



ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

В. Бирюков, к.т.н.,
ФГБУН Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН)

Методы лазерной модификации поверхности постоянно развиваются и прогрессируют параллельно с развитием новых видов лазерных источников. На технологическом комплексе, оснащённом волоконным лазером, изготовленном в ООО НТО "ИРЭ-Полус", отработан технологический процесс лазерной наплавки. Определены порошковые материалы на основе никеля и режимы наплавки, позволяющие повысить усталостную прочность образцов.

Высоконагруженные детали и узлы механизмов приобретают дополнительные функциональные возможности при модификации поверхностных слоев их рабочих поверхностей концентрированными потоками энергии. Такие слои обладают существенными преимуществами по сравнению со слоями, полученными традиционными методами поверхностного упрочнения, напыления и наплавки [1-4]. Методы лазерной модификации поверхности постоянно развиваются и прогрессируют параллельно с развитием новых видов лазерных источников.

В современном машиностроительном производстве повышение ресурса работы деталей и узлов трения выпускаемой и введенной ранее в эксплуатацию техники стало важнейшей задачей. Такие детали, как валы электрических машин, роторы газоперекачивающих станций, коленчатые валы выходят из эксплуатации по причине износа посадочных поверхностей. В настоящее время парк эксплуатируемого оборудования и машин имеет износ подобных узлов трения в пределах 60-80%. Технологии восстановления рабочих поверхностей позволяют продлить работоспособность машин. К таким технологиям относится восстановление рабочих размеров деталей лазерной порошковой наплавкой. Для подтверждения эффективности применения таких технологий в процессах восстановления деталей приведем такой пример. Цена

INCREASE THE SERVICE LIFE OF MACHINE PARTS WITH LASER CLADDING

V. Biryukov, Cand. of Technical Sciences, Federal budget-Funded Research Institute for Machine Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN)

Laser surface modification techniques are constantly evolving and progressing in parallel with the development of new types of laser sources. At the processing facility, equipped with a fiber laser, manufactured by LLC NTO "IRE-Polus", perfected laser cladding process. Defined powder materials based on nickel and welding modes, allowing to increase fatigue resistance.

The development of advanced methods of modifying the surfaces of highly loaded parts of working units and mechanisms using concentrated energy sources due to the possibility of formation of surface layers, which have significant advantages as compared to layers produced by conventional methods of surface hardening, spraying and surfacing [1-4].

In modern engineering production the most important task is to increase the service life of parts and assemblies manufactured friction and introduced earlier in the operation of vehicles. Details such as electrical machinery shafts, rotors for gas pumping stations, crankshafts out of service due to wear of the seating surfaces. Currently, the park operated equipment and machinery has wear similar friction units within 60 - 80 %. Recovery technology work surfaces can extend performance machines. These technologies include the restoration of working part dimensions laser powder cladding. Replacing one rotor gas-pumping station averages 15 million rubles, and the cost of restoring cervical rotor laser cladding is within 100 - 200 thousand rubles, depending on the size of the rotor, which indicates the high efficiency of the process of recovery.

Laser cladding is applied in the case where the heat affected zone should be minimized. Using laser cladding, depending on the operational requirements may be applied to the surface coating composed wear, corrosion, and other components that can satisfy the increasing demands for high wear resistance and toughness in a broad range of operating conditions, including dynamic loading.

замены одного ротора газоперекачивающей станции составляет в среднем 15 млн. руб., а стоимость восстановления шейки ротора лазерной наплавкой находится в пределах 100–200 тыс. руб. в зависимости от типоразмера ротора.

Лазерная наплавка применяется в случае, когда зона термического влияния должна быть локальной и минимальной. С помощью наплавки лазером в зависимости от эксплуатационных требований можно наносить на поверхность покрытия, в состав которых входят износостойкие, коррозионно-стойкие и другие компоненты. Это позволяет удовлетворять всё возрастающие требования современного потребителя изделий машиностроения. При эксплуатации изделий в сложных условиях, в том числе и при работе в динамическом нагружении, остро встает вопрос придания им высокой износостойкости и прочности.

В процессе лазерной наплавки с коаксиальной подачей порошка транспортирующий газ формирует струю наплавляемого присадочного материала, который переплавляется под воздействием мощного лазерного излучения. На поверхности подложки возникает ванна расплава, которая после затвердевания формирует единичный наплавленный валик [3–6]. Плотное покрытие большой площади получают путем наложения единичных валиков с перекрытием 30–50% от диаметра лазерного луча.

Целью работы было определение влияния состава порошкового материала и режима лазерной наплавки на прочность сцепления покрытия с материалом основы, повышение износостойкости и сопротивления усталости образцов.

Выполнение экспериментов с порошком на основе никеля проводили на технологическом комплексе HUFFMAN HC-205, оснащённом волоконным лазером ЛС-3,5 мощностью 3500 Вт,

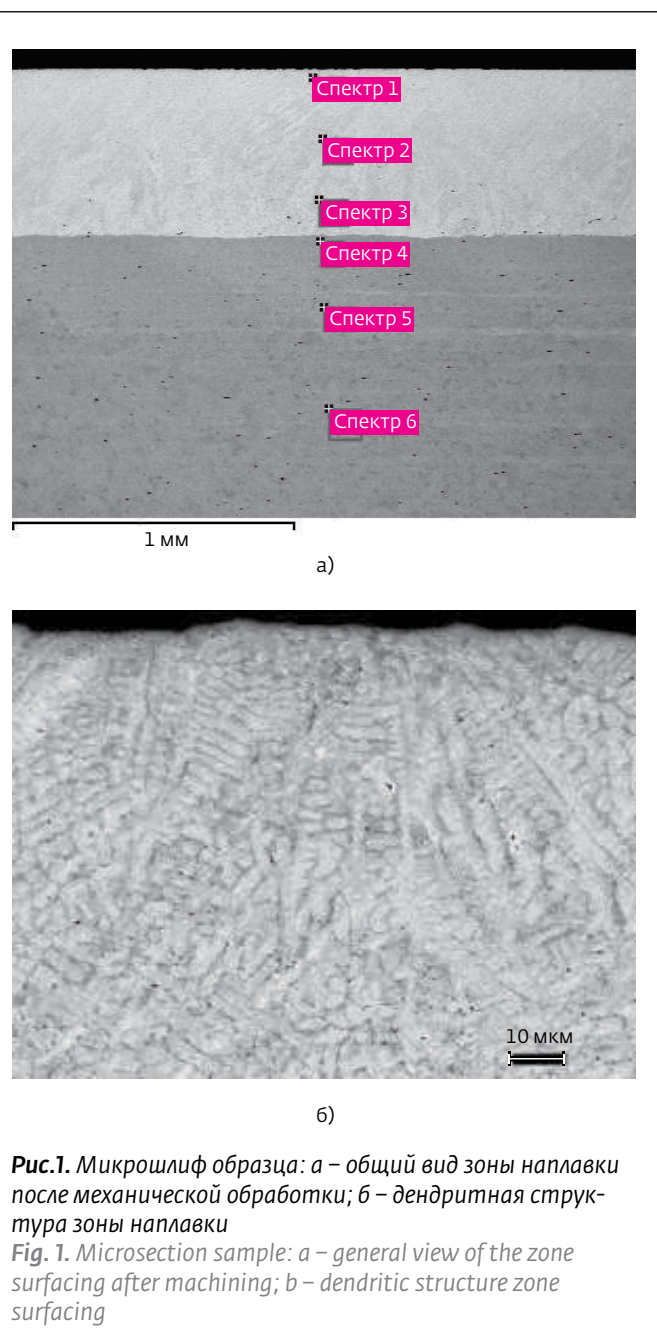


Рис.1. Микрошлиф образца: а – общий вид зоны наплавки после механической обработки; б – дендритная структура зоны наплавки

Fig. 1. Microsection sample: a – general view of the zone surfacing after machining; b – dendritic structure zone surfacing



изготовленном в ООО НТО "ИРЭ-Полюс" [3-6]. Для отработки технологического процесса лазерной наплавки использовали массовый поток порошка - 1,5-6 г/мин; давление аргона - 2 атм, поток аргона - 3 л/мин; порошок с размером частиц 40-160 мкм. Мощность излучения при наплавке на образцы сталей 35 и 38ХНЗМА составляла 500-1000 Вт, скорость перемещения 525 мм/с. Микроструктура наплавленных покрытий была исследована с помощью оптического металлографического микроскопа Neophot-30 с увеличением до 500 крат фирмы Carl Zeiss JENA. Исследованная микроструктура представлена на рис.1.

Микротвердость образцов измерялась по методу Виккерса и составляла для наплавленных слоев 4250-5200 МПа. Испытания образцов на прочность сцепления покрытия с основой проводились в соответствии с РМ250-87 "Определение прочности сцепления газотермического покрытия с основным металлом. Методические рекомендации" и методическими рекомендациями ООО НТО "ИРЭ-Полюс".

Суть методики состоит в том, что цилиндрический образец из исследуемого материала с наплавленным на него в виде кольцевого пояса слоем продавливается через матрицу. При этом под действием касательных напряжений происходит срезание наплавленного слоя, а напряжение сдвига характеризует прочность сцепления наплавленного слоя с основой.

Образец в виде цилиндра диаметром 24 мм и длиной 25 мм был изготовлен из исследуемого основного металла. Толщина наплавленного слоя составляла 0,8-1,3 мм. Ширина

In the process of laser cladding with coaxial powder feeding a carrier gas stream forms a weld filler metal, which is melted under the influence of powerful laser radiation. On the surface of a molten pool of the substrate occurs, which after hardening forms a single weld bead [3-6]. Dense cover a large area is obtained by imposing single rollers with overlapping 30 - 50 % of the diameter of the laser beam.

The objectives of the work was to determine the influence of the composition of the powder material and mode of laser cladding on the strength of adhesion of the coating to the base material, increased wear and fatigue resistance of the samples.

Performing experiments on the basis of nickel powder produced at the processing facility HUFFMAN HC- 205 equipped with a fiber laser LS- 3, 5 power 3500 W manufactured by LLC NTO " IRE- Polus" [3,6] . For testing laser cladding process used powder mass flow - 1.5-6 g / min; argon pressure - 2 bar . stream of argon - 3 l / min; powder having a particle size of 40 - 160 μm . Surfacing on steel samples 35 and 38HN3MA produced when radiation power 500 - 1000 W, the velocity of the 5 - 25 mm/s. The microstructure of deposited coatings was investigated using an optical microscope metallographic Neophot - 30 , manufactured by Carl Zeiss JENA increasing to 500 -fold. The microstructure shown in Fig.1.

Microhardness of the samples was measured by Vickers and was deposited layers for 4250 - 5200 MPa.

Test samples for adhesion strength of coating to the substrate were carried out in accordance with the RM250 -87 "Determination of adhesive strength of thermal coating to the base metal. Guidelines "and the methodological recommendations LLC NTO" IRE - Polus."

The technique consists in that a cylindrical specimen of the test material, weld it in the form of

Результаты трибологических испытаний

Results of tribological tests

№	Пара трения Friction pair	Интенсивность изнашивания Wear-out rate		Коэффициент трения f
		$I_1 \times 10^{-9}$	$I_2 \times 10^{-9}$	
1	Баббит Б-83 – сталь 38ХНЗМА Babbitt Б-83 – steel 38ХНЗМА	4,75	0,166	0,02
2	Баббит Б-83 – покрытие П.1. Babbitt Б-83 – cover П.1.	0,178	0,050	0,01
3	Баббит Б-83 – покрытие П.2. Babbitt Б-83 – cover П.2.	1,757	0,076	0,02
4	Баббит Б-83 – покрытие П.3 Babbitt Б-83 – cover П.3	4,59	0,084	0,02
5	Баббит Б-83 – покрытие П.4 Babbitt Б-83 – cover П.4	0,280	0,049	0,01

наплавленного пояска 10–0,5 мм, а после проточки симметрично относительно торцов образца составляла 4–0,05 мм. В результате проведенных испытаний получены значения прочности сцепления покрытий в пределах 295–524 МПа в зависимости от режима обработки и состава порошкового материала. Для сравнения прочность сцепления покрытий при высокоскоростном напылении не превышает 80 МПа. Кроме того, определены касательные напряжения среза основного материала, которые составили 330 МПа.

Испытаниям на износостойкость были подвергнуты образцы, структура которых сочетала разные материалы. Износостойкие покрытия на основе Ni наносили на образцы-ролики из среднеуглеродистой легированной стали 38ХНЗМА (ГОСТ 4543-71) в нормализованном состоянии, имеющей следующий состав: 0,33–0,4% С, 1,2–1,5% Cr, 3–3,5% Ni, 0,35–0,45 % Мо. Исследовано четыре вида лазерного покрытия, условно обозначенные как П.1.; П.2; П.3 и П.4. Испытывали также образцы-ролики без покрытия. Образцы-колодки изготавливали из углеродистой качественной стали 35 в нормализованном состоянии (ГОСТ 1050-88). На рабочие поверхности образцов-колодок наносили баббитовое покрытие. Материал покрытия образцов-колодок – баббит Б83 на оловянной основе (ГОСТ 1320-74), имеющий состав: 83% Sn, 11% Sb, 6% Cu. Испытывали по три пары каждого сочетания материалов. Предварительно образцы подвергали приработке в течение 30 мин при подаче в зону трения смазочного масла ТП-22С при нагрузке 125 Н. Приработкой достигали равномерного распределения следов износа по трущимся поверхностям обеих образцов пары. Далее испытания проводили в течение 2 ч при давлении 2,5 МПа в условиях непрерывной

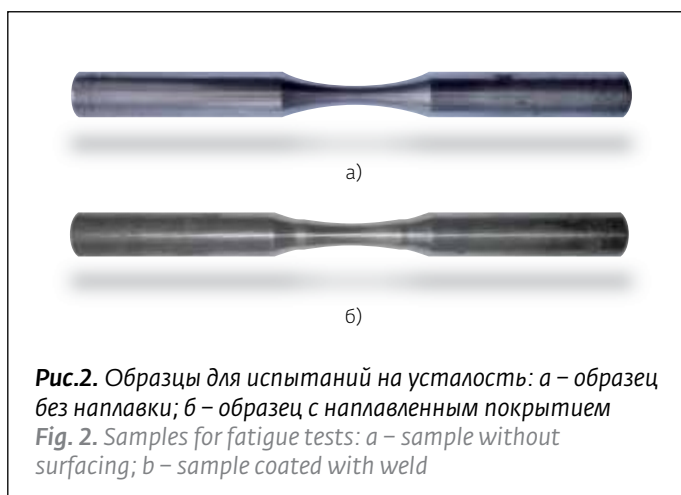


Рис.2. Образцы для испытаний на усталость: а – образец без наплавки; б – образец с наплавленным покрытием
Fig. 2. Samples for fatigue tests: a – sample without surfacing; b – sample coated with weld

an annular girdle layer is extruded through the die. While under the influence of shear stresses occur slice of the deposited layer and the shear stress characterizes the adhesion strength of the deposited layer to the substrate.

Sample was made of the test of the base metal in the form of a cylinder of diameter 24 mm and length 25 mm. The thickness of the deposited layer was 0.8 – 1.3 mm. The width of the weld girdle 10 – 0.5 mm, and symmetrically relative to the bore after the end of the sample 4–0,05 mm. As a result of the tests, the values of adhesion strength of coatings within 295 – 524 МПа, depending on the mode of treatment and composition of the particulate material. For comparison, adhesion strength of the deposition of coatings at high speed does not exceed 80 МПа. Furthermore, the slice identified by the shear stresses of the base material, which amounted to 330 МПа.

Abrasion tests were the following combinations of materials. Wear-resistant coating based on samples of Ni – coated rollers from medium alloyed steel 38ХНЗМА (ГОСТ 4543-71) in a normalized state, having the following composition: 0.33 – 0.4 % С, 1,2 – 1,5% Cr, 3 – 3,5%

подачи в зону трения смазочного материала. Результаты испытаний на износ представлены в таблице. Проведенные испытания на машине трения МИ-1 наплавленных покрытий в паре трения с баббитом Б83 показали повышение износостойкости в 2-4 раза по сравнению со сталями 35 и 38ХНЗМА [6, 7].

Для оценки влияния материала наплавленного слоя на задиростойкость использовали машину трения МТУ-01, испытания проводили по схеме торцевого трения. Предварительно образцы были подвергнуты приработке в течение 30 мин при подаче в зону трения рабочего масла и нагрузке 150 Н при частоте вращения шпинделя 200 оборотов в минуту. Приработкой достигается равномерное распределение следов износа по трущимся поверхностям обоих образцов пары. Далее испытания проводили при ступенчатом изменении частоты вращения в пределах 200–900 мин⁻¹ с шагом 100 мин⁻¹ в условиях непрерывной подачи в зону трения масла. Во время испытания производили непрерывную запись момента трения в контакте. Задир в паре трения фиксировали по скачкообразному увеличению момента трения. Результаты проведенных испытаний на машине трения МТУ-01 на трех исследуемых образцах для каждого вида покрытия показали, что задир на образцах без покрытий происходит при частоте вращения 500 мин⁻¹, а на наплавленных образцах порошком на основе никеля при частотах вращения 600–900 мин⁻¹.

Для определения оптимальной технологии упрочнения поверхности с целью повышения эксплуатационных свойств покрытий по критерию усталости были проведены сравнительные испытания на усталость. Испытания проводили при изгибе с вращением при симметричном цикле нагружения. База испытаний была принята равной 2·10⁶ циклов. Регистрация числа циклов N осуществлялась с помощью счетчика и одновременной фиксацией времени испытаний. При разрушении образца происходила автоматическая остановка машины.

Исследовались образцы гладкие диаметром 7,5 мм, изготовленные из стали 35 и 38ХНЗМА. Вид образцов для испытаний на усталость представлен на рис.2. Параметры кривых усталости определяли с использованием регрессионного анализа. Уравнение кривой усталости записывали в виде:

$$\sigma_{\text{дл}}^m N = \sigma_{-1}^m N_C = C$$

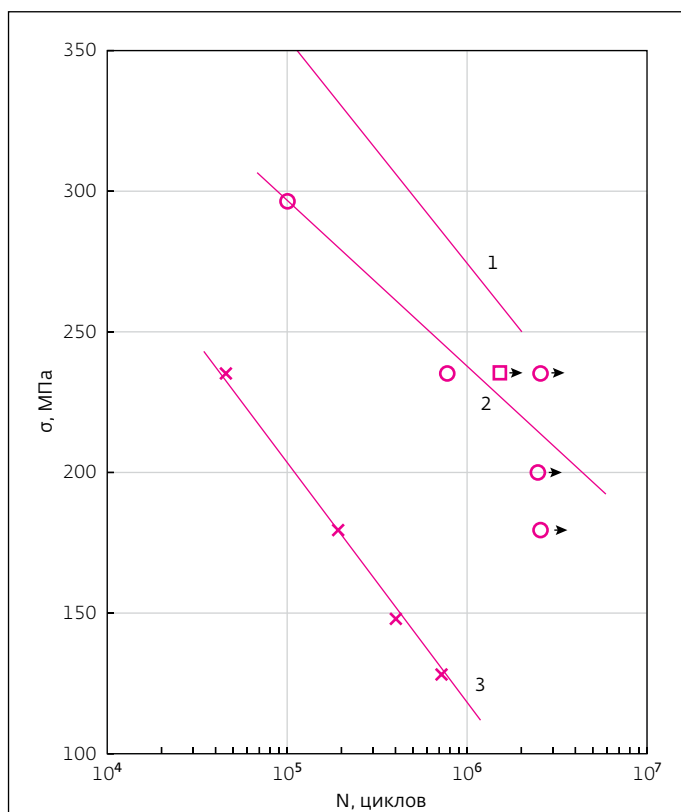


Рис.3. Кривые усталости образцов из стали 35 до и после лазерной наплавки порошка П2: 1 – сталь 35 без наплавки, 2 – наплавленный образец без обработки, 3 – наплавленный полированный образец

Fig. 3. Fatigue curves of specimens of steel 35 before and after laser cladding powder C 2: 1 – 35 steel without surfacing, 2 – weld sample without treatment, 3 – weld polished sample

Ni, 0,35 – 0,45 % Mo. Investigated four types of laser resurfacing: C.1.; C.2; C.3; and C.4. Also tested samples clips uncoated. Samples – pads made from quality carbon steel 35 in the normalized condition (ГОСТ 1050-88). On work surfaces specimens pad applied babbitt coating. Coating material samples – Pad – Babbit B83 from tin (ГОСТ 1320-74), having a composition of 83 % Sn, 11 % Sb, 6 % Cu. Tested three pairs of each combination of materials. Samples were pre- run-in for 30 minutes by supplying to a zone of friction of the lubricating oil TP – 22C under a load of 125 N. burnishing achieved even distribution of wear on the friction surfaces of both pairs of samples. Further tests were carried out for 2 hours at a pressure of 2.5 MPa in terms of continuous supply of lubricant the friction zone. Results of wear testing are presented in Table.

The tests carried out on the friction machine MI – 1 deposited coating against friction with babbitt B83 showed an improvement in wear resistance 2 – 4 times compared with steels and 38ХНЗМА 35 [6, 7]. To assess the effect of the deposited layer on the material to scoring

Определение параметров кривых усталости и их построение проводили с учетом образцов, не разрушившихся до принятой базы испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов. Результаты усталостных испытаний образцов из стали 35 наплавленных порошком П2 представлены на рис.3 [8]. Точки со стрелками показывают, что образцы не сломались до принятой базы испытаний.

Для данного материала и технологии наплавки проведенные усталостные испытания показывают снижение характеристик сопротивления усталости после лазерной наплавки (линии 2 и 3) по сравнению с исходной кривой усталости (1).

Механическая обработка и полирование наплавленного слоя существенно повышают усталостные характеристики наплавленных образцов, что было отмечено и ранее в работе [9]. Для повышения сопротивления усталости образцов проводилась оптимизация технологии лазерной наплавки порошковых материалов. Влияние технологии наплавки исследовалось на образцах из стали 38ХНЗМА с четырьмя порошками на основе никеля, различающихся по своим параметрам (мощность излучения, ширина единичной дорожки наплавки, скорость перемещения луча). Ширина наплавленной зоны на образце была в пределах 30–35 мм. Основным критерием оптимизации являлось отсутствие трещин в наплавленных слоях. После наплавки образцы подвергали механической обработке и полированию. Полученные кривые усталости представлены на рис.4.

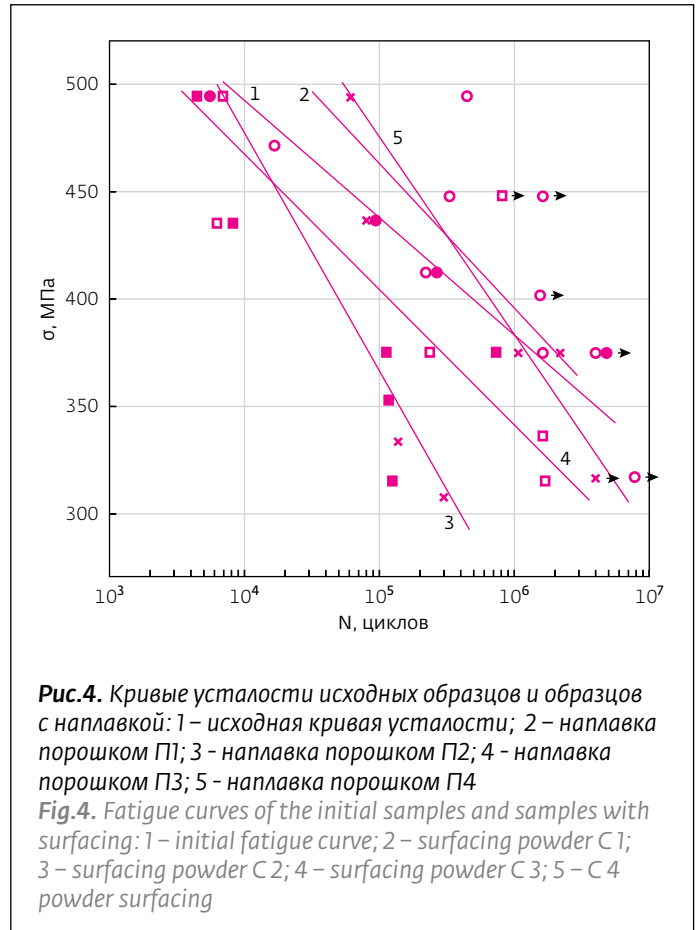


Рис.4. Кривые усталости исходных образцов и образцов с наплавкой: 1 – исходная кривая усталости; 2 – наплавка порошком П1; 3 – наплавка порошком П2; 4 – наплавка порошком П3; 5 – наплавка порошком П4

Fig.4. Fatigue curves of the initial samples and samples with surfacing: 1 – initial fatigue curve; 2 – surfacing powder C 1; 3 – surfacing powder C 2; 4 – surfacing powder C 3; 5 – C 4 powder surfacing

tests were carried out on the machine friction MTU- 01 scheme of mechanical friction. Samples were pre- run-in for 30 minutes at a feed zone of the working oil and the friction load of 150 N at a spindle rotation speed of 200



Анализ кривых усталости показывает, что по режимам 2 и 5 (см. рис.4) получено повышение сопротивления усталости, особенно при больших нагрузках. Вместе с тем в работе [10] установлено, что с увеличением размера образцов из стали 45 негативное воздействие лазерной наплавки на характеристики сопротивления усталости уменьшается. Исследовались образцы диаметром от 7,5 до 17,5 мм как в исходном состоянии, так и после наплавки. Поэтому применение лазерной наплавки на детали, имеющие значительную массу и размеры, такие как роторы электрических машин, газоперекачивающих станций, кулачковые и коленчатые валы, резко повышает их усталостную прочность.

Проведенные исследования позволяют заключить, что разработанная технология лазерной наплавки повышает износостойкость пары трения в 2,4 раза. Поэтому она может быть использована в задачах восстановления посадочных поверхностей роторов газоперекачивающих агрегатов, валов электрических машин, шеек коленчатых валов и других подобных деталей.

Подбор оптимальной технологии наплавки позволяет повысить характеристики сопротивления усталости. Применение после лазерной наплавки последующей механической обработки повышает характеристики сопротивления усталости наплавленных образцов. Определены порошковые материалы на основе никеля и режимы наплавки, позволяющие повысить усталостную прочность образцов. Прочность сцепления наплавленного покрытия выше прочности основного материала на сдвиг, из которого изготовлены детали машин, при оптимальных режимах наплавки.

Работа выполнена при финансовой поддержке ООО НТО "ИРЭ-Полус".

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н., Шибяев В.В. Влияние режимов порошковой наплавки на условия формирования и размеры наплавленных валков. – Сварочное производство, 1983, №6, с.11–13.
2. Тескер Е.И., Гурьев В.А., Тескер С.Е. Микроструктура и свойства наплавленных лазером поверхностных слоев. – Физика и химия обработки материалов, 2004, №1, с. 38–42.
3. Бирюков В.П. Модификация поверхности с помощью лазерного излучения. – Фотоника,

min-1. Burnishing equal distribution of wear on the friction surfaces of both samples couples. Further tests were carried out to a step change in the speed range of 200 – 900 min-1 in 100 min-1 under continuous supply of oil to the friction zone. During the test, a continuous record of the friction torque in contact. Bullies in the friction pair fixed by an abrupt increase in the frictional torque. As a result of the friction test machine MTU 01 at three samples is set for each type of coating that seizure uncoated samples occurs at a rotational speed of 500 min-1, and the samples deposited on the nickel-based powder with speeds of 600 – 900 min-1.

To determine the optimal surface hardening techniques to improve the performance properties of coatings by fatigue, comparative tests were conducted on the fatigue. Tests were carried out at a bend with rotation in a symmetric loading cycle. Base test was taken as 2.106 cycles. Registration number of cycles carried out with a counter and concomitant fixation test time. With the destruction of the sample occurs automatically stop the machine.

Investigated samples smooth 7.5 mm diameter, made of steel 35 and 38HN3MA. Type specimens for fatigue tests is shown in Fig.2. Parameters fatigue curves were determined using regression analysis. Fatigue curve equation is written as

$$\sigma_{ai}^m N = \sigma_{-1}^m N_G = C .$$

Determination of parameters of fatigue curves and their construction was carried out taking into account the sample without destroying the base to the highest test 2.106 cycles. The results of fatigue tests of specimens of steel 35 deposited powder П 2 shown in Fig.3. [8]. Points with arrows indicate that the samples did not break up the highest base tests. For a given material deposition techniques and conducted tests show a decrease in fatigue resistance fatigue performance after laser cladding (2 and 3) compared to the fatigue curve of the original (1).

Machining and polishing the deposited layer significantly improves the fatigue properties of deposited samples, as was noted earlier in [9]. To improve the fatigue resistance of the samples was carried out optimization technology of laser cladding powder materials. Influence of deposition technologies investigated on samples from four 38HN3MA steel powders based on nickel, characterized by its parameters (power of the radiation width of the track surfacing unit, movement speed of the beam), build-up zone on the width of the sample was within 30 – 35 mm. The main optimization criterion was the absence of cracks in the deposited layers. After



- 2010, №3, с.18-21.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
 5. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Третьяков Р.С. Анализ влияния параметров коаксиальной лазерной наплавки на формирование валиков. - Технология машиностроения, 2011, №11, с.19-21.
 6. Бирюков В.П. Повышение долговечности работы пар трения скольжения при лазерной наплавке порошковых материалов. - Тяжелое машиностроение, 2013, №9, с.14-17.
 7. 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.
 8. Бирюков В.П., Петрова И.М., Гадолина И.В. Влияние лазерной наплавки на характеристики сопротивления усталости. - Машиностроение и инженерное образование, 2013, №2, с.54-58.
 9. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии /Под ред. А.П. Гусенкова. - М: Наука, 1992.
 10. Архипов В.Е., Биргер Е.М., Поляков А.Н. Влияние лазерной наплавки на сопротивление усталости и износостойкость стали 45. - МиТОМ, 1988, №1, с. 55-58.

surfacing samples were machined and polished. The resulting fatigue curves shown in Fig. 4.

Analysis of fatigue curves shows that modes 2 and 5, indicated in Fig.4. Exhortation increase fatigue resistance, especially at high loads. At the same time in [10] found that with increasing sample size, made of 45 steel in the initial state and after laser surfacing with a diameter of 7.5 mm to a diameter of 17.5 mm negative impact on the performance of laser cladding fatigue resistance decreases. Therefore, the use of laser cladding on parts having considerable weight and dimensions, such as rotors of electrical machines, gas compressor stations, cam and crankshafts, dramatically increases their fatigue strength compared to samples used for fatigue tests.

Studies suggest that the developed technology of laser cladding increases the wear resistance of the friction pair in 2 - 4 times and can be used to restore the seating surfaces of the rotors of gas pumping units, electrical machinery shafts, crankshafts necks, etc. In addition, for the surfacing of new parts with to increase the reliability and longevity of their work.

Selection of optimal cladding technology can improve the fatigue resistance characteristics. Application after laser cladding subsequent machining characteristics enhances fatigue resistance weld samples. Defined powder materials based on nickel and surfacing modes allow to increase fatigue strength. Adhesion strength of the deposited coating strength of the base material above the shear from which manufactured the machines, under optimal cladding.

This work was financially supported by LLC NTO "IRE - Polus."