



УДК 621.79
DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-122-128

Поступила 20.05.2019
Received 20.05.2019

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВАХ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ

*В. А. КАЛИНИЧЕНКО, М. Л. КАЛИНИЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: kvlad@bntu.by,
А. А. АНДРУШЕВИЧ, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости 99/2, E-mail: andru49@mail.ru*

Для решения специфических триботехнических задач поверхностным слоям пар трения требуется придание особых свойств, например, таких, как образование пленки трения для повышения износостойкости, путем реализации принципа Шарпи. В работе рассмотрены технологические аспекты создания таких покрытий на железосодержащих сплавах путем совмещения лазерной и индукционной наплавки для получения композиционной износостойкой поверхности. В ходе проведенных исследований было получено покрытие, имеющее композиционную структуру, на подложке из стали 45 с медной матрицей и армирующей фазой на основе никель-железных валиков, полученных лазерной наплавкой. Изучена зона раздела между составляющими композиционное покрытие материалами. Приведены результаты исследований химического состава и микротвердости полученных композиционных покрытий. Как показали проведенные исследования, использование лазерно-индукционной наплавки позволяет формировать покрытия стабильного качества при минимальном расходе матричного сплава. Предлагаемая технология позволяет создать гамму различных типов композиционных покрытий на железосодержащих сплавах для различных скоростей трения и степеней нагрузки путем варьирования частотой армирующей сетки и маркой порошков заполнителей.

Ключевые слова. *Композиционные материалы, лазерная наплавка, железосодержащие сплавы, антифрикционные материалы, индукционная наплавка.*

Для цитирования. *Калиниченко, В. А. Технологические аспекты создания композиционных износостойких покрытий на железосодержащих сплавах индукционной наплавкой / В. А. Калиниченко, М. Л. Калиниченко, А. А. Андрушевич // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 122–128. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-122-128.*

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF CREATION OF COMPOSITE WEAR-RESISTANT COATINGS ON IRON-CONTAINING ALLOYS PRODUCTION WITH THE HELP OF INDUCTION WELDING

*U. A. KALINICHENKO, M. L. KALINICHENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: kvlad@bntu.by,
A. A. ANDRUSHEVICH, Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, 99/2, Nezavisimosti ave. E-mail: andru49@mail.ru*

To meet specific tribotechnical problems surface coatings require special properties, e. g. the formation of a friction film to increase wear resistance by implementing the principle of Sharpie. The paper deals with the technological aspects of creating such coatings on iron-containing alloys by combining laser and induction surfacing to obtain a wear-resistant composite coating. Within research, a coating with a composite structure on a substrate of steel 45 with a copper matrix and a reinforcing phase on the basis of Nickel-iron rollers obtained by laser cladding was obtained. The interface between the components of the composite material is studied. The results of studies of the chemical composition and microhardness of the composite coatings are presented. As studies have shown, the use of laser-induction surfacing allows to form a coating of stable quality with minimal consumption of matrix alloy. The proposed technology makes it possible to create a range of different types of composite coatings on iron-containing alloys for different friction velocities and degrees of load by varying the frequency of the reinforcing mesh and the tupe of filler powders.

Keywords. *Composite materials, laser surfacing, iron-containing alloys, antifricition materials, induction surfacing*

For citation. *Kalinichenko U. A., Kalinichenko M. L., Andrushevich A. A. Technological aspects of creation of composite wear-resistant coatings on iron-containing alloys production with the help of induction welding. Foundry production and metallurgy, 2019, no. 2. pp. 122–128. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-122-128.*

Многие стальные или чугунные детали в машиностроении должны иметь износостойкую поверхность при сохранении вязкой и прочной сердцевины изделия, что часто достигается традиционными методами поверхностного упрочнения, например, поверхностной закалкой, химико-термической обработкой или пластическим деформированием [1]. Как правило, эти методы отличаются повышенными энергетическими затратами и невысокой производительностью.

Состояние структуры поверхностного слоя оказывает существенное влияние на механические и эксплуатационные свойства деталей. Одним из эффективных направлений упрочнения рабочих поверхностей, восстановления и увеличения срока эксплуатации изнашиваемых деталей наряду с известными методами является нанесение на них износостойких покрытий различными способами (лазерная наплавка, плазменное напыление, индукционная наплавка и др.) [2–4]. Одним из методов получения композиционных покрытий на стальной подложке является лазерная наплавка параллельных валиков с последующим плазменным напылением слоя порошка бронзы [2]. Однако данная технология получения антифрикционных покрытий требует наличия лазерной установки и аппаратуры для плазменного напыления, а также подготовленных кадров. Представляет интерес изучение возможности применения более широко распространенной индукционной наплавки, реализацию которой можно провести с помощью практически любого индуктора.

Цель данной работы – создание композиционных покрытий путем совмещения лазерной и индукционной наплавки, сочетающих твердую фазу и относительно мягкую матрицу, что обеспечивает повышение износостойкости.

На первом этапе исследований проведена лазерная наплавка валиков в виде сетки из железоникелевого сплава ПГ12Н01, что обеспечивает более прочное их соединение с упрочняемой поверхностью образца из стали 45 (рис. 1, *а*). Наплавку проводили на технологическом комплексе на базе CO₂-лазера непрерывного действия типа «Комета» мощностью 1,0 кВт и координатного стола с системой ЧПУ «РУХ-5,0». Толщина валиков составляла 0,5–0,9 мм, шаг валиков изменялся в интервале 5–20 мм исходя из условия обеспечения возможного износа изделия и припуска на механическую обработку.

На втором этапе проведена очистка наплавленного образца в растворе ингибиторов с последующей его обработкой, специально разработанными флюсовыми составами на основе производных борной кислоты, с последующей кратковременной выдержкой в термической печи для улучшения смачиваемости стальной поверхности медным расплавом (рис. 1, *б*).

Затем углубления в сетке заполняли медно-никелевым порошком. Далее проводили его расплавление с помощью индукционного нагрева с применением инверторной установки ИМ 30–8–50 и выдержкой при температуре нагрева в расплавленном состоянии в течение определенного времени в графитовом тигле, который обеспечивал равномерное поддержание температурного поля по всей площади заготовки (рис. 1, *в*). Выдержка покрытия при индукционном нагреве была необходима для полного протекания процесса диффузионного соединения матричного сплава с материалом валика и основы изделия.

В результате исследований получено покрытие с композиционной структурой толщиной около 600–700 мкм. Получение композиционного покрытия с параллельными валиками из различных типов материалов методами лазерной и плазменной наплавки благодаря скоротечности процесса и отсутствию этапа зафлюсовки поверхности заготовки ведет к получению покрытия с отдельными порами в зоне соприкосновения матричного сплава и материала основы [5]. Нанесение валиков в виде сетки на рабочей поверхности с последующим индукционным оплавлением медного порошка позволяет улучшить качество покрытия за счет более эффективного сцепления матрицы с основой, которая обработана флюсом.

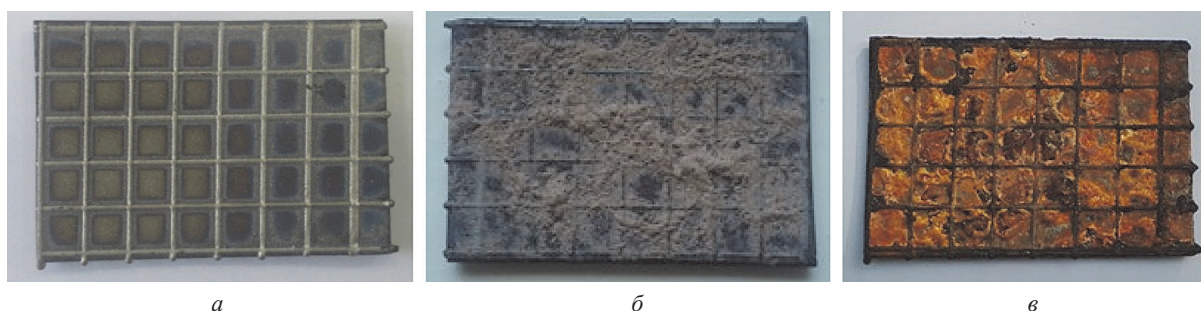


Рис. 1. Этапы создания композиционного покрытия: *а* – стальной образец с нанесенной сеткой; *б* – образец, покрытый флюсом; *в* – образец после индукционной наплавки перед механической обработкой

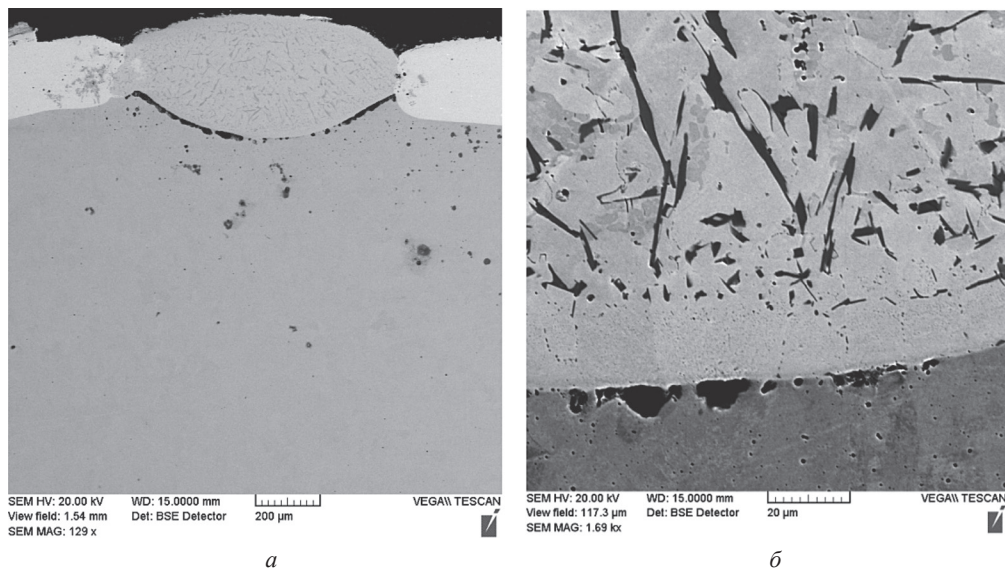


Рис. 2. Характер границы композиционного покрытия и подложки: *a* – зона контакта бронзой матрицы, наплавленной сетки и стальной подложки; *б* – зона контакта наплавленной сетки и подложки

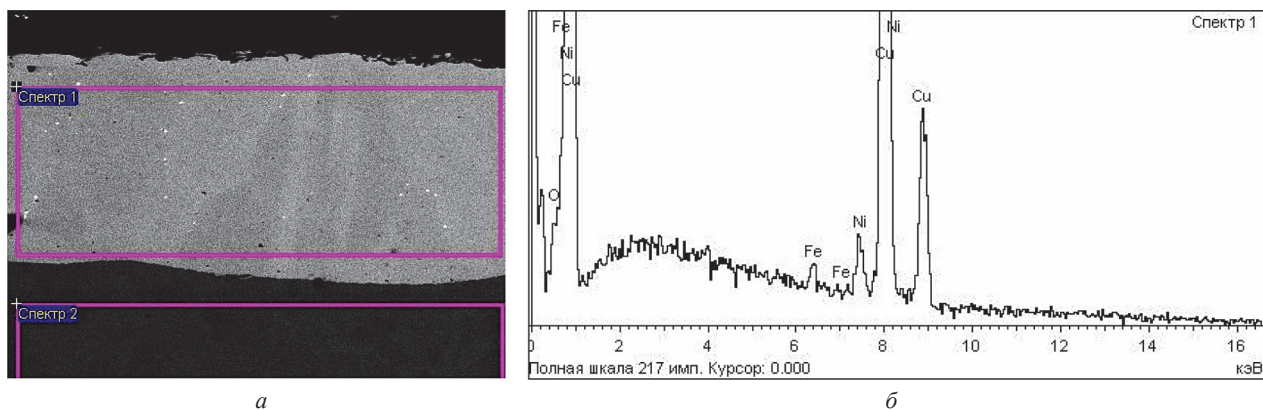


Рис. 3. Зона контакта матрица – подложка: *a* – зона сканирования матрицы; *б* – спектр элементов в исследуемой зоне матрицы

Электронно-микроскопические исследования выявили хорошую адгезию материала матрицы, полученной методом индукционной наплавки, а также повышенную пористость в зоне контакта армирующей сетки из железоникелевого сплава, полученной методом лазерной наплавки, и материала подложки. При этом зона контакта с бронзовой матрицей практически лишена пористости и отличается высокой сплошностью (рис. 2, *a*). Благодаря высокой скорости отвода теплоты на границе раздела валик–подложка наблюдается мелкокристаллическая структура, которая в дальнейшем сменяется обычной структурой для сплава материала валика (рис. 2, *б*).

Проведен анализ элементов матрицы в выбранном сечении. На рис. 3, *б* представлен спектральный анализ в исследуемой зоне. Результаты расшифровки диаграмм сканирования приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Анализ химических элементов в исследуемой зоне матричного сплава, мас. %.

Сканирование	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Итого
Спектр 1, медная матрица	0,70	–	–	–	0,63	2,36	96,31	100,00
Спектр 2, стальная основа	–	0,16	0,13	0,36	99,04	–	0,31	100,00
Максимальные значения	0,70	0,16	0,13	0,36	99,04	2,36	96,31	
Минимальные значения	0,70	0,16	0,13	0,36	0,63	2,36	0,31	

Анализ таблицы показывает присутствие небольшого количества оксидов в матричном составе, а также фазы, содержащие железо и никель. Необходимо учитывать, что при формировании покрытий индукционной наплавкой наблюдается образование оксидов, что может оказывать негативное влияние на свойства получаемых покрытий. Наличие медной матрицы и твердых валиков позволяет реализовать принцип Шарпи, когда имеется мягкая матрица, а валики, соединенные в сетку, являются упрочняющей фазой в композиционном материале.

При создании композиционных покрытий важным моментом является распределение элементов по сечению зоны контакта валик-подложка, определяющее прочность сцепления (см. рис. 2, а). Первая линия для картирования была выбрана на границе валик–стальная подложка с целью определения их связи друг с другом (рис. 4, а). Исследовали как элементы, составляющие основу используемых сплавов, так и примеси (например, кислород в виде оксидов металлов, равномерно распределенный по сечению исследуемого образца).

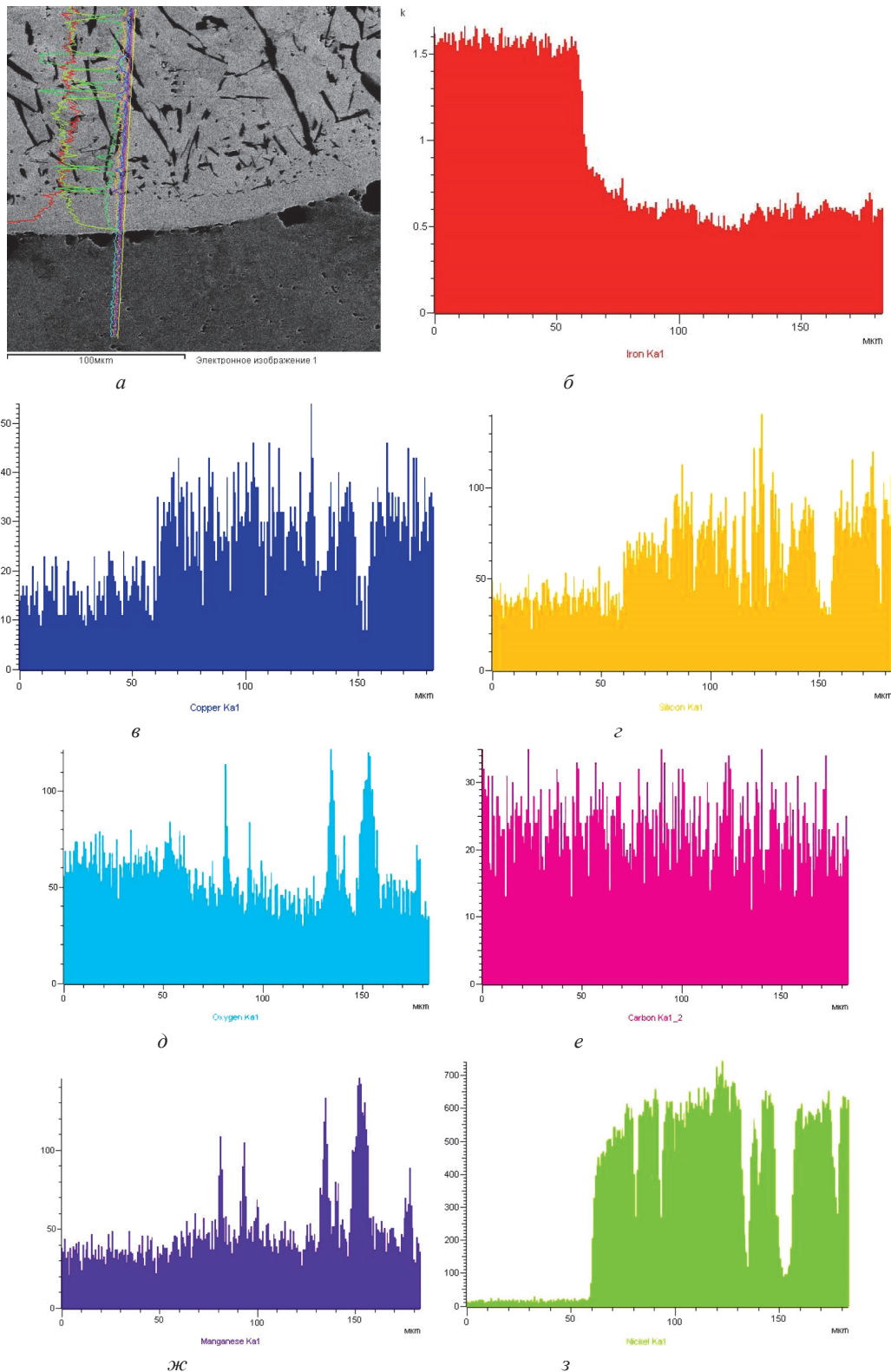


Рис. 4. Линия картирования сетка – подложка: а – исследуемая зона контакта; б – железо; в – медь; г – кремний; д – кислород; е – углерод; ж – магний; з – никель

На рис. 4, *a* отчетливо видны основные зоны данного соединения (снизу вверх): зона материала подложки, граница валик – подложка, мелкокристаллическая переходная зона, зона нормальной кристаллизации материала валика. Основу материала подложки составляет железо (рис. 4, *б*), а валика – никель (рис. 4, *з*). Также можно отметить наличие кремния в материале валика. Распределение остальных элементов, за исключением кислорода, является примерно равномерным по всему сечению образца. Из распределения кислорода (рис. 4, *д*) видно, что основное его количество в виде различных типов оксидов находится как в переходной зоне, так и на границе перехода от мелкокристаллической зоны к зоне нормальной кристаллизации.

Для второй линии картирования (рис. 5, *a*) была выбрана зона контакта между матрицей и армирующей сеткой. На рис. 5, *a* показана зона контакта наплавленного валика и матричного материала матрицы. Линия, по которой проводили сканирование, была выбрана в месте хорошего сцепления рассматриваемых составляющих композита. Как видно из рис. 5, *б*, *в*, на расстоянии 90 мкм от начала линии сканиро-

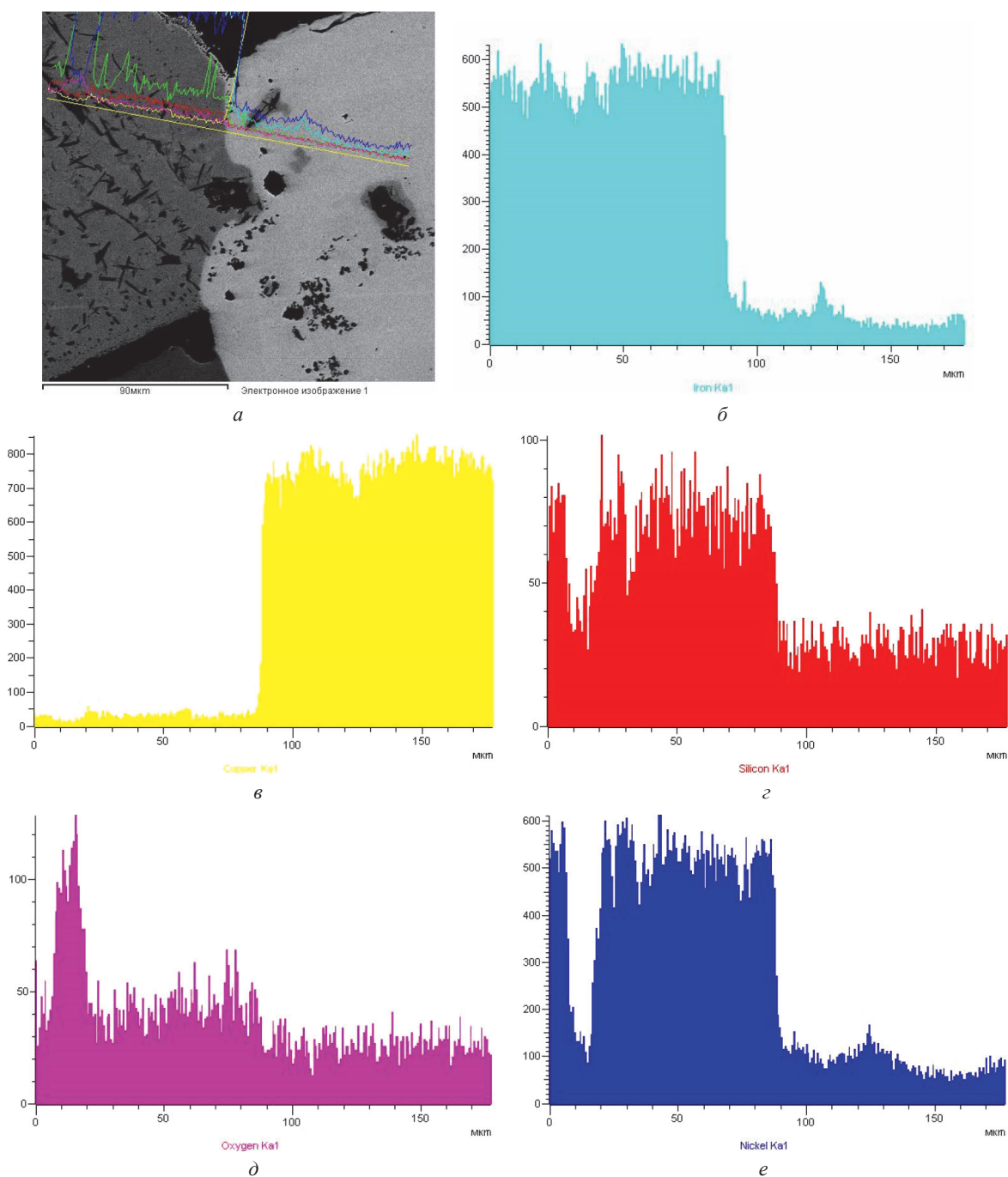


Рис. 5. Линия картирования матрица – лазерная наплавка: *a* – исследуемая зона контакта; *б* – железо; *в* – медь; *г* – кремний; *д* – кислород; *е* – никель

вания наблюдается ярко выраженная граница раздела железо-медь, из рис. 5, *з-е* видно, что в материале валика на расстоянии 10 мкм наблюдается повышение содержания оксидов. В остальном распределение оксидов по сечению образца достаточно равномерное.

Из представленных данных следует, что распределение элементов соответствует химическому составу исследуемых материалов.

В табл. 2 приведены сравнительные значения микротвердости и плотности композитов, полученных лазерной и лазерно-индукционной наплавкой.

Т а б л и ц а 2. Микротвердость исследуемых композиционных покрытий

Способ получения композиционного покрытия	Микротвердость матричного сплава, МПа
Лазерная наплавка по литературным данным [2]	
$t = 0,5$	1500
$t = 1,0$	1500
Лазерно-индукционная наплавка	
$t = 5,0$	1895
$t = 10,0$	1888
$t = 20,0$	1700

П р и м е ч а н и е. t – шаг валиков, мм.

Из таблицы видно, что микротвердость матрицы композиционного покрытия, изготовленного по предлагаемой технологии, выше на 8–10% в сравнении с известными способами [2, 5]. Одновременно наблюдается снижение плотности и повышение пористости покрытия, что может быть объяснено захватыванием воздуха вследствие конвективных потоков при индукционной наплавке. Например, при средней площади валика, равной 0,71 мм², их процентное соотношение по сравнению с матрицей имеет следующую картину: при шаге 5,0 мм объем армирующей фазы составляет 47,3% от общей площади сечения, при шаге 10,0 – 23,5%, а при 20,0 мм – всего 11,8%. При этом необходимо отметить, что нанесение валиков даже с малым шагом не позволяет полностью избежать пористости. При снижении доли армирующей фазы с 47,3 до 11,8% плотность матрицы уменьшается примерно на 0,4% из-за более сильной конвекции, приводящей к захвату воздуха.

Использование предлагаемой технологии позволит расширить технологический ряд износостойких покрытий.

Выводы

Исследовано получение композиционных покрытий индукционной наплавкой на железосодержащих сплавах с нанесенными армирующими элементами методом лазерной наплавки.

Установлено, что нанесение валиков в виде сетки с последующим индукционным оплавлением порошка бронзы, предварительно засыпанного в образованные углубления стенками валиков, дает возможность повысить качество покрытия за счет более равномерного и лучшего сцепления с подложкой образца.

Использование лазерно-индукционной наплавки позволяет получать покрытия стабильного качества при минимальном расходе порошка матричного сплава и создать гамму разнообразных типов композиционных покрытий на железосодержащих сплавах для различных скоростей трения и удельных нагрузок путем варьирования размером ячейки армирующей сетки и составом порошков матрицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арзамасов Б. Н. *Материаловедение: учеб. для вузов* / Б. Н. Арзамасов и [др.]. М.: Изд-во МГТУ, изд. 8-е, 2008. 648 с.
2. Девойно О. Г., Кардаполова М. А., Лучко Н. И., Лапковский А. С. *Возможности формирования композиционных покрытий армированием газотермических покрытий лазерной наплавкой // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: В 3-х кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки.* Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. 360 с.
3. Затуловский С. С., Кезик В. Я., Иванова Р. К. *Литые композиционные материалы.* Киев: Тэхника, 1990. 240 с.
4. *Композиционные материалы: справ.* / Под ред. Д. М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. 292 с.
5. Калиниченко А. С., Шейнерт В. А., Калиниченко В. А., Слущкий А. Г. *Особенности изготовления композиционного материала с макронеоднородной структурой с применением магнитных полей // Литье и металлургия, 2018, № 1. С. 124–127.*

REFERENCES

1. **Arzamasov B. N. i dr.** *Materialovedenie* [Materials Science.]. Moscow, MG TU Publ., izd. 8-e, 2008, 648 p.
2. **Devojno O. G., Kardapolova M. A., Luchko N. I., Lapkovskij A. S.** Vozmozhnosti formirovanija kompozicionnyh pokrytij armirovanijem gazotermicheskikh pokrytij lazernoj naplavkoj [The possibility of forming composite coatings by reinforcement of gas thermal coatings by laser welding.]. *Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov = Modern methods and technologies for creating and processing materials*. Kn. 2. Tehnologii i oborudovanie mehanicheskoi i fiziko-tehnicheskoi obrabotki [Technologies and equipment for mechanical and physicochemical processing]. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2015, 360 p.
3. **Zatulovskij S. S., Kezik V. Ja., Ivanova R. K.** *Litye kompozicionnye materialy* [Cast composite materials]. Kiev, Tjehnika Publ., 1990, 240 p.
4. **Karpinosa D. M.** *Kompozicionnye materialy* [Composite materials]. Kiev, Naukovaja dumka Publ., 1985, 292 p.
5. **Kalinichenko A. S., Shejnert V. A., Kalinichenko V. A., Sluckij A. G.** Osobennosti izgotovlenija kompozicionnogo materiala s makroheterogennoj strukturoj s primeneniem magnitnyh polej [Features of manufacturing a composite material with macroheterogeneous structure using magnetic fields]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 1, pp. 124–127.