

7. Тарасова, Т. В. Аддитивное производство : учеб. пособие / Т. В. Тарасова. – М. : Станкин, 2019. – 196 с.

8. Ильющенко, А. Ф. Аддитивные технологии и порошковая металлургия / А. Ф. Ильющенко. – Минск : Медисонт, 2019. – 260 с.

9. Голоднов, А. И. Технологии и оборудование аддитивного производства : учеб. пособие / А. И. Голоднов, С. Н. Злыгостев, И. Е. Фурман // М-во науки и высш. образования РФ. – Екатеринбург : Изд-во урал. ун-та, 2022. – 128 с.

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОЙ И ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ СИНТЕЗА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. Андрушевич¹, В. А. Калиниченко²

*¹Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск, Беларусь*

*²Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь*

В докладе приведены сведения о получении металлических композиционных материалов с использованием аддитивных технологий, основанных на лазерной и индукционной наплавке. Рассмотрены особенности получения структурных составляющих материалов данного типа и ожидаемые свойства.

Введение. Аддитивные технологии (АТ) уже нашли большее применение в механообработке и машиностроении, прежде всего, для создания деталей сложной конфигурации. Большинство деталей машин, а также технологической оснастки являются металлическими, поэтому особый интерес представляют такие АТ, которые позволяют напрямую создавать детали из различных металлов. К ним относятся различные виды технологий, основанных на термической обработке металлического порошка или проволоки [1]. Среди них наиболее распространены технологии, в которых нагрев осуществляется лазерным (SLS, SLM, LMD, LENS) или электронным (EBM, EBF) лучом. Создание изделий происходит путем добавления материала, в отличие от технологий, основанных на удалении его излишков, например,

механообработки [2, 3]. Прямое выращивание изделий послойным синтезом возможно в различных агрегатных состояниях и высокоэнергетических процессах с объемной, локализованной и фокусированной зоной поглощения в зависимости от мощности потоков энергии.

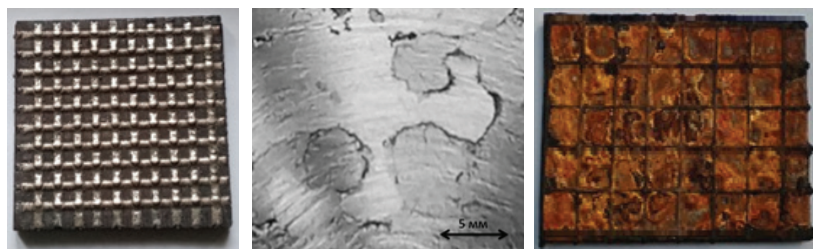
Композиционные материалы (КМ) применяются в различных отраслях промышленного производства [4–6]. Широкое распространение получило изготовление деталей ответственного назначения из КМ различными методами литья, но они требуют специальной формообразующей оснастки [6, 7]. Стоимость такой оснастки, изготавливаемой с использованием традиционных технологий, в несколько раз превышает стоимость создаваемых изделий, а ее изготовление трудоемко.

В связи с этим представляется актуальным и возможным применение аддитивных технологий для синтеза изделий конкретного назначения из композиционных материалов, в частности, на основе меди взамен энергозатратных технологий литья.

Объектом исследований являлся макрогетерогенный КМ на основе бронзы БрКМц3-1, армированный гранулами карбида кремния фракции 100–300 мкм. Аналогом являлся литой композиционный материал, того же состава с шагом расположения гранул 1,5–3,0 мм, полученный литьем в кокиль.

В качестве способа получения композиционных материалов предложено использование предварительной лазерной наплавки никелевых валиков порошком ПГ-12-01 на стальную подложку (рис. 1, *a*), с последующим нанесением покрытий на основе цветных сплавов, армированных микрочастицами и макрочастицами карбидов (рис 1, *б*). Наплавка сетки проводилась с помощью CO₂ лазера, с шагом 5×5 мм на образец размерами 100×100 мм, при шаге и скорости сканирования соответственно: 200×050 пикселей и $v = 100$ мм/мин.

На первом этапе была проведена лазерная наплавка, которая сопровождается оплавлением валиков из железоникелевого сплава, что обеспечивает более прочное их соединение с упрочняемой поверхностью детали и повышает их твердость (рис. 1, *a*). Для этого на образцы из железоуглеродистого сплава



a

б

в

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

методом лазерной наплавки наносили валики из порошка железоникелевого сплава. Лазерную наплавку производили на технологическом комплексе на базе CO_2 – лазера непрерывного действия типа «Комета» мощностью 1,0 кВт и координатного стола с системы ЧПУ «РУХ-5,0».

На втором этапе проведена очистка образца в растворе ингибиторов с последующей его зафлюсовкой, специально разработанными флюсовыми составами на основе производных борной кислоты (рис. 1, *б*), с последующей кратковременной выдержкой в термической печи или сушильном шкафу при температуре около 350 °С.

Далее был 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 (рис. 1, *в*). Выдержка наносимого по предлагаемой технологии покрытия при индукционном нагреве была необходима для обеспечения полного протекания процесса спекания порошка и диффузионного соединения основы изделия с материалом валика (рис. 1, *в*). Для этого углубления были заполнены бронзовым порошком необхо-

димых марок в зависимости от способа эксплуатации изделия. Далее проводилось его оплавление с помощью индукционного нагрева с применением инверторной установки ИМ 30-8-50 и выдержкой при температуре нагрева около 1100 °С в расплавленном состоянии в течение времени, необходимого для полного протекания реакции в графитовом тигле, использованном в качестве стабилизатора, с последующим охлаждением на воздухе.

В результате был получен 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, полученного известным способом [8].

По результатам электронно-микроскопических исследований была выявлена высокая адгезия сетки, полученной методом лазерной наплавки, и бронзовой матрицы (рис. 2, *a*).

За исключением несущей основы в поверхностном слое, основную нагрузку несет матрица, в виду ее превалирующего количества в сравнении с армирующей составляющей. Проведен металлографический и химический анализ матрицы, расположенной на ранее выбранной подложке (рис. 2, *a*). Как видно из представленного рис. 2, 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.

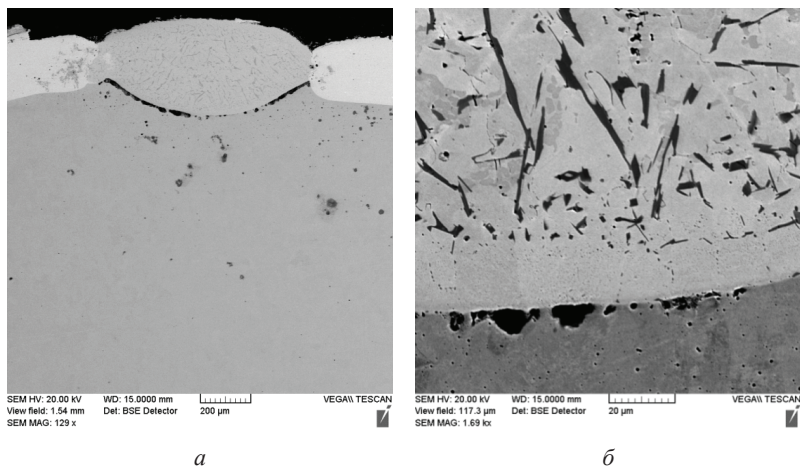


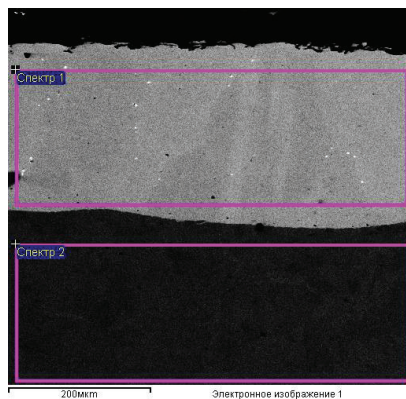
Рис. 2. Электронная микроскопия композиционного покрытия:
а – зона контакта лазерная наплавка – бронза; *б* – зона контакта бронза –
 износостойкая подложка

Проведен химический анализ композиционного материала по выбранной зоне, представленный на рис. 3, *б*. Результаты расшифровки диаграммы, представленной на рис. 3, *б*, приведены в таблице.

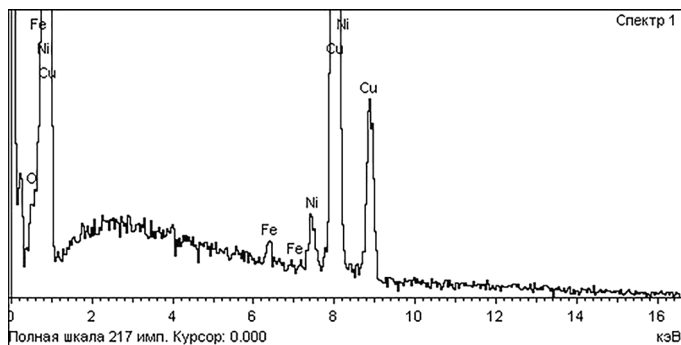
В таблице показано распределение и химический состав нанесенного композиционного материала после индукционной наплавки. Данные значения весьма сильно отличаются от исходных значений, что возможно объясняется выгоранием одних элементов и диффузией других материалов из материала подложки.

**Анализ элементов в исследуемой зоне
 нанесенного 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	



a



б

Рис. 3. Зона контакта матрица – материал подложки: *a* – общий вид; *б* – распределение основных элементов в исследуемой зоне матричного сплава

Наибольший интерес при создании КМ представляет распределение элементов по сечению образца. Эксперименты были проведены по ключевым точкам КМ (рис. 3, *a*). Первая линия для картирования была выбрана от матрицы до подложки, с целью определения их связи друг с другом (рис. 3, *a*).

Для оценки свойств получаемых композиционных материалов было принято решение об изучении их микротвердости. Испытания проводились на базе НТП БНТУ «Политехник» с использованием микротвердомера AFFRI MVDM8 (Италия)



a

б

Рис. 4. Результаты измерения микротвердости:

a – вид отпечатка алмазного индентора на нанесенном покрытии;

б – показания микротвердость на дисплее микротвердомера

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 (рис. 4, *a*) 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 твердость падает до 200 единиц, что все равно превосходит образцы, упрочненные микрочастицами.

В результате экспериментов было 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 покрытия за счет повышения механических свойств, более равномерного распределения порошка и лучшего его сцепления с основной образцы. Нанесение валиков с небольшим шагом не позволяет избежать пористости из-за неравномерного и неплотного заполнения углубления порошком бронзы и технически трудно

осуществимо. Использование шага валиков больше заявленных значений существенно не повышает механические свойства композиционного покрытия по сравнению со свойствами покрытия, полученного известным способом [8].

Установлено, что предлагаемый способ позволяет повысить механические свойства композиционного покрытия 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 использованных источников

1. Применение технологии экструзионной 3D-печати в литейном производстве / Н. К. Толочко [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2018. – № 4. – С. 139–144.

2. Чижик, С. А. Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий / С. А. Чижик, М. Л. Хейфец, С. А. Филатов // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2014. – № 4. – С. 68–74.

3. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутылина. – СПб., 2013. – 221 с.

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

5. 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, № 7. – P. 416–423.

6. Макрогетерогенные композиты, армированные гранулами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://metal-archive.ru/litye-materialy/103-makrogeterogennyye-kompozity-armirovannyye-granulam.html>. – Дата доступа: 16.01.2018.

7. 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 науч.-практ. конф.*, Минск, 7–8 июня 2018 г. – Минск, 2018. – С. 225–228.

8. 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. : в 3 кн.* – Кн. 2. – 282 с.