental composition of the coating with 7% of powder 44712.

The microhardness of the pad weld has varied within wide limits. Thus, when surfacing powder PR-10P6M5 without additives it ranged 6000 to 9600 MPa. With the introduction of tungsten carbide, the microhardness in the pad welds has varied in the range of 9900 to 14000 MPa. Figure 5 is a graph

Таблица 3. Результаты испытаний тонких покрытий на абразивный износ по схеме Бринелля–Хаворта

Table 3. Results of the tests of thin coatings on abrasion according to Brinell-Haworth scheme

№ опыта Test No.	Состав покрытия, % от объема порошка ПР-10Р6М5 Composition of coating in % of the volume of PR-10P6M5 powder	содержание порошка 44712-10, % Powder content 44712-10, %	Потеря массы до шлифования, $\text{Кг} \cdot 10^{-4}$ Weight loss prior to grinding, $\text{kg} \cdot 10^{-4}$	Потеря массы после шлифования, $\text{Кг} \cdot 10^{-4}$ Weight loss after grinding, $\text{kg} \cdot 10^{-4}$	Коэффициенты износостойкости K_1/K_2 Wear resistance factors K_1/K_2
1	100	0	0,398	0,240	1,83/3,04
2	97	3	0,332	0,0230	2,2/3,17
3	95	5	0,278	0.0181	2,6/4,03
4	93	7	0,261	0.0145	2,79/5,03
5	90	10	0.029	0.026	25,1/28
6	85	15	0,041	0,028	17,8/25,2
7	80	20	0,058	0.042	12,5/17,3
8	75	25	0,052	0,046	14/15,8
9	70	30	0,138	0,122	5,2/6
10	65	35	0,094	0,086	7,7/8,4
11	60	40	0.161	0,134	4,5/5,4
11	50	50	0,110	0,076	6,63/9,6
12	40	60	0,156	0,118	4,6/6,2
13	30	70	0,093	0.066	7,84/11
14	0	0	0,730	–	1

от объема шихты его износостойкость оказывается ниже, чем износостойкость покрытия наплавленного порошком на никелевой основе. Это связано с наличием зон отпуска в местах перекрытия наплавленных валиков.

obtained by measuring the microhardness of the surfacing zone and the substrate from the surface to the substrate with an increment of 100 microns.

To determine the effect of laser surfacing on abrasive wear resistance, the tests of the samples

ВЫВОДЫ

Разработана технология лазерной наплавки порошковых материалов на основе никеля с шириной наплавленного слоя 20–30 мм и высотой 3–4,2 мм за один проход.

Проведенные испытания на абразивное изнашивание по схеме Бринелля–Хаворта показали повышение износостойкости наплавленных покрытий на основе никеля в 10 раз по сравнению с нормализованной сталью 40Х.

Отработаны режимы высококачественной наплавки порошка ПР10-Р6М5 с добавками карбида вольфрама до 7%. Наплавка этого порошка с большим содержанием карбидов вольфрама требует дальнейшего уточнения режимов обработки.

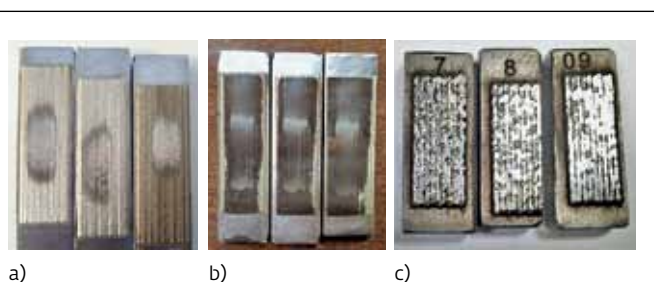


Рис. 6. Образцы после испытаний на абразивный износ: а – 3–7% карбида вольфрама, б – те же образцы после шлифования, в – образцы с 10–70% карбида вольфрама после шлифования

Fig. 6. Samples after abrasion test: a – 3–7% of tungsten carbide, b – the same samples after grinding, c – samples with 10–70% of tungsten carbide after grinding

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кожуро Л.М., Фельдштейн Е.В.** Износостойкость и усталостная прочность покрытий, полученных электромагнитной наплавкой. – Проблемы машиностроения и надежности машин, 1999, № 2, с.53–59.
2. **Погодаев Л.И., Ежов Ю.Е.** Повышение долговечности рабочих устройств судов технического флота износостойкими наплавками. – Проблемы машиностроения и надежности машин, 2014, № 6, с.82–87.
3. **Бирюков В.П., Дозоров А.В.** Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала. – Проблемы машиностроения и надежности машин, 2006, № 1, с. 60–66.
4. **Бирюков В.П., Лаптева В.Г., Хренникова И.А. и др.** Восстановление лазерной наплавкой работоспособности пары трения вал-вкладыш подшипника скольжения. – Проблемы машиностроения и надежности машин, 2013, № 5, с.91–95.
5. **Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И.** Технологические процессы лазерной обработки. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.

have been performed in the MEI of RAS using friction machine BH-4, with the above test conditions. Table 3 shows the test results for abrasion.

Figure 6 a-c represents the tested samples surfaced with different tracks overlap ratio. In the process of working out of modes, it has been established that with a minimum content of tungsten carbide of 3-7% (samples 2-4), the laser cladding with tracks overlapping of 60% is possible (Figure 6). Thus, the grinding allowance shall be not more than 0.2 mm (Fig. 6b). With increase of tungsten carbide in the content from 10 to 70%, there are cracks on the surface when overlapping the tracks. Therefore, samples 5-13 have been surfaced with tracks overlapping of 40% (Fig. 6c). This led to a significant deterioration of the topography of the surface layer and during grinding to a depth of 0.3 mm untreated plots of the surfaced tracks can be seen (Fig. 6c). The test results for the abrasion show the increase of composite coating wear resistance up to 28 times compared to the base material, steel 3, and by 9 times as compared to pad weld obtained with powder PR-10P6M5 after grinding.

Maximum wear resistance is obtained for 10% content of powder 44712 from the charge material

6. Tobar M.J., Alvarez C., Amado J.M. et al. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi-WC coatings on stainless steel. – Surface and Coatings Technology, 2006, v. 200, p. 6313–6317.
7. Kim H.-Y., Hwang S.-Y., Lee C.-H. et al. Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based coatings. – Surface and Coatings Technology, 2003, v. 172, p. 262–269.
8. Wu P., Zhou C.Z., Tang X.N. Microstructural characterization and wear behavior of laser clad nickel-based and tungsten carbide composite coatings. – Surface and Coatings Technology, 2003, v. 166 (1), p. 84–88.
9. Zhou S., Dai X. Laser induction hybrid rapid cladding of WC particles reinforced NiCrBSi composite coatings. – Applied Surface Science, 2010, v. 256, p. 4708–4714.
10. St-Georges L. Development and characterization of composite Ni-Cr +WC laser cladding: Short communication. – Wear, 2007, v. 263, p. 562–566.
11. Izdinska Z., Nasher A., Izdinsky K. The Structure and Properties of composite Laser clad coatings with Ni based matrix with WC particles. – Materials engineering, 2010, v.17, № 2, p.1–5.
12. Кульков С.Н., Гньюсов С.Ф. Карбидостали на основе карбидов титана и вольфрама. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006.
13. Медовар Б.И., Медовар Д.Б. Прокатные валки 2000 года (по материалам конференции). – Новости черной металлургии за рубежом, 1996, № 3, с. 80–82.
14. Смышляева Т.И. Оценка работы разрушения трипстали при абразивном изнашивании. – Трение и износ, 2001, т. 22. № 3, с.295–298.
15. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука. 1970.
16. Бирюков В.П., Татаркин Д.Ю., Христович Е.В. и др. Повышение износостойкости покрытий при лазерной наплавке порошковых материалов. – МНГК "Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта – 2016". – СПб.: Изд-во Политехн. ун.-та Петра Великого, 2016.
17. Бирюков В.П., Петровский В.Н., Быковский Д.П. и др. Повышение абразивной стойкости покрытий при лазерной наплавке порошка быстрорежущей стали с добавками карбида вольфрама. – МНТК "Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта – 2016". – СПб.: Изд-во Политехн. ун.-та Петра Великого, 2016.

volume. With further increase of the carbide phase, its larger amount is presumably decomposes at higher temperatures of the molten zone associated with increased carbide phase, to tungsten and carbon, that do not have sufficient resistance in abrasive wear. It should be noted that samples 5–13 have been in a continuous contact area with a rubber disc, and a portion of the abrasive particles has not provided a cutting or scratching action on the sample surface. This could explain why such a high increase in the wear resistance with friction machine BH-4. To clarify the influence, depending on the percentage of tungsten carbide on abrasive wear resistance we need to further test the laser cladding technology to produce high-quality surface after grinding.

As a result of the studies performed, the laser cladding modes for different groups of machine parts and assemblies have been developed and specific defects in the surface layers formed as a result of wear have been identified. It should be noted that the thick coatings are in high demand for parts of mining and processing industry: armor plates, jaws, crushers, etc. Thin coatings are used in the repair of damaged local friction surfaces of the beads of beading mills, stamps and other parts. Both technologies complement each other and have many practical applications. The abrasive wear resistance of coatings is affected by the composition of the powder material and processing technology. Thus, when surfacing powder composite coating with a share content of tungsten carbide of up to 7% of the charging material volume, its wear resistance is lower than the wear resistance of the coating surfaced by nickel-based powder. This is due to the presence of tempering zones in the areas of weld beads overlapping.

CONCLUSIONS:

The technology of laser cladding of nickel-based powder material with a pad weld width of 20–30 mm and a height of 3–4.2 mm in one pass has been developed.

The tests on the abrasion according to Brinell-Haworth scheme has shown an increase of wear resistance of surfaced nickel-based coatings 10-fold compared to the normalized steel 40X.

The modes of high-quality cladding of PR-10P6M5 powder with tungsten carbide additives up to 7% have been elaborated. Surfacing of this powder with a high content of tungsten carbide requires further clarification of processing modes.

