

## **ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

**А. А. АНДРУШЕВИЧ**, канд. техн. наук

Белорусский государственный аграрно-технический университет

**В. А. КАЛИНИЧЕНКО**, канд. техн. наук

Белорусский национальный технический университет

*В статье приведены сведения о получении металлических композиционных материалов с использованием высокоэнергетических технологий, основанных на лазерной и индукционной наплавке. Рассмотрены особенности получения структурных составляющих подобных материалов и ожидаемые свойства применительно к деталям сельскохозяйственной техники.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, кремнистые бронзы, лазерная наплавка, индукционная наплавка, свойства, синтез, металлографический анализ.

## **HIGH-ENERGY TECHNOLOGIES FOR PRODUCING COMPOSITE MATERIALS FOR AGRICULTURAL MACHINERY PARTS**

**A. A. ANDRUSHEVICH**, Ph. D. in Technical Sciences

Belarusian State Agrarian-Technical University

**V. A. KALINICHENKO**, Ph. D. in Technical Sciences

Belarusian National Technical University

*The article provides information on the production of metal composite materials using high-energy technologies based on laser and induction surfacing. The features of obtaining the structural components of such materials and the expected properties in relation to parts of agricultural machinery are considered.*

**Keywords:** composite materials, silicon bronzes, laser surfacing, induction surfacing, properties, synthesis, metallographic analysis.

**Введение.** Сельскохозяйственная техника работает в сложных условиях, связанных с запыленностью, знакопеременными нагруз-

ками при работе на бездорожье и большими объемами работы, а также климатическими условиями местности. От стабильного функционирования техники зависят сроки уборки урожая и ее качество. По статистике расходы на ее ремонт составляют 15–20 % от стоимости сельскохозяйственных машин. Основные проблемы, возникающие при эксплуатации сельхозтехники, включают налипание на подвижные узлы грязи и пыли, что ведет к их абразивному износу; различные виды атмосферных осадков, вызывающие коррозию деталей; вибрацию и ударные нагрузки, которые становятся причиной преждевременного износа. Для борьбы с вышеуказанными эффектами авторами был предложен новый тип композиционных материалов (КМ), полученных на основе сплавов системы «железо – углерод» и кремнистых бронз.

Композиционные материалы применяются в различных отраслях промышленного производства, в т. ч. сельскохозяйственном машиностроении [1–4]. Изучением вопросов эффективного использования КМ в технике активно занимались ряд ученых в различных странах – П. А. Витязь (Беларусь), С. С. Затуловский и Л. И. Тучинский (Украина), В. А. Васильев (Россия) и многие другие.

Большое распространение получило изготовление деталей ответственного назначения из КМ различными методами литья, но они требуют специальной формообразующей оснастки и плавильного оборудования [3; 4]. Стоимость такой оснастки, изготавливаемой с использованием традиционных технологий, в несколько раз превышает стоимость создаваемых изделий, а ее изготовление трудоемко.

В связи с этим представляется актуальным и возможным применение высокоэнергетических технологий – индукционного и лазерного нагрева для синтеза изделий конкретного назначения из композиционных материалов, в частности, на основе меди, взамен энергозатратных технологий литья. Для решения выше указанных вопросов был предложен новый тип композиционных материалов, полученных на основе кремнистых бронз и сплавов системы «железо – углерод».

**Основная часть.** Объектом исследований являлась технология получения макрогетерогенного КМ из железоуглеродистых сплавов. Аналогом являлся технологический процесс изготовления композиционного материала литьем в кокиль, на основе бронзы

БрКМц3-1, армированного гранулами карбида кремния фракции 100–300 мкм с шагом расположения гранул 1,5–3,0 мм.

В качестве метода получения сложноармированных композиционных материалов использована предварительная лазерная наплавка железоникелевых валиков порошком ПГ-12-01 на стальную подложку (рисунок 1, *а*), с последующим нанесением покрытий на основе цветных сплавов, армированных микро- и макрочастицами карбидов (рисунок 1, *б*). Наплавка сетки проводилась с помощью  $\text{CO}_2$  лазера, с шагом 5×5 мм на образец размерами 100×100 мм, при скорости сканирования 100 мм/мин.

На первом этапе проведена лазерная наплавка, которая сопровождается оплавлением валиков из железоникелевого сплава, что обеспечивает более прочное их соединение с упрочняемой поверхностью стальной детали и повышает их твердость (рисунок 1, *а*). Лазерную наплавку производили на технологическом комплексе на базе  $\text{CO}_2$ -лазера непрерывного действия типа «Комета» мощностью 1,0 кВт и координатного стола с системы ЧПУ «РУХ-5,0».

Далее проведена очистка образца в растворе ингибиторов с последующим его покрытием специально разработанными флюсовыми составами на основе производных борной кислоты (рисунок 1, *б*), с последующей кратковременной выдержкой (1–3 мин) в термической печи или сушильном шкафу при температуре около 350 °С.

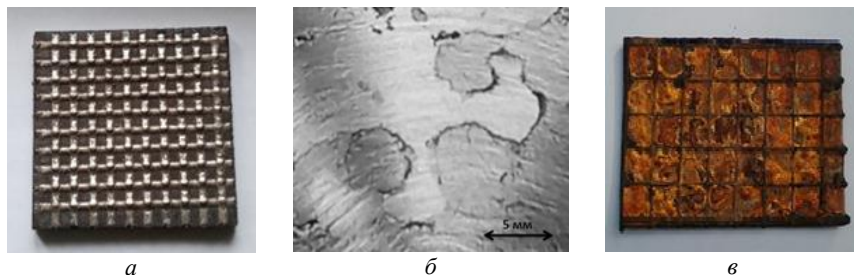


Рисунок 1 – Этапы создания композиционной слоистой структуры:  
*а* – образец с предварительно нанесенной сеткой; *б* – образец с «окошками»,  
заполненными микрочастицами; *в* – образец после индукционной наплавки,  
перед механической обработкой

На втором этапе проведен индукционный нагрев подготовленных образцов до температуры 1050 °С с оплавлением бронзового порошка для обеспечения образования монолитного сплавления композиционного покрытия с основой детали и с предварительно нанесенными валиками. Толщина валиков была выбрана в пределах 0,5–1,5 мм из условия обеспечения возможного износа изделия и припуска на механическую обработку (рисунок 1, в). Выдержка наносимого по предлагаемой технологии покрытия при индукционном нагреве необходима для обеспечения полного протекания процесса спекания порошка и диффузионного соединения основы изделия с материалом валика (рисунок 1, в). Для этого углубления были заполнены бронзовым порошком необходимых марок в зависимости от способа эксплуатации изделия. Затем проводилось его оплавление при индукционном нагреве с применением инверторной установки ИМ 30-8-50 и выдержке при температуре нагрева около 1100 °С в расплавленном состоянии. Длительность выдержки (5–6 мин) выбиралась для полного протекания реакции в графитовом тигле, использованном в качестве стабилизатора, с последующим охлаждением на воздухе.

В результате получали слоистый композиционный материал толщиной около 600–700 мкм. Получение композиционного покрытия (с предварительно нанесенной сеткой, состоящей из валиков) без индукционного нагрева приводит к формированию неравномерной структуры с распределенными порами. Нанесение валиков вдоль и поперек рабочей поверхности с последующим индукционным оплавлением порошка бронзы, предварительно помещенного в образованные стенками валиков углубления, позволяет повысить качество покрытия за счет лучшего сцепления с основой образца. Нанесение валиков с небольшим шагом не позволяет избежать пористости из-за некачественного заполнения углубления порошком бронзы вследствие низкой текучести и технически трудноосуществимо. Использование шага валиков больше заявленных значений существенно не повышает механические свойства композиционного покрытия по сравнению со свойствами покрытия, полученных традиционными способами.

**Результаты исследований.** По результатам электронно-микроскопических исследований выявлена высокая адгезия сетки,

полученной методом лазерной наплавки, и бронзовой матрицы (рисунок 2, *a*). За исключением несущей основы в поверхностном слое основную нагрузку несет матрица, ввиду ее превалирующего количества в сравнении с армирующей составляющей. Проведен металлографический и химический анализ матрицы, расположенной на ранее выбранной подложке (рисунок 2, *a*). Как видно из представленного рисунка, матрица имеет хорошую зону контакта с материалом основы, однако, при нанесении покрытий (в рассматриваемом случае бронза БрКМц3-1), им свойственна высокая газонасыщаемость, что может оказать негативное влияние на свойства получаемых композиционных покрытий.

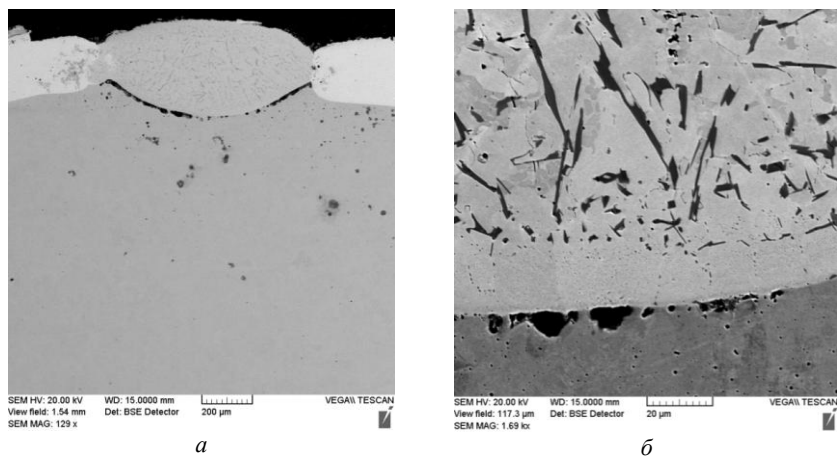


Рисунок 2 – Электронная микроскопия композиционного покрытия:

- a* – зона контакта лазерная наплавка – бронза;
- б* – зона контакта бронза – износостойкая подложка

При создании КМ представляется важным распределение элементов по сечению образца. Эксперименты были проведены по ключевым точкам композиционного покрытия (рисунок 3, *a*). Линия для картирования была выбрана от матрицы до подложки, с целью определения их связи друг с другом (рисунок 3, *a*).

Проведен химический анализ композиционного материала по выбранной зоне, который показан на рисунке 3, *б*. Результаты расшифровки диаграммы, представленной на рисунке 3, *б*, приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно распределение и химический состав нанесенного композиционного материала после индукционной наплавки. Данные значения весьма сильно отличаются от исходных значений, что возможно объясняется выгоранием одних элементов и диффузией других материалов из материала подложки.

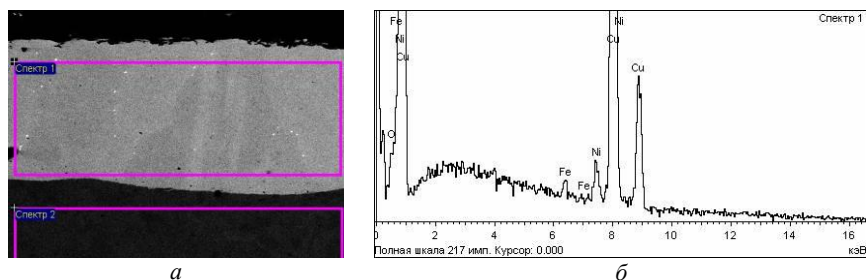


Рисунок 3 – Зона контакта матрица – материал подложки:  
*а* – общий вид образца КМ; *б* – распределение основных элементов в исследуемой зоне

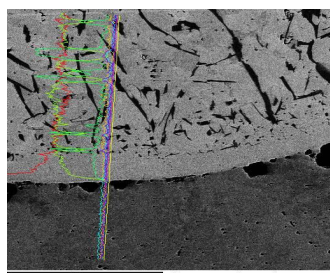
Таблица 1 – Анализ элементов в исследуемой зоне композиционного материала

Спектр	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Итого
Спектр 1, %	0,70	–	–	–	0,63	2,36	96,31	100,00
Спектр 2, %	–	0,16	0,13	0,36	99,04		0,31	100,00
Макс., %	0,70	0,16	0,13	0,36	99,04	2,36	96,31	
Мин., %	0,70	0,16	0,13	0,36	0,63	2,36	0,31	

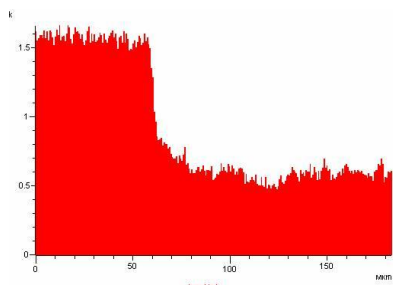
Наибольший интерес представляет распределение элементов по сечению полученного образца. Эксперименты были проведены по ключевым точкам композиции (рисунок 4, *а*). Первая линия для картирования была выбрана от матрицы до подложки, с целью определения их связи друг с другом (рисунок 4, *а*).

Для второй линии картирования (рисунок 5, *а*) была выбрана зона контакта между матрицей на подложке и армирующей составляющей (в нашем случае валиками, полученными лазерной наплавкой). Исследовались как элементы, составляющие основу используемых сплавов, так и негативные элементы, примеси (например, кис-

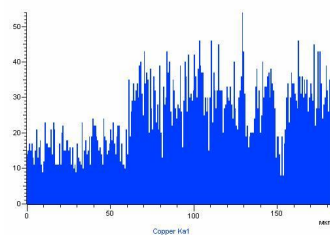
лород, равномерно распределенный в объеме исследуемого образца). Практически наблюдаются аналогичные изображения с образцами с выдержкой 8 мин (рисунок 6) и 12 мин (рисунок 7).



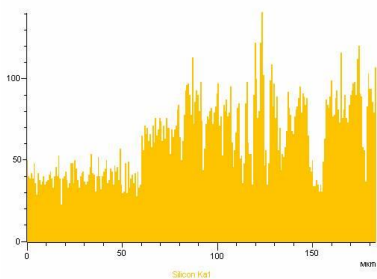
*a*



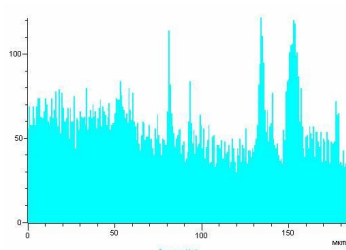
*б*



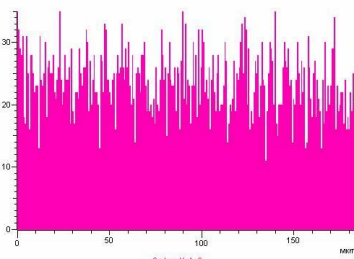
*в*



*з*

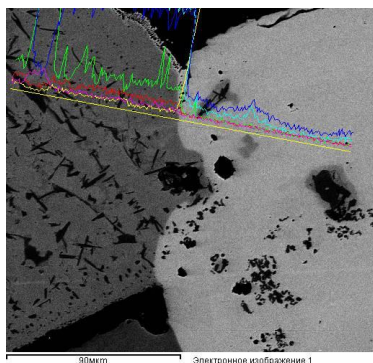


*д*

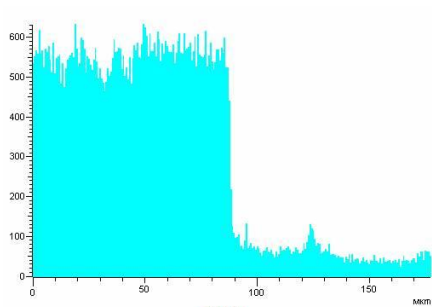


*е*

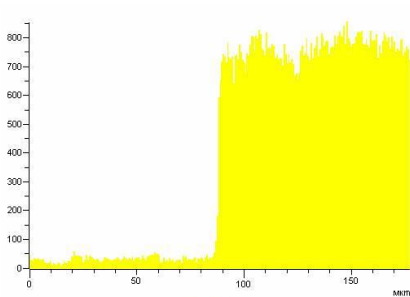
Рисунок 4 – Линия картирования матрица – подложка:  
*a* – исследуемая зона контакта; *б* – железо; *в* – медь; *з* – кремний;  
*д* – кислород; *е* – углерод



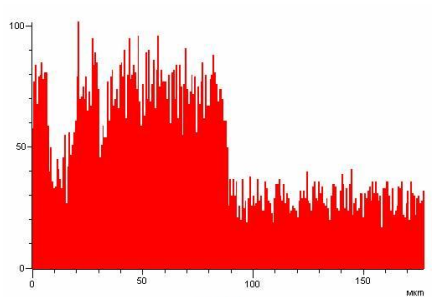
*a*



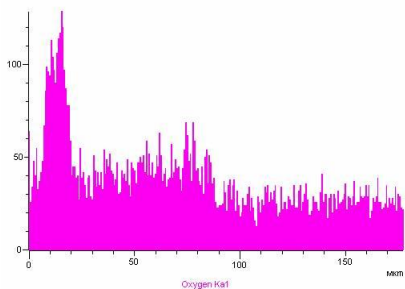
*б*



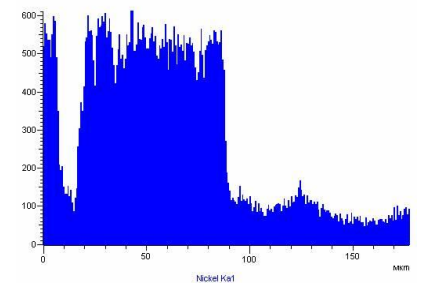
*в*



*г*



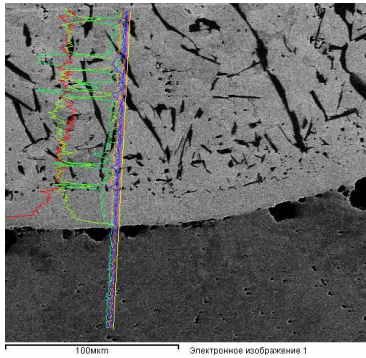
*д*



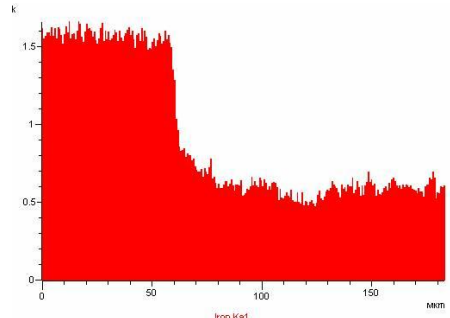
*е*

Рисунок 5 – Линия картирования матрица – лазерная наплавка:  
*a* – исследуемая зона контакта; *б* – железо; *в* – кислород; *г* – углерод;  
*д* – магний; *е* – никель

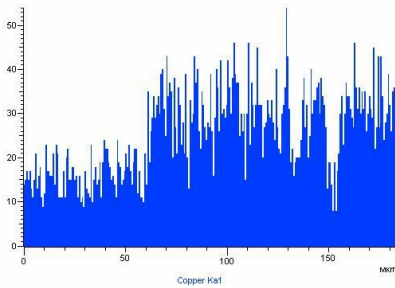




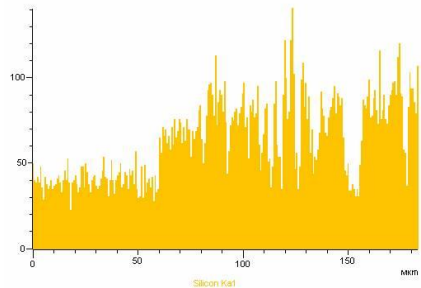
*a*



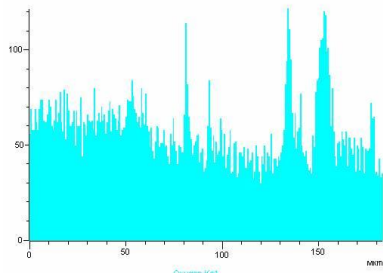
*б*



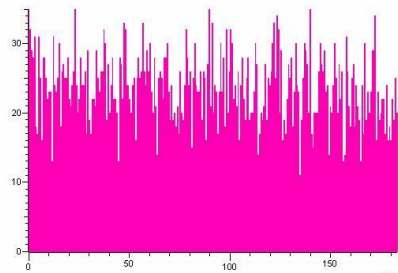
*в*



*г*



*д*



*е*

Рисунок 6 – Линия картирования матрица – подложка:  
*a* – исследуемая зона контакта; *б* – железо ; *в* – медь; *г* – кремний;  
*д* – кислород; *е* – углерод

Из полученных данных видно, что независимо от выбранной линии картирования основное количество исходных элементов остается неизменным, однако наблюдаются диффузионные процессы между материалами, что, безусловно, влияет на повышение качества получаемой композиции за счет обеспечения лучшей спайваемости.

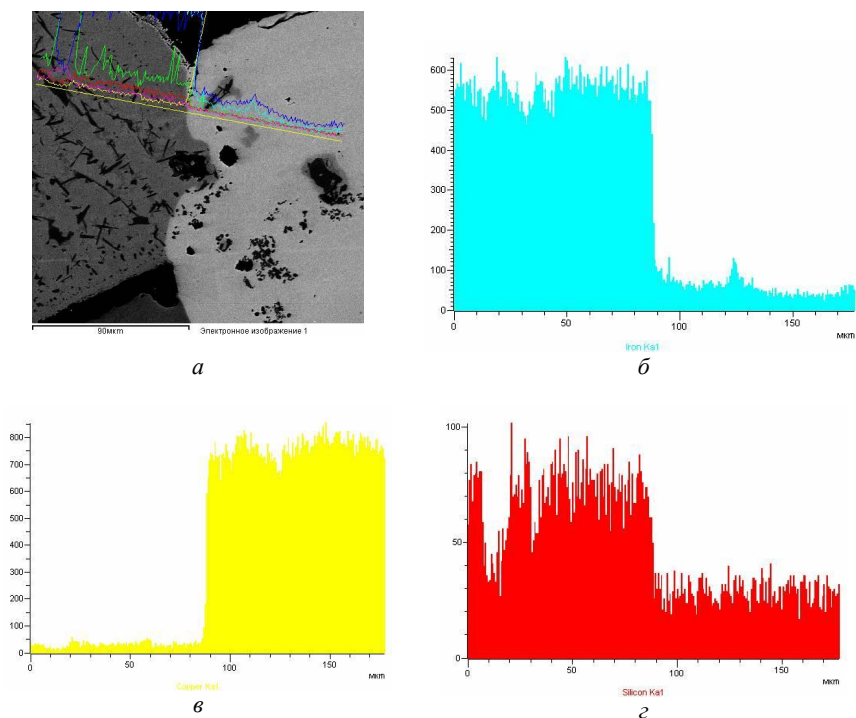


Рисунок 7 – Линия картирования матрица – лазерная наплавка:  
*a* – исследуемая зона контакта; *б* – железо; *в* – медь; *г* – кремний

Для оценки механических свойств получаемых композиционных материалов было принято решение об изучении их микротвердости. Испытания проводились на базе НТП БНТУ «Политехник» с использованием микротвердомера AFFRIMVDM8 (Италия) с нагрузкой на индентор 0,2 кг и временем выдержки 15 с. Как показали исследования, композиционные покрытия с размером упрочняющих

фаз менее 100 мкм, нанесенные индукционной наплавкой, имели равномерную структуру и микротвердость.

При увеличении размера частиц до 200–500 мкм произошло значительное повышение показателей микротвердости. Переходная зона, полученная лазерной наплавкой, обладает твердостью порядка 270 единиц по Виккерсу. Далее следует более мягкий слой, образованный упрочненной бронзой. В зоне, близкой к переходной, твердость варьируется в пределах 220–230 единиц по Виккерсу. По мере удаления от нее микротвердость снижается до 200 единиц, что все равно превышает твердость образцов, упрочненных микрочастицами.

Разработанные материалы могут быть использованы в подшипниках скольжения ступиц машин для внесения жидких органических удобрений, например, МЖТ-Ф-11. Машины выпускаются в ОАО «УКХ«Бобруйскагромаш». Техника предназначена для самозагрузки, транспортирования, перемешивания и поверхностного распределения жидких органических удобрений, а также для перевозки технической воды и мойки машин, при пожаротушении, мойки дорог и т. д. В настоящее время подшипники машины изготавливают из бронзы БрАЖ9 методом точения из круга. Замена на предлагаемую технологию позволяет уменьшить количество операций механической обработки и обеспечить экономию ресурсов при повышении износостойкости в 1,3–1,5 раза.

**Выводы.** В настоящее время происходит интенсивная разработка и внедрение новых технологий изготовления деталей сельхозтехники из композиционных материалов. Одним из перспективных методов, обеспечивающих экономию энергетических, материальных и трудовых ресурсов, является высокоэнергетическое упрочняющее воздействие на рабочие поверхности, обеспечивающее получение композиционных покрытий на быстро изнашиваемых деталях и узлах.

В результате экспериментов установлено, что нанесение технологических валиков в виде сетки на рабочую поверхность изделия с последующим индукционным оплавлением порошка бронзы, предварительно помещенного в образованные углубления стенками валиков, позволяет повысить качество композиционного покрытия за счет повышения механических свойств, более равномерного распределения порошка и лучшего его сцепления с основой образца.

Установлено, что предлагаемый метод позволяет повысить механические свойства композиционных покрытий при минимальном расходе порошка бронзы и создать гамму различных типов композиционных материалов для работы подшипников скольжения с необходимыми угловыми скоростями и степенью нагружения с помощью варьирования частотой армирующей сетки и ее заполнения.

### Список литературы

**1. Особенности** получения медночугунных композитов с использованием литейных технологий / А. С. Калиниченко [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2017. – Вып. 38. – С. 101–105.

**2. Бабкин, В. Г.** Литые металломатричные композиционные материалы электротехнического назначения / В. Г. Бабкин, Н. А. Терентьев, А. И. Перфильева // *Journal of Siberian Federal University. Engineering&Technologies.* – 2014. – Vol. 4, No 7. – P. 416–423.

**3. Макрогетерогенные** композиты, армированные гранулами. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://metal-archive.ru/litye-materialy/103-makrogeterogennye-kompozity-armirovannye-granulamami.html>. – Дата доступа: 16.01.2018.

**4. Андрушевич, А. А.** Литейная технология изготовления деталей сельскохозяйственной техники из композиционных материалов / А. А. Андрушевич, В. А. Калиниченко // *Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: материалы междунар. науч.-техн. конф.* – Минск, 2018. – С. 225–228.

**5. Возможности** формирования композиционных покрытий армированием газотермических покрытий лазерной наплавкой / О. Г. Девойно [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. науч. тр.* – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2017. – Кн. 2. – С. 282.

### References

**1. *Osobennosti poluchenija mednochugunnyh kompozitov s ispol'zovaniem litejnyh tehnologij*** [Features of producing copper-cast-iron composites using foundry technologies] / A. S. Kalinichenko [et al.] //

*Metallurgiya: Respublikanskiy mezhvedomstvennyy sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: Publ., 2017. – Vol. 38. – P. 101–105.

**2. Babkin, V. G.** *Litye metallomatrichniye kompozicionnyye materialy jelektrotehnicheskogo naznachenija* [Cast metal matrix composite materials for electrical purposes] / V. G. Babkin, N. A. Terentyev, A. I. Perfil'yeva // *Journal of Siberian Federal University. Engineering&Technologies.* – 2014. – Vol. 4, No. 7. – P. 416–423.

**3.** <http://metal-archive.ru/litye-materialy/103-makrogeterogennye-kompozity-armirovannyye-granulami.html>.

**4. Andrushevich, A. A.** *Litejnaja tehnologija izgotovlenija detalej sel'skohozjajstvennoj tehniki iz kompozicionnyh materialov* [Foundry technology for manufacturing parts of agricultural machinery from composite materials] / A. A. Andrushevich, V. A. Kalinichenko // *Materialy mezhdunar. nauch.-tehn. konf. "Sovremennyye problemy osvoeniya novoj tehniki, tehnologij, organizacii tekhnicheskogo servisa v APK"* [Modern problems of mastering new equipment, technologies, organizing technical services in the agro-industrial complex]. – Minsk, 2018. – P. 225–228.

**5. Vozmozhnosti formirovaniya kompozicionnyh pokrytij armirovaniem gazotermicheskikh pokrytij lazernoj naplavkoj** [Possibilities of forming composite coatings by reinforcing gas-thermal coatings with laser cladding] / O. G. Devoino [et al.] // *Sovremennyye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sbornik nauchnyh trudov = Modern methods and technologies for creating and processing materials: Collection of scientific papers.* – Minsk: FTI NAN Belarusi Publ., 2017. – Book 2. – P. 282.

*Поступила 26.10.2023*

*Received 26.10.2023*