



ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЬ

В. П. Бирюков¹ к. т. н., laser-52@yandex.ru;

Т. А. Базлова² к. т. н.

¹ФГБУН Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

Поверхности изделий, работающих в жестких климатических условиях, должны обладать коррозионной стойкостью, трибологическими характеристиками и высокими механическими свойствами. Этим задачам отвечают методы наплавки медных сплавов на сталь, обзор которых представлен в статье. Разработана технология лазерной наплавки антифрикционных покрытий на основе меди порошковым материалом ПР-БРАМц 9-2. Представлены параметры процесса.

Статья поступила в редакцию 09.02.2019.

Статья принята к публикации 01.03.2019.

В судостроении, химическом машиностроении и других отраслях промышленности, где создаются изделия, предназначенные для эксплуатации в жестких условиях, к деталям предъявляются повышенные требования. Их поверхности должны обладать коррозионной стойкостью, антифрикционными свойствами, тепло- и электропроводностью и при этом иметь высокие механические свойства [1]. Изготовление изделий из меди и ее сплавов дорого с экономической точки зрения, а в ряде случаев просто невозможно по причине низкого предела прочности меди и сплавов. Для уменьшения расхода медных сплавов изделия можно создавать путем наплавки медных сплавов на сталь. Применение дуговых методов наплавки сопровождается значительным расплавлением стальной подложки, надрезами материала основы и перемешиванием стали с расплавленным присадочным материалом. Как результат наплавленный слой может содержать до 30% железа.

Известны эксперименты, в которых лазерную наплавку медного слоя проводили проволокой МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 диаметром 1,2 мм на стальную пластину СтЗсп толщиной 7 мм [2]. В качестве источника лазерного излучения использовали волоконный лазер ЛС-15, оптическую сварочную головку YW50.

ANTIFRICTION COATING LASER CLADDING ON STEEL

V. P. Biryukov¹ Ph.D., laser-52@yandex.ru;

T. A. Bazlova² Ph.D.

¹A. A. Blagonravov FGBUN Institute of Mechanical Engineering of RAS, Moscow, Russia

²National Research University of Technology MISiS, Moscow, Russia

The surfaces of products operating in rough climatic conditions must possess corrosion resistance, tribological characteristics and high mechanical properties. These tasks are addressed by the methods of copper alloy cladding on steel, which are reviewed in this article. The technology of copper-based antifriction coating laser cladding with the powder material PR-BrAMts 9-2 has been developed. The process parameters are introduced.

Article was received by the editorial board on 09.02.2019

Article accepted for publication 01.03.2019

The increased demands are made to the details in the shipbuilding, chemical engineering and other industries, where the products intended for operation in rough conditions are created. Their surfaces must possess corrosion resistance, antifriction properties, heat and electrical conductivity, as well as high mechanical properties [1]. The manufacture of products from copper and its alloys is expensive, from an economic point of view, and in some cases is simply impossible due to the low strength of copper and alloys. To reduce the consumption of copper alloys, the products can be created by welding copper alloys to steel. The use of arc cladding techniques is accompanied by a significant melting of the steel substrate, cuts of the base material and mixing of the steel with the molten filler material. As a result, the deposit may contain up to 30% iron.

The experiments are known where the laser and copper melting of the copper layer was carried out with a welding wire MNKZhT 5-1-0.2-0.2 with a diameter of 1.2 mm on a steel plate St3sp with a thickness of 7 mm [2]. A fiber laser LS-15, an optical welding head YW 50 were used as a source of laser radiation. The cladding was carried out

Наплавку проводили при мощности излучения 5–10 кВт, варьируя диаметр луча, скорость наплавки и скорость подачи проволоки. Металлографическими исследованиями установлено, что глубина проникновения меди в сталь при мощности излучения $P=5$ и 10 кВт и диаметре лазерного пятна $D=3,6$ мм составляет 50–130 мкм, а при $P=10$ кВт и $D=6$ мм глубина проникновения уже составляет 100–300 мкм. Среднее содержание железа в наплавленном слое определено как 3,6 и 20,3% соответственно. Микротвердость наплавленного валика при мощности излучения 5 кВт изменяется в пределах 77–115 HV_{0,2}, а при мощности излучения 10 кВт находилась в пределах 77–330 HV_{0,2}.

В работе [3] описан эксперимент, который проводился при использовании диодного лазера мощностью до 1600 Вт. Для наплавки был выбран порошок бронзы Cu15Sn0,4P с размерами частиц 150–180 мкм. В качестве подложки применяли легированную сталь AISI 4340. Лазерный луч фокусировался с помощью линзы диаметром 50 мм с фокусным расстоянием 250 мм. На поверхности подложки формировали пятно лазера диаметром 3 мм. Единичные дорожки наплавливали при мощности лазера 1000 Вт, скорости перемещения луча 10 мм/с и расходе порошка 24 г/мин. Средняя плотность мощности излучения составляла 142 Вт/мм². Ширина единичной наплавленной дорожки была 3 мм при высоте 0,8 мм. Наплавку поверхности образцов выполняли с коэффициентом перекрытия 66%. Твердость бронзового покрытия HV 172±12, и она выше, чем у фосфористой бронзы 100 HB или 110 HV. Твердость зоны термического влияния толщиной до 0,5 мм составляла 630±50 HV, что значительно выше, чем твердость легированной стали (335±40 HV).

Результаты лазерной наплавки образцов стали SAE1045 с размерами 40×30×8 мм, выполняемой с помощью CO₂-лазера мощностью излучения 2 кВт, при скоростях перемещения луча 5, 9 и 13 мм/с и диаметре луча 3 мм, описаны в статье [4]. На поверхность образца наносили шликерное покрытие толщиной до 1 мм, содержащее порошок Cu5Al и связующее вещество. При скорости обработки 5 мм/с наблюдаются сферически частицы железа, равномерно распределенные в зоне наплавки, кроме дендритной структуры, расположенной у подложки. При увеличении скорости сканирования до 9 и 13 мм/с дендритные микроstructures исчезают, распределение сферических частиц железа становится гетерогенным, а электрическое сопротивление наплавленного слоя уменьшается с увеличением скорости перемещения луча.

Авторы работы [5] наносили на стальную пластину Q235 с размерами 100×100×10 мм равномерным

with a radiation power of 5–10 kW, varying the beam diameter, the cladding rate and the wire feed speed. The metallographic studies have established that the depth of penetration of copper into steel with a radiation power of $P=5$ and 10 kW and a laser spot diameter of $D=3.6$ mm is 50–130 μm, and at $P=10$ kW and $D=6$ mm the depth of penetration is already 100 to 300 μm. The average iron content in the deposited layer is defined as 3.6 and 20.3%, respectively. Microhardness of the weld bead with radiation power of 5 kW varies between 77–115 HV_{0.2}, and with radiation power of 10 kW it was in the range of 77–330 HV_{0.2}.

In [3] an experiment is described which was carried out using a diode laser with a power of up to 1600 W. For cladding, Cu15Sn0.4P bronze powder with a particle size of 150–180 μm was chosen. AISI 4340 alloy steel was used as a substrate. The laser beam was focused with a 50 mm lens with a focal length of 250 mm. A laser spot with a diameter of 3 mm was formed on the substrate surface. Single paths were deposited at a laser power of 1000 W, a beam moving speed of 10 mm/s and a powder consumption of 24 g/min. The average radiation power density was 142 W/mm². The width of a single weld bead was 3 mm with a height of 0.8 mm. Cladding of the sample surface was performed with an overlap ratio of 66%. The hardness of the bronze coating HV is 172±12, and it is higher than that of phosphorous bronze 100 HB or 110 HV. The hardness of the heat-affected zone, up to 0.5 mm thick, was 630±50 HV, which is significantly higher than the hardness of alloyed steel (335±40 HV).

The results of laser cladding of SAE1045 steel samples with dimensions of 40×30×8 mm, performed using a CO₂ laser with a radiation power of 2 kW, at beam speeds of 5, 9 and 13 mm/s and beam diameter of 3 mm are described in [4]. A slip coating with a thickness of up to 1 mm, containing Cu5Al powder and a binder, was applied to the sample surface. At a processing speed of 5 mm/s, spherical particles of iron are observed, uniformly distributed in the weld zone, except for the dendritic structure located near the substrate. As the scanning speed increases to 9 and 13 mm/s, the dendritic microstructures disappear, the distribution of spherical iron particles becomes heterogeneous, and the electrical resistance of the deposited layer decreases with increasing beam moving speed.

The authors of [5] applied a powder containing copper, nickel and tin in a ratio of 77:15:8 with

слоем толщиной 1,2 мм порошок, содержащий медь, никель и олово в пропорции 77:15:8, перемешивая его перед нанесением. Наплавку проводили непрерывным излучением CO₂-лазера мощностью 2 кВт при скорости перемещения луча 400 мм/мин и диаметре луча на поверхности образца 4,5 мм. Затем проводили старение образца при температуре 370 °C в течение 30–480 минут. Микротвердость покрытия оказалась вдвое выше после старения при 370 °C в течение 2 часов, и ее максимальное значение составило 390 HV. При этом удельное электрическое сопротивление покрытия уменьшилось с $2,87 \cdot 10^{-5}$ до $1,52 \cdot 10^{-5}$ Ом·см.

Для наплавки алюминиевой бронзы в работе [6] использовали CO₂-лазер «Комета-2» мощностью излучения 1 кВт. Плотность мощности составляла $\sim 1,27 \cdot 10^5$ Вт/см². В качестве подложки использовалась сталь 45. Единичные дорожки и многослойная наплавка бронзы для испытания образцов на трение и износ были нанесены при скорости перемещения луча 100–300 мм/мин и расстоянии сопла над поверхностью 10–14 мм. В условиях испытания при трении без смазочного материала при скоростях наплавки ниже 140–160 мм/мин коэффициент трения стабильный 0,17–0,2 и значительно ниже по сравнению с литыми алюминиевыми бронзами.

Задача снижения изнашивания головки железнодорожного буфера решалась в работе [7]. Железнодорожные буферы во время работы находятся в практически постоянном контакте друг с другом и имеют значительные износы. Для уменьшения интенсивности изнашивания головки буфера покрывают графитизированной смазкой, однако этот способ имеет много недостатков. Было предложено решение покрыть голову буфера с бронзой с помощью лазерной наплавки. В качестве присадочного материала выбрали алюминиевую бронзу CuAl9Fe3. Лазерную наплавку проводили с помощью роботизированного станда, оснащенного промышленными роботами ABB, и диодного лазера высокой мощности HPDL LDF 4000-30 фирмы LaserLine с максимальной выходной мощностью 4,0 кВт. Материал основы – круг из мягкой стали S355J2, имеющий номинальный диаметр 38,0 мм, Твердость наплавленного покрытия колебалась в пределах 178–189 HV_{0,2}.

Наименьший износ показали образцы с алюминиевыми слоями бронзы (в среднем 10 мг) и стальные образцы со смазанными поверхностями (в среднем 7,5 мг). Износ образцов оказался одинаковым на протяжении всех четырех серий. Таким образом, можно предположить, что применение алюминиевой бронзы CuAl9Fe3 после лазерной наплавки позволит отказаться от необходимости смазывания железнодоро-

a uniform layer of 1.2 mm thick onto a steel plate Q235 with dimensions of 100×100×10 mm, mixing it before the application. The cladding was performed by continuous radiation of a 2 kW CO₂ laser with a beam displacement speed of 400 mm/min and a beam diameter of 4.5 mm on the sample surface. Then, the sample was aged at a temperature of 370 °C for 30–480 minutes. The microhardness of the coating was twice as high after aging at 370 °C for 2 hours, and its maximum value was 390 HV. At the same time, the electrical resistivity of the coating decreased from $2.87 \cdot 10^{-5}$ to $1.52 \cdot 10^{-5}$ Ohm·cm.

For cladding aluminum bronze, the authors of [6] used a CO₂ laser «Comet-2» radiation power of 1 kW. The power density was $\sim 1.27 \cdot 10^5$ W/cm². Steel 45 was used as a substrate. Single paths and multilayered cladding of bronze for testing samples for friction and wear were applied at a beam moving speed of 100–300 mm/min and a nozzle distance above the surface of 10–14 mm. Under the test conditions for friction without lubricant at cladding speeds lower than 140–160 mm/min, the friction coefficient is stable 0.17–0.2 and is significantly lower compared to cast aluminum bronze.

The task of reducing the wear of the rail buffer head was solved in [7]. During operation, railway buffers are in almost constant contact with each other and have significant wear. To reduce the wear rate, the buffer head is covered with a graphitized lubricant, however, this method has many disadvantages. It was proposed to cover the head buffer with bronze using laser cladding. Aluminum bronze CuAl9Fe3 was chosen as the filler material. Laser cladding was performed using a robotic stand equipped with ABB industrial robots and a high-power diode laser HPDL LDF 4000-30 with a maximum output power of 4.0 kW. The base material is a circle of mild steel S355J2, having a nominal diameter of 38.0 mm. The hardness of the weld coating varied within 178–189 HV_{0,2}.

The samples with aluminum layers of bronze (10 mg on average) and steel samples with lubricated surfaces (7.5 mg on average) showed the least wear. The wear of the samples was the same for all four series. Thus, it can be assumed that the use of CuAl9Fe3 aluminum bronze after laser cladding will eliminate the need for lubricating the railroad buffer during the operation of the rolling stock.

The objective of the work is to determine the effect of transverse oscillations of the laser beam on the mixing of the deposited charge with the base material and on the cladding rate.

рожного буфера в процессе эксплуатации подвижного состава.

Целями работы является определение влияния поперечных колебаний лазерного луча на перемещение наплавляемой шихты с материалом основы и на производительность наплавки.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАПЛАВКИ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

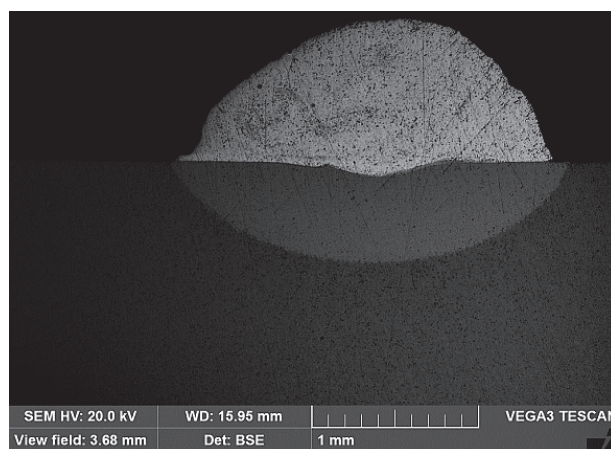
В экспериментальных исследованиях использовали лазерный комплекс ИМАШ РАН [6]. Образцы изготавливали из стали 40Х размерами 15×20×70 мм. Для наплавки выбран порошок на основе меди ПР-БРАМц 9-2 с размером частиц 40–150 мкм. В качестве варьируемых параметров были выбраны мощность излучения $P=700\text{--}1000$ Вт, скорость обработки $V=5\text{--}10$ мм/с и диаметр пучка $d=1\text{--}3$ мм. В качестве дополнительного фактора рассматривалось сканирование луча с фиксированной частотой $f=220$ Гц. Использовался сканатор резонансного типа с упругим элементом, на котором было закреплено зеркало. Металлографические исследования наплавленных покрытий проводили на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н, металлографическом микроскопе Альтами МЕТ 1С и цифровом микроскопе АМ413МL.

Структура и химический состав наплавленных слоев исследовали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного анализа с применением режимов отраженных и вторичных электронов.

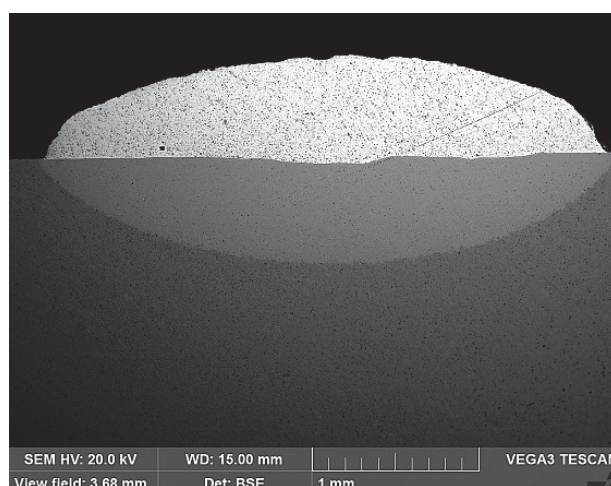
Для определения трибологических характеристик наплавленных образцов применялась универсальная машина трения МТУ-01. Испытания проводили по схеме «плоскость (наплавленный образец) – кольцо сталь 40Х (48–52 HRC). Скорость скольжения и давление на образец изменялись дискретно в интервале 0,1–1,1 м/с и 1–3 МПа соответственно. В качестве смазочного материала использовали масло трансмиссионное ТСЗп-8.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лазерная наплавка образцов выполнялась на оптимальных режимах расфокусированным лучом и с поперечными колебаниями луча по нормали к вектору скорости лазерной обработки. На рис. 1а, б представлены микрошлифы наплавленных дорожек с размерами 0,75×2,1 мм, твердостью (181–208 HV), и 0,68×3,38 мм – (204–224 HV), полученных расфокусированным лучом и сканирующим с частотой 220 Гц лучом соответственно. Зона проплавления основы при обработке расфокусированным лучом и сканиру-



a)



b)

Рис. 1. Наплавка порошка бронзы ПР-БРАМц 9-2 на сталь 40Х x75: а) наплавка расфокусированным лучом, б) наплавка сканирующим с частотой 220 Гц лучом
Fig. 1. Cladding of PR-BrAMts 9-2 bronze powder on steel 40X x75: a) cladding with a defocused beam; b) cladding with a scanning beam with a frequency of 220 Hz

EQUIPMENT FOR CLADDING SAMPLES AND RESEARCH METHODS

In the experimental studies, the laser complex by IMASH of RAS was used [6]. The samples were made of 40X steel with dimensions of 15×20×70 mm. For cladding, copper-based powder PR-BrAMts 9-2 with a particle size of 40–150 μm was chosen. As the variable parameters, we chose the radiation power $P=700\text{--}1000$ W, the processing speed $V=5\text{--}10$ mm/s, and the beam diameter $d=1\text{--}3$ mm. An additional factor was beam scanning with a fixed frequency $f=220$ Hz. A resonant type scanner was

ющим лучом составила 380 и 150 мкм соответственно. Площадь поперечного сечения единичного наплавленного слоя при сканировании луча в 1,5 раза больше, чем при наплавке расфокусированным лучом.

На рис. 2а, б показаны зоны сплавления покрытия с основой и химический состав в зоне наплавки, в переходной зоне и основном материале. Из представленных результатов следует, что при обработке расфокусированным лучом в наплавленном слое наблюдается большее содержание железа, что является следствием более глубокого проплавления основы.

Коэффициенты трения изменялись в пределах 0,016–0,022 и 0,014–0,021 при испытании образцов, наплавленных расфокусированным и сканирующим лучом соответственно, что в два раза ниже, чем на образцах из литой бронзы. Установлено, что площадь поперечного сечения наплавленной дорожки сканирующим лучом в 1,5 раза больше, чем расфокусированным лучом при одних и тех же режимах обработки.

Лазерная наплавка антифрикционных покрытий на стальные поверхности может быть использована в судовом машиностроении, узлах трения гидравлических агрегатов, в тяжело нагруженных подшипниках скольжения и быстроходных механизмах. Современное технологическое оборудование, оснащенное волоконными, диодными и другими лазерами, позволяет наплавливать рабочие поверхности плоских деталей, тел вращения и деталей сложной пространственной формы. Прочность сцепления нанесенных лазерным лучом покрытий на основе меди выше прочности на сдвиг нормализованной и улучшенной стали и составляет 350–480 МПа.

ВЫВОДЫ

Разработана технология лазерной наплавки антифрикционных покрытий на основе меди порошковым материалом ПР-БрАмЦ 9-2. Коэффициент трения скольжения при использовании в качестве смазочного материала масла трансмиссионного ТСЗп-8 составил 0,016–0,022 и 0,014–0,021 при наплавке расфокусированным и сканирующим с частотой 220 Гц лучом соответственно, что в два раза ниже, чем у литой бронзы.

Производительность лазерной наплавки при поперечных колебаниях луча к вектору скорости наплавки повышается в 1,5 раза по сравнению с наплавкой расфокусированным лучом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбин В. В., Вайнерман А. Е., Баранов А. В., Андронов Е. В., Пичужкин С. А. Исследование особенностей и разработка прогрессивных технологий сварки медных сплавов со сталями и наплавки медных сплавов на стали. *Вопросы материаловедения*. 2006; 1 (45): 220–229.

used with an elastic element with a mirror attached. Metallographic studies of the deposited coatings were carried out on a PMT-3 microhardness meter with a load of 0.98 N, a metallographic microscope Altami MET 1C, and an AM413ML digital microscope.

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

The universal friction machine MTU-01 was used to determine the tribological characteristics of the deposited samples. The tests were carried out according to the «plane» (deposited sample) – steel 40X ring (48–52 HRC). The slip rate and pressure on the sample were changed discretely in the range of 0.1–1.1 m/s and 1–3 MPa, respectively. Transmission oil TSZp-8 was used as a lubricant.

EXPERIMENTAL STUDY RESULTS

Laser cladding of the samples was performed at the optimal modes by a defocused beam and with transverse oscillations of the beam along the normal to the vector of the laser processing speed. Fig. 1 (a and b) shows microsections of the weld tracks with dimensions of 0.75×2.1 mm, hardness (181–208 HV), and 0.68×3.38 mm – (204–224 HV) obtained by the defocused beam and scanning with a frequency of 220 Hz, respectively. The zone of penetration of the base when processing the defocused beam and the scanning beam was 380 and 150 μm, respectively. The cross-sectional area of a single deposited layer when scanning the beam is 1.5 times larger than when cladding with a defocused beam.

Fig. 2 (a, b) shows the zone of fusion of the coating with the base and the chemical composition in the cladding zone, in the transition zone and the main material. From the presented results, it follows that the processing of a defocused beam in the deposited layer has a higher iron content, which is a consequence of a deeper penetration of the base.

The friction coefficients varied between 0.016–0.022 and 0.014–0.021 when testing the specimens of the deposited defocused and scanning beams, respectively, which is two times lower than on the cast bronze specimens. It is established that the cross-sectional area of the weld path by the scanning beam is 1.5 times larger than that of the defocused beam with the same processing modes.

Laser cladding of antifriction coatings on steel surfaces can be used in marine engineering, friction units of hydraulic units, in heavily loaded sliding

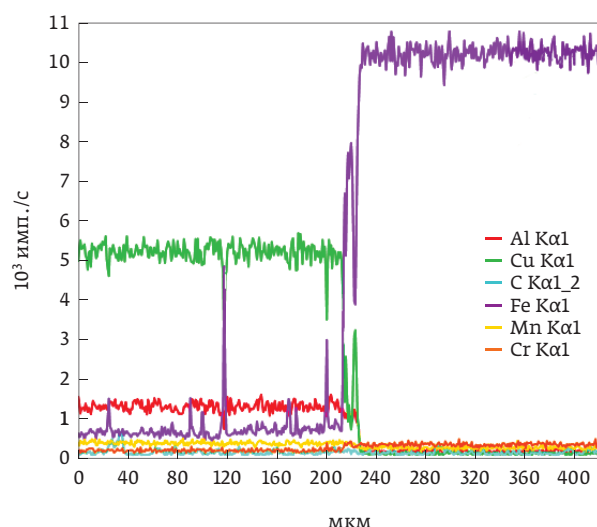
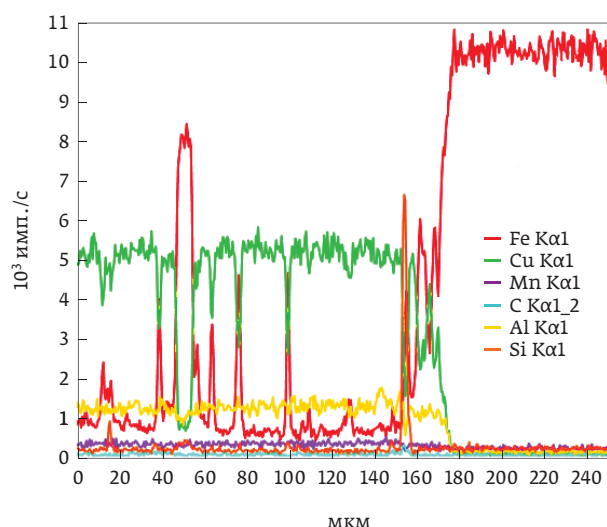
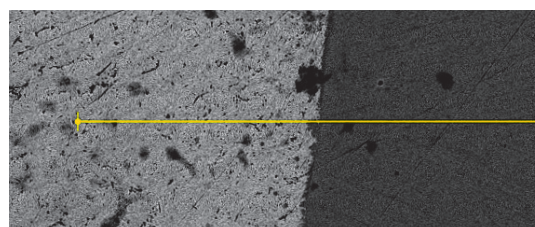
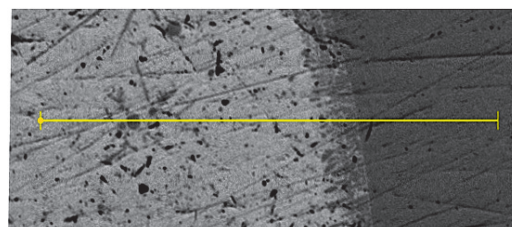


Рис. 2. Зоны сплавления покрытия и основы: а) наплавка расфокусированным лучом, б) наплавка сканирующим лучом
Fig. 2. Zones of fusion of the coating and the base: a) cladding with a defocused beam; b) cladding with a scanning beam

- Rybin V. V., Vajnerman A. E., Baranov A. V., Andronov E. V., Pichuzhkin S. A. Issledovanie osobennostej i razrabotka progressivnyh tekhnologij svarki mednyh spлавov so stalyami i naplavki mednyh сплавov na stali. *Voprosy materialovedeniya*. 2006; 1 (45): 220–229.
2. Цибульский И. А., Климова О. Г., Корсмик Р. С., Ахметов А. Д., Кузнецов М. В. Влияние технологических параметров на взаимное проникновение меди и железа при лазерной наплавке медно-никелевого сплава на сталь. *Сварочное производство*. 2017; 4: 37–42.
- Cibulskij I. A., Klimova O. G., Korsmik R. S., Ahmetov A. D., Kuznecov M. V. Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov na vzaimnoe proniknovenie medi i zheleza pri lazernoj naplavke medno-nikelevogo сплава na stal'. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2017; 4: 37–42.
3. Arias-González F. et al. Production of phosphor bronze coatings by laser cladding. *Procedia Manufacturing*. 2017; 13: 177–182.
4. Zeng D. W., Xie C. S., Wang M. Q. In situ synthesis and characterization of Fe/Cu composite coating on SAE1045 carbon steel by laser cladding. *Materials Science and Engineering*. 2003; 344: 357–364.
5. Zhang H., Yizhua, H., Xiaomina, Ye P. Microstructure and age characterization of Cu-15Ni-8Sn alloy coatings by laser cladding. *Applied Surface Science*. 2010; 256: 5837–5842.
6. Devojno O. G., Feldshtein E., Kardapolava M. A., Lutsko N. I. On the formation features, structure, microhardness and tribological behavior of single tracks and coating layers formed by laser cladding of Al-Fe powder bronze. *Surface and Coatings Technology*. 2019; 358: 195–206.
7. Sitarz M., Kurc-Lisiecka A., Gamon W. Surface Analysis of Railway Buffers Heads Covered with Bronze Using Laser Cladding. *ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING*. 2017; 17 (2): 89–94.
8. Бирюков В. П., Дозоров А. В. Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2006; 1: 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: 60–66.

bearings and high-speed mechanisms. Modern technological equipment equipped with fiber, diode and other lasers makes it possible to build-up the working surfaces of flat parts, bodies of revolution and parts of complex spatial form. The adhesion strength of the copper-based coatings applied by the laser beam is higher than the shear strength of normalized and improved steel and is 350–480 MPa.

CONCLUSIONS

The technology of laser cladding of antifriction coatings based on copper with the powder material PR-BrAMts 9-2 has been developed. The coefficient of sliding friction when using transmission TSZp-8 as a lubricant was 0.016–0.022 and 0.014–0.021 when cladding defocused and scanned at a frequency of 220 Hz, respectively, which is two times lower than that of cast bronze.

The performance of laser cladding with transverse oscillations of the beam to the vector of the cladding rate increases by 1.5 times compared with the cladding of a defocused beam.