



## ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ И ЗАДИРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ ПОРОШКОМ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА С ДОБАВКАМИ НАНО-ПОРОШКА ОКСИДА МЕДИ

В. П. Бирюков, к. т. н., А. А. Фишков,  
Э. Г. Гудушаури, д. т. н.  
Институт машиноведения им. А. А. Благоврава  
РАН, Москва, Россия, laser-52@yandex.ru

Создание покрытий, придающих поверхностям металлических изделий новые антифрикционные свойства, находится в центре внимания многих исследований. В работе приведены результаты изучения влияния содержания наночастиц оксида меди в составе шихты на основе железа на интенсивность изнашивания и задиристость покрытий, полученных лазерной наплавкой.

Сплавы на основе железа, легированные медью, можно отнести к антифрикционным материалам [1-5]. Отмечено уменьшение коэффициента трения для низкоуглеродистой стали [1] и чугуна [2] при введении в их состав меди. На снижение коэффициента трения оказывает влияние концентрация медь-содержащих частиц размером от нескольких нанометров до десятков микрометров. Такие частицы могут быть сформированы как при длительных изотермических отжигах закаленной стали [6-9], так и в процессе кристаллизации литых железоуглеродистых сплавов [1-4].

Легирование медью приводит к изменениям структуры и механических свойств заэвтектоидной стали [10]. Введение в сталь 3 мас.% Cu сопровождается ростом микротвердости перлита с 380 до 430 HV. При этом твердость по Бринеллю увеличивается с 340 до 390 HB. Для сплавов, содержащих медь, характерным является увеличение дисперсности ферритоцементитной смеси. Дополнительным фактором, способствующим росту твердости перлита, является

## OBTAINING WEAR-RESISTANT AND SCORE-RESISTANT COATINGS WITH IRON-BASED POWDER LASER CLADDING WITH COPPER OXIDE NANO-POWDER ADDING

V. P. Biryukov, Cand. of Techn. Sc., A. A. Fishkov,  
E. G. Gudushauri, Doc. of Tech. Sc.,  
A. A. Blagonravov Institute of Engineering Science of  
RAS, Moscow, Russia, laser-52@yandex.ru

The creation of coatings that impart new anti-friction properties to the surfaces of metal products is the focus of many studies. This paper presents the results of studying the effect of copper oxide nano-particles in the iron-based charge on the intensity of wear and score resistance of coatings obtained with laser cladding.

Iron-based alloys doped with copper can be attributed to anti-friction materials [1-5]. A decrease in the coefficient of friction for low-carbon steel [1] and cast iron [2] was noted when copper is added. The decrease in the friction coefficient depend on the concentration of copper-containing particles ranging in size from several nanometers to tens of micrometers. Such particles can be formed, both during prolonged isothermal annealing of hardened steel [6-9] and during crystallization of cast iron-carbon alloys [1-4].

Doping with copper leads to changes in the structure and mechanical properties of the hypereutectoid steel [10]. Adding of 3 wt.% Cu to steel is accompanied by an increase in the microhardness of perlite from 380 to 430 HV. Moreover, the Brinell hardness increases from 340 to 390 HB. For copper containing alloys, the dispersion of the ferritic cement mixture is inherent. An additional factor contributing to the growth of the perlite hardness is the isolation in the ferrite gaps of nano-dimensional particles of the  $\epsilon$ -phase. In sliding friction with lubrication, the wear resistance of hypereutectoid steel containing 8.97% copper is by ~23% higher than that of antifriction cast iron АЧ-1. During laser cladding alloying elements are introduced into a

выделение в ферритных промежутках наноразмерных частиц  $\epsilon$ -фазы. В условиях трения скольжения со смазкой износостойкость заэвтектоидной стали, содержащей 8,97% меди, на ~23% выше износостойкости антифрикционного чугуна АЧС-1. При лазерной наплавке легирующие элементы вводят в тонкий слой покрытия, не затрагивая всего объема изделия. При этом количество легирующих элементов по массе может быть уменьшено в 100–1000 раз.

Целью настоящей работы является определение влияния содержания наночастиц оксида меди в составе шихты на основе железа на интенсивность изнашивания и задиростойкость покрытий, полученных лазерной наплавкой.

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАПЛАВКИ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В экспериментальных исследованиях использовали лазерный комплекс ИМАШ РАН [11]. Образцы изготавливали из стали 20Х размерами 15×20×80 мм. Для наплавки выбран порошок на основе железа ФБХ6-2. В присадочный порошковый материал добавляли nano порошок оксида меди 3–9% от массы [12–13].

В качестве варьируемых факторов при планировании экспериментов [14] были выбраны мощность излучения  $P=700\text{--}1000$  Вт, скорость обработки  $V=5\text{--}9$  мм/с и диаметр пучка  $d=2\text{--}3$  мм. Откликами эксперимента были высота наплавленного валика  $H$  (мм), ширина валика  $B$  (мм) и глубина зоны термического влияния (ЗТВ)  $Z$  (мм). В качестве дополнительного дискретного фактора рассматривалось сканирование луча с фиксированной частотой  $f=220$  Гц. Использовался сканатор резонансного типа с упругим элементом, на котором закреплено зеркало. Наплавка производилась при максимальных и минимальных значениях уровней факторов, которые обозначены соответственно  $z+$  и  $z-$ . Верхний и нижний уровни факторов выбирались по результатам предварительных экспериментов, при которых визуально отмечалось устойчивое формирование наплавленных слоев.

Металлографические исследования наплавленных покрытий проводились на микротвердометре PMT-3 при нагрузке 0,98 Н, металлографическом микроскопе Альтами MET 1С и цифровом микроскопе AM413ML.

Структура и химический состав наплавленных слоев исследовались на сканирующем

thin layer of coating, without affecting the entire volume of the product. In this case, the number of alloying elements by mass can be reduced by 100–1000 times.

The purpose of this paper is to determine the effect of the copper oxide nano-particles in the composition of the iron-based charge on the intensity of wear and the score resistance of coatings obtained by laser cladding.

### SURFACE TREATMENT EQUIPMENT AND RESEARCH METHODS

In the experimental studies, the laser complex by IES of RAS was used [11]. The samples were made of 20X steel with dimensions of 15×20×80 mm. Iron-based powder ФБХ6-2 was chosen for cladding. Copper oxide nano-powder of 3–9% by weight was added to the welding powder filler [12–13].

The variable factors in the planning of experiments [14] were as follows: radiation power  $P=700\text{--}1000$  W, processing speed  $V=5\text{--}9$  mm/s and beam diameter  $d=2\text{--}3$  mm. The response of the experiment was the height of the weld bead  $H$  (mm), the width of the bead  $B$  (mm), and the depth of the heat-affected zone (HAZ)  $Z$  (mm). As an additional discrete factor, the beam scanning with a fixed frequency  $f=220$  Hz was considered. A resonance-type scanner was used with an elastic element with the mirror attached. Cladding was performed at the maximum and minimum values of the factor levels, which are designated  $z+$  and  $z-$ , respectively. The upper and lower levels of the factors were chosen based on preliminary experiments, where the formation of clad layers was visually observed.

The metallographic studies of the clad coatings were carried out using microhardness tester PMT-3 at a load of 0.98 N, metallographic microscope Altami MET 1C and digital microscope AM413ML.

The structure and chemical composition of the clad layers were studied using TESCAN VEGA 3 SBH scanning electron microscope with an energy-dispersive analysis system employing the modes of reflected and secondary electrons.

To determine the score resistance of the hardened samples, a universal friction machine MTU-01 was used. The tests were carried out according to the "plane-ring" scheme. A comparative analysis was carried out between the samples with the ФБХ6-2 powder charge cladding and the samples clad with copper oxide nano-powder 3–9% additives into the charge. The ring was made of ШХ-15 steel

электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного анализа с применением режимов отраженных и вторичных электронов.

Для определения задиристости упрочненных образцов применялась универсальная машина трения МТУ-01. Испытания проводили по схеме "плоскость-кольцо". Сравнительный анализ проводили между образцами с наплавкой шихтой порошка ФБХ6-2 и образцами, наплавленными с добавками в шихту нанопорошка оксида меди 3-9%. Кольцо изготавливали из стали ШХ-15 с внутренним диаметром 24,5 мм и внешним диаметром 30,5 мм, с твердостью 60-62 HRC. В качестве смазочного материала использовали солидол Ж (смазку, изготовленную из смеси нефтяных промышленных масел средней вязкости). Скорость скольжения и давление на образец изменялись дискретно в интервале 0,1-1,1 м/с и 1-4 МПа соответственно. Время испытания составляло 2 часа. После испытаний образцы обезжиривались ацетоном согласно ГОСТ 2786-84 и подвергались сушке в печи при температуре 70 °С в течение 30 мин.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для учета дискретного фактора сканирования производились две серии экспериментов: со сканированием и без него. Уровни факторов, а также зависимости кодированных переменных от натуральных величин приведены в табл. 1. Согласно рекомендациям [14], в качестве математической модели принят алгебраический линейный полином вида

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k + b_{1,2} x_1 x_2 \dots + b_{k-1,k} x_{k-1} x_k,$$

with an internal diameter of 24.5 mm and an outer diameter of 30.5 mm, with a hardness of 60-62 HRC. Lubricant grease was used as the lubricant. The sliding speed and pressure on the sample varied discretely within 0.1-1.1 m/s and 1-4 MPa, respectively. The test time was 2 hours. After the tests, the samples were degreased with acetone in accordance with GOST 2786-84 and dried in an oven at 70 °C for 30 minutes.

## RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES

In order to take the discrete scanning factor into account, the experiments were performed in two series - with and without scanning. The levels of factors, as well as the dependence of the coded variables on the natural quantities, are given in Table. 1. According to the recommendations [14], an algebraic linear polynomial was taken as a mathematical model

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k + b_{1,2} x_1 x_2 \dots + b_{k-1,k} x_{k-1} x_k,$$

where  $b_i$  are linear regression coefficients;

$y$  is the system response;

$k$  is the number of factors in the experiment.

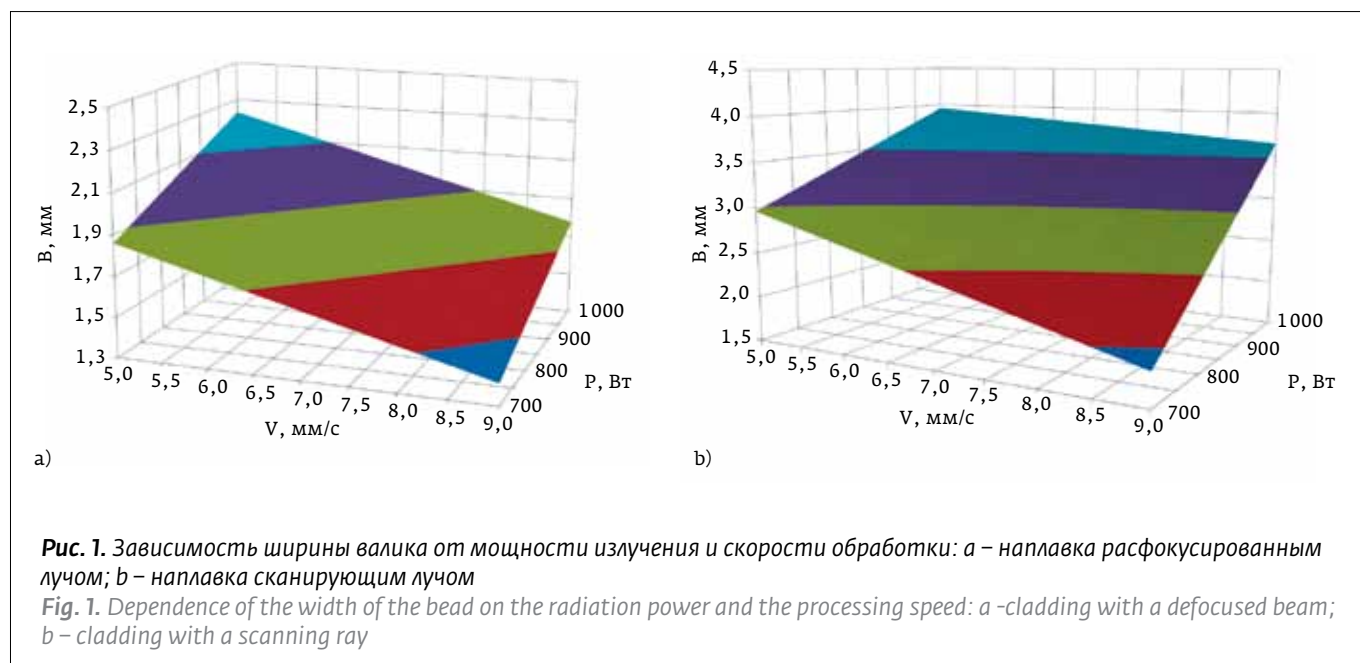
The obtained mathematical models were tested for adequacy by the Student and Fisher criteria.

The analysis of the equations obtained shows a directly proportional relationship between the radiation power and the height of the bead and the inverse relationship between the velocity of the beam and the height of the cladded layer. The width of the bead increases with increasing power and diameter of the beam and decreases with increasing processing speed. Scanning leads to an increase in width with a simultaneous decrease in the height of the bead and increases the cladding productivity by 1.3-1.9 times. Analysis of the equations for the HAZ depth shows that the radiation power has the greatest influence on the HAZ depth. An increase in the speed of the beam movement leads to a decrease in the HAZ depth, which is explained by the smaller instantaneous energy absorbed by the cladded material per unit of time. For comparison, the surfaces for the widths of the cladding zones  $B$  and  $B_{scan} = f(P, V)$  are constructed for  $d = 2$  mm (Fig. 1).

**Таблица 1.** Уровни факторов эксперимента

**Table 1.** Levels of experimental factors

Фактор Factor	$z_+$	$z_-$	$z_0$	$l$	Зависимость уровня фактора эксперимента $x_i$ Dependence of the level of the experiment factor $x_i$
$P$ , Вт	1000	700	850	150	$x_i = (P - 850) / 150$
$V$ , мм/с	9	5	7	2	$x_i = 0,5(V - 7)$
$d$ , мм	3	2	2,5	0,5	$x_i = (d - 2,5) / 0,5$
$f$ , Гц	220	0	—	—	—



где  $b_i$  – линейные коэффициенты регрессии;

$y$  – отклик системы;

$k$  – количество факторов в эксперименте.

Полученные математические модели были проверены на адекватность по критериям Стьюдента и Фишера.

Анализ полученных уравнений показывает прямо пропорциональную зависимость между мощностью излучения и высотой валика и обратно пропорциональную зависимость между скоростью перемещения луча и высотой наплавленного слоя. Ширина валика возрастает с увеличением мощности и диаметра луча и уменьшается при увеличении скорости обработки. Сканирование приводит к росту ширины с одновременным уменьшением высоты валика и повышает производительность наплавки в 1,3–1,9 раза. Анализ уравнений для глубины ЗТВ показывает, что наибольшее влияние на глубину ЗТВ оказывает мощность излучения. Увеличение скорости перемещения луча приводит к уменьшению глубины ЗТВ, что объясняется меньшим вкладом мгновенной энергии, поглощенной наплавленным материалом в единицу времени. Для сравнения построены поверхности для ширины зон наплавки  $B$  и  $B_{\text{скан}} = f(P, V)$  при  $d = 2$  мм (рис. 1).

При использовании круглого лазерного пятна для упрочнения или наплавки время воздействия в его центре определяется отношением диаметра луча к скорости его перемещения, а по краям пятна время воздействия

When using a round laser spot for hardening or cladding, the exposure time at its center is determined by the ratio of the beam diameter to the speed of its movement, and at the edges of the spot the exposure time tends to zero. In this case, only a part of the energy of 30–60% is effectively used for hardening or cladding, depending on the degree of defocusing of the laser beam, and the remaining energy is consumed for useless heating of the zones near the hardened or fused path. In high-frequency oscillations of the beam along the normal to the vector of its displacement, this lost energy participates in the cladding process, affecting the productivity of the process.

This can be clearly seen from the graphs of the surfaces obtained by the results of experiments for the width of the beads. Since the height of the beads varies insignificantly, it is also possible to visually determine the effectiveness of the process.

According to the data obtained, the nature of the linear dependence obtained in the calculations is the same as for the experimental values, however, the calculated function grows somewhat faster. The maximum deviation of the calculated data from the experimental values was 3%.

The clad layer 0.8 mm thick has a high hardness, of the order of 762–806 HV, with underlying HAZ with a hardness of 540–720 HV, the thickness of this layer is 0.8 mm, below are the zones of troostite and sorbitol. The base metal is sorbitol-like perlite and ferrite with a hardness



стремится к нулю. При этом для упрочнения или наплавки эффективно используется только часть энергии (30–60% в зависимости от степени дефокусировки лазерного луча), а оставшаяся энергия расходуется на бесполезный нагрев зон рядом с упрочненной или наплавленной дорожкой. При высокочастотных колебаниях луча по нормали к вектору его перемещения эта потерянная энергия участвует в процессе наплавки, оказывая влияние на производительность процесса.

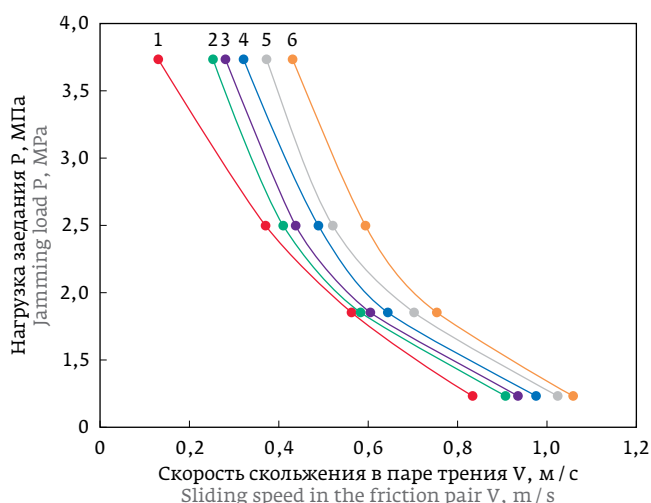
Это подтверждают результаты моделирования ширины валиков. Поскольку высота валиков меняется незначительно, то по ним можно визуально определить и производительность процесса. Полученная экспериментальная зависимость проявила хорошее совпадение с модельной функцией. Однако скорость ее изменения отличается от предсказаний модели. Максимальное отклонение расчетных данных от экспериментальных значений составило 3%.

Наплавленный слой толщиной 0,8 мм имеет высокую твердость порядка 762–806 HV, под ним располагается ЗТВ с твердостью 540–720 HV (толщина слоя 0,8 мм), ниже следуют зоны троостита и сорбита. Основной металл – сорбитообразный перлит и феррит с твердостью 190–210 HV. Наличие зоны оплавления основы на глубину 50–100 мкм говорит о высокой прочности сцепления между покрытием и основным металлом. В процессе наплавки покрытий на основе порошка ФБХ6-2 на различных режимах возникают дефекты типа трещин. Для исключения трещинообразования отработана технология предварительного подогрева образцов при температуре 350 °С в течение двух часов с последующим оплавлением лучом лазера и выдержкой в печи в течение двух часов. При наплавке покрытия, содержащего нанопорошок оксида меди, происходит восстановление оксида меди до чистой меди с выгоранием кислорода. Выбор оксида меди вызван его низкой отражательной способностью лазерного излучения. Введение мягкой фазы (Al, Cu, V и др.) широко используется при лазерной и плазменной наплавке. Эти элементы способствуют релаксации напряжений, возникающих в наплавляемых покрытиях.

На рис.2 представлены зависимости скорости скольжения от давления на образец при испытании на машине трения МТУ-01. Введение в шихту порошка ФБХ6-2 нанопорошка оксида меди приводит к повышению задиристости покрытия в 1,5–2 раза при ступенчатом измене-

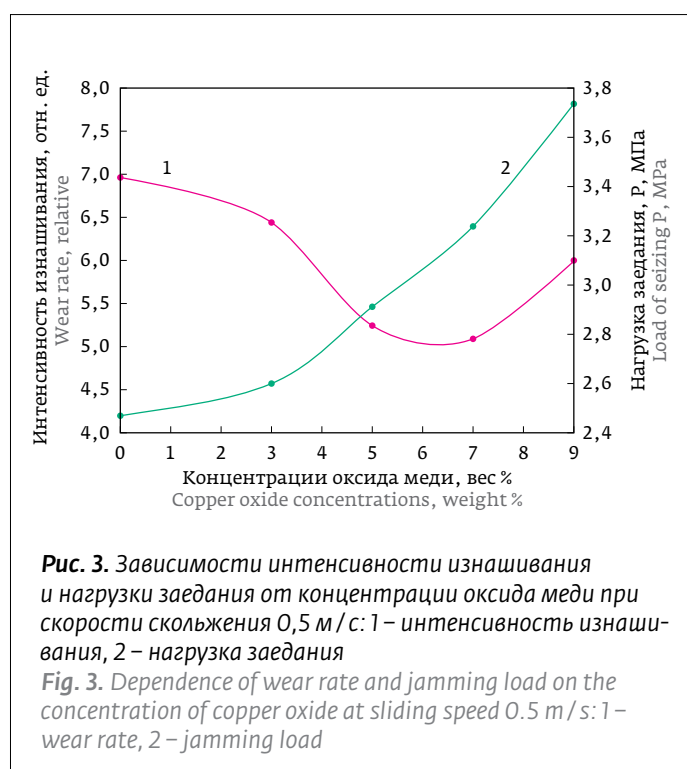
of 190–210 HV. The presence of a flashing zone of the base at a depth of 50–100  $\mu\text{m}$  indicates a high adhesion strength between the coating and the base metal. In the process of coating cladding based on ФБХ6-2 powder, the defects in the form of cracks appear in different modes. To exclude crack formation, the technology of preliminary heating of samples at a temperature of 350 °C for 2 hours was developed, followed by laser beam flashing and holding in the furnace for 2 hours. When cladding a coating containing copper oxide nanopowder, copper oxide is reduced to pure copper with oxygen burnup. Copper oxide was chosen because of the low reflectivity of the laser radiation. The introduction of a soft phase (Al, Cu, V, etc.) is widely used in laser and plasma cladding. These elements contribute to the relaxation of stresses arising in the cladded coatings.

Fig. 2 shows the dependence of the sliding speed on the pressure on the sample when tested on a friction machine MTU-01. The introduction of ФБХ6-2 copper oxide nano-powder into the charge leads to a 1.5 to 2-fold increase in the score resistance of the coating with a gradual change



**Рис. 2.** Зависимость нагрузки заедания ( $P$ , МПа) от скорости ( $V$ , м/с) скольжения в паре трения (наплавленный слой на стали 20 – сталь ШХ15): 1 – цементация; 2 – ФБХ6-2; 3 – ФБХ6-2 + 3% CuO; 4 – ФБХ6-2 + 5% CuO; 5 – ФБХ6-2 + 7% CuO; 6 – ФБХ6-2 + 9% CuO

**Fig. 2.** Dependence of the jamming load ( $P$ , МПа) on the speed ( $V$ , м/с) of sliding in the friction pair (cladded layer on steel 20 – steel ШХ15): 1 – cementation; 2 – ФБХ6-2; 3 – ФБХ6-2 + 3% CuO; 4 – ФБХ6-2 + 5% CuO; 5 – ФБХ6-2 + 7% CuO; 6 – ФБХ6-2 + 9% CuO



нии скорости скольжения 0,1–1,1 м/с и давления в пределах 1–4 МПа.

Установлено, что для образцов, на которые нанесены покрытия с добавлением нанопорошка оксида меди, предельная скорость скольжения, при которой наступает заедание, оказывается выше в 1,2–3,3 раза, чем для цементованного образца. Конкретные значения из указанного диапазона связаны с концентрацией оксида меди в шихте и величиной контактного давления.

Значения интенсивности изнашивания образцов, наплавленных порошком ФБХ6-2 с добавкой оксида меди разной концентрации, представлены в табл.2.

Установлено, что с ростом концентрации оксида меди в шихте задиристость увеличивается. При этом интенсивность изнашивания сначала снижается (при увеличении концентрации оксида меди до 7%), а затем начинает расти с момента достижения концентрации величины 9%.

Зависимости интенсивности изнашивания и нагрузки

**Таблица 2.** Интенсивность изнашивания образцов  
**Table 2.** Intensity of wear of the samples

Исследуемый образец Test sample	Интенсивность изнашивания I Wear intensity I
Цементация Cementation	$7,28 \cdot 10^{-9}$
ПГ-ФБХ6-2	$6,97 \cdot 10^{-9}$
ПГ-ФБХ6-2 + 3% CuO	$6,45 \cdot 10^{-9}$
ПГ-ФБХ6-2 + 5% CuO	$5,25 \cdot 10^{-9}$
ПГ-ФБХ6-2 + 7% CuO	$5,11 \cdot 10^{-9}$
ПГ-ФБХ6-2 + 9% CuO	$6,07 \cdot 10^{-9}$

in the sliding speed of 0.1–1.1 m/s and pressure within the range of 1–4 MPa.

For coating with addition copper oxide nanopowder, the sliding speed at which the jamming occurs is by 1.2–2.3 times higher than for the cemented sample depending on the concentration of copper oxide in the charge and the contact pressure.

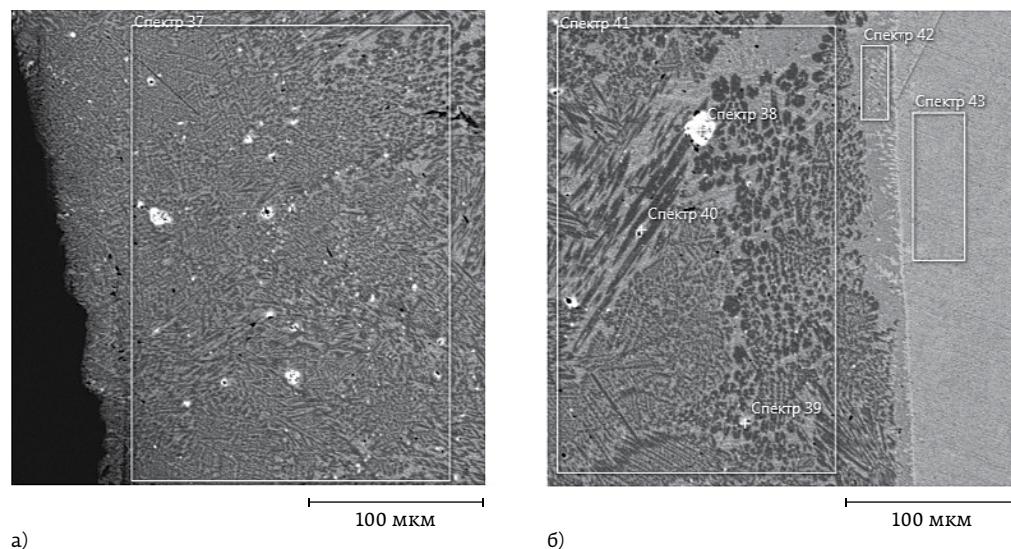
The wear rates for the samples clad with ФБХ6-2 powder with various concentrations of copper oxide are shown in Table 2.

It has been established that with increase in the concentration of copper oxide in the charge, the score resistance increases and the wear rate to a copper oxide concentration of 7% decreases and increases at a concentration of 9%.

**Таблица 3.** Элементный состав зоны сплавления ПГ-ФБХ6-2 + 5% CuO с основой

**Table 3.** Elemental composition of the fusion zone of ПГ-ФБХ6-2 + 5% CuO with the base

Номер спектра Number of the spectrum	Содержание элемента, вес. % Element content, wt. %						
	C	O	Si	Cr	Mn	Fe	Cu
38	4,14	2,45	0,64	1,04	4,49	15,56	71,67
39	4,42	0,84	0,26	2,35	3,01	5,21	83,9
40	4,64	1,49	0,33	2,48	3,54	4,26	81,26
41	4,78	1,12	1,26	34,21	1,79	53,44	3,4
42	4,87	1,15	1,13	19,77	1,38	67,9	3,8
43	0,21	0,9	0,73	0,24	0,57	97,87	0,12



**Рис. 4.** Микро-структуры (СЭМ) наплавленного слоя ФБХ6-2 + 5% CuO: а – верхний наплавленный слой; б – зона сплавления с основным металлом

**Fig. 4.** Microstructures (SEM) of the cladded layer ФБХ6-2 + 5% CuO: а – the upper cladded layer, б – the fusion zone with the base metal

заедания от концентрации оксида меди представлены на рис.3. На рис.4 представлены SEM-фотографии микрошлифов наплавленных слоев порошком ПГ-ФБХ6-2 с добавлением нанопорошка оксида меди. Установлен элементный состав верхней части наплавленного слоя (рис. 4а): Fe – 50,13%; Cr – 33,66%; C – 8,46%; Cu – 3,63%; Mn – 1,89%; Si – 1,21%; O – 1,02%. В составе структуры белые зоны представляют агломераты меди размером от 1 до 10 мкм, и общее их содержание составляет 1,4% от общего объема шихты. Элементный состав зоны сплавления с основным металлом (рис. 4б) представлен в табл. 3.

Белые зоны (спектры 38–40) представляют агломераты меди размером до 10 мкм. Зона сплавления с основным металлом (спектр 42) содержит 3,4% меди, что свидетельствует о равномерном распределении меди по глубине образца от поверхности до основного металла.

## ВЫВОДЫ

Установлено, что присутствие меди в наплавленных слоях повышает в 3,3 раза значение скорости скольжения, при котором возникают условия развития задира, и до 30% по сравнению с цементованным образцом повышают величину интенсивности изнашивания.

При высокочастотном сканировании луча производительность процесса наплавки в 1,3–1,9 раза выше, чем без сканирования луча. Введение нанопорошка оксида меди в состав шихты на основе ФБХ6-2 повышает задиристость наплавленных покрытий в 1,5–2 раза.

The wear rate and the jamming load on the copper oxide concentration are shown in Fig. 3. Fig. 4 shows photographs of microsections of the welded layers of ПГ-ФБХ6-2 powder with the addition of copper oxide nano-powder, obtained with the help of a scanning electron microscope (SEM).

The elemental composition in the upper part of the cladded layer is Fe – 50,13%, Cr – 33,66%, C – 8,46%, Cu – 3,63%, Mn – 1,89%, Si – 1,21%, O – 1.02% (Fig. 4a). As part of the structure, the white zones represent copper agglomerates with a size of 1 to 10 μm, and their total content is 1.4% of the content in the charge. The elemental composition of the fusion zone with the basic metal (Fig. 4b) is shown in Table 3.

White zones (spectra 38, 39, 40) represent copper agglomerates of up to 10 μm in size. The fusion zone with the basic metal (spectrum 42) contains 3.4% copper, indicating a uniform distribution of copper from the surface to the basic metal.

## CONCLUSIONS

It was found that the presence of copper in the cladded layers increases the sliding speed at which a score develops up to 3.3 times and the wear rate is up to 30% compared to the cemented sample.

With high-frequency scanning of the beam, the effectiveness of the cladding process is 1.3–1.9 times higher than without scanning the beam.

The introduction of a copper oxide nano-powder into the charge on the basis of ФБХ6-2 powder improves the hardness of the cladded coatings 1.5 to 2-fold.



## ЛИТЕРАТУРА

1. **Степанова Н.В., Разумakov А.А.** The effect of doping with copper and aluminium on structure, mechanical and friction properties of steel. – Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST-2013), 28 June-1 July, Mongolian University of Science and Technology. – Ulaanbaator, Mongolia: IEEE organized., 2013, v. 2, p. 240–242.
2. **Головин Е.Д., Кузнецов В.А., Кумар В., Попелюх П.А., Степанова Н.В.** Влияние меди на антифрикционные свойства серых чугунов. – Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 2012, № 1 (54), с. 81–84.  
**Golovin E.D., Kuznetsov V.A., Kumar V., Popelyuh P.A., Stepanova N.V.** Vliyanie medi na antifrikcionnye svojstva seryh chugunov. – Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty), 2012, № 1 (54), s. 81–84.
3. **Степанова Н.В., Разумakov А.А., Лозhkина Е.А.** Structure and mechanical properties of Cu-alloyed cast iron. – Applied Mechanics and Materials, 2014, v. 682, p.178–182.
4. **Степанова Н., Разумakov А., Лозhkина Е., Zhil'tsov I., Kuznetsov V.** Influence of Surfactants on the Structure and wear resistance of copper alloyed hypereutectoid steel. – Advanced Materials Research, 2014, v.1040, p.53–58. doi: 10.4028 / www.scientific.net / AMR.1040.53.
5. **Sil'man G.I., Kamynin V.V., Tarasov A. A.** Effect of copper on structure formation in cast iron. – Metal Science and Heat Treatment, 2003, v. 45, iss. 7, p. 254–258. – doi: 10.1023 / A:1027320116132.
6. **Chairuangstri T., Edmonds D. V.** The precipitation of copper in abnormal ferrite and pearlite in hypereutectoid steels. – Acta Materialia, 2000, v. 48, iss. 15, p.3931–3949. – doi:10.1016 / S1359-6454(00)00176-2.
7. **Cao L., Wu S., Liu B.** On the Cu precipitation behavior in thermo mechanically embrittled processed low copper reactor pressure vessel model steel. – Materials and Design. 2013, v. 47, p. 551–556. – doi: 10.1016 / j.matdes.2012.12.055.
8. **Fourlaris G., Baker A. J., Papadimitriou G. D.** Microscopic characterisation of  $\epsilon$ -Cu interphase precipitation in hypereutectoid Fe-C-Cu alloys. – Acta Metallurgica et Materialia, 1995, v. 43, p. 2589–2604. – doi:10.1016 / 09567151(94)00474-V.
9. **Chairuangstri T., Edmonds D. V.** Abnormal ferrite in hypereutectoid steels. – Acta Materialia, 2000, v. 48, iss. 7, p.1581–1591. – doi: 10.1016 / S1359-6454(99)00442-5.
10. **Степанова Н. В., Батаев А.А., Ситников А.А., Осколкова Т. Н.** Износостойкость заэвтектоидной стали, легированной медью и алюминием. – Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 2015, № 4 (69), с. 72–79.  
**Stepanova N.V., Bataev A. A., Sitnikov A. A., Oskolkova T. N.** Iznosostojkost' zaehvtektoidnoj stali, legirovannoj med'yu i alyuminiem. – Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty), 2015, № 4 (69), с. 72–79.
11. **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. **Biryukov V. P., Dozorov A. V.** Lazernye sistemy dlya uprochneniya, naplavki detalej i tochnogo raskroya listovogo materiala. – Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin, 2006, № 1, с.60–66.
12. Пат. 2607278 Российская Федерация, МПК C23C4 / 06. Состав шихты для шликерных покрытий / В. П. Бирюков, Э. Г. Гудушаури, Д. Ю. Татаркин, А.А. Фишков, О. Н. Чурляева; опубл. 10.01.2017. Pat. 2607278 RF. Composition of charge for slip coatings / V.P. Biryukov, E.H.G. Gudushauri, D.YU. Tatarkin, A. A. Fishkov, O.N. Churlyayeva; 10.01.2017.
13. **Бирюков В.П., Фишков А.А.** Влияние режимов лазерной обработки на размеры наплавленных валиков. – Труды МНТК ФТИ-2017. Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике, 2017, вып. 23 (XXIII), с. 416–418.  
**Biryukov V.P., Fishkov A. A.** Vliyanie rezhimov lazernoj obrabotki na razmery naplavlennykh valikov. – Proceedings of the MNTK FTI-2017. Informatika & technology. Industrial Innovac. Tech., 2017, iss. 23 (XXIII), p. 416–418.
14. **Евдокимов Ю.А., Колесников В. И., Тетерин А. И.** Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М: Наука, 1980. **Evdokimov Y. A., Kolesnikov V. I., Teterin A. I.** Planirovanie i analiz ehksperimentov pri reshenii zadach treniya i iznosa. – M: Nauka, 1980.