

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ В ОБЛАСТИ СВАРКИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, РАЗВИВАЕМЫЕ В ГНПО ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

А. Ф. ИЛЬЮЩЕНКО, Е. Д. МАНОЙЛО, С. И. ЛОВЫГИН, А. И. ЛЕЦКО, А. А. РАДЧЕНКО

ГНУ «Институт порошковой металлургии».

220005, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Платонова, 41. E-mail: alexil@mail.belpak.by

В работе представлены перспективные направления и полученные результаты в области сварки и родственных технологий, развиваемые в Беларуси в ГНПО порошковой металлургии, в том числе: сварка трением с перемешиванием, аддитивные технологии, газопламенное напыление порошковых материалов и нанесение электроискровых покрытий. Комплексное развитие работ в области аддитивных технологий достигается применением оборудования, которое обеспечивает 3D-печать полимерами и металлами, производство металлических порошков и операции доуплотнения. Наряду с проведением исследований на данном оборудовании осуществляется выпуск продукции. Для проведения экспериментальных исследований и практического применения сварки трением с перемешиванием создана установка с системой регистрации параметров режимов сварки. При проведении исследований и разработке технологических процессов и конструкций инструмента используются программы компьютерного моделирования (Deform, Sysweld, Ansys и др.). На опытном производстве осуществляется выпуск инструмента, в том числе методами порошковой металлургии и аддитивных технологий. Получены новые научные и практические результаты по разработке процессов и оборудования газопламенного нанесения покрытий из порошковых материалов на детали различного функционального назначения с использованием струй высокой мощности (до 125 кВт). Проведены исследования и создано оборудования для формирования толстослойных (до 5000...7000 мкм) электроискровых покрытий с применением вибрации электрода-анода частотой 22 кГц. Библиогр. 18, рис. 8.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, аддитивные технологии, газопламенное напыление, компьютерное моделирование, производство инструментов, оборудование для электрошлакового нанесения покрытий

Направление исследований по изучению высокоэнергетических процессов обработки поверхностей и формированию порошковых покрытий развивается в ГНПО порошковой металлургии НАН Беларуси (ГНПО ПМ) в последние 20 лет [1–3]. Были выполнены поисковые работы по изучению влияния импульсно-периодического лазерного воздействия на частицы металлических порошков, а также на эти частицы и металлическую поверхность, на которой они находились [4]. Результатом исследований стало создание (2005 г.) совместно с Институтом физики НАН Беларуси перспективного образца установки порошковой лазерной стереолитографии [4, 5], которую можно считать [5, 6] аналогом современного металлургического 3D-принтера. В основе 3D-печати этого аналога использовалось селективное лазерное, как тогда представлялось, спекание частиц металлических порошков. Созданный аналог металлургического 3D-принтера, характеристики которого приведены ниже, позволил сместить акцент проводимых указанных выше исследований в направлении изучения процессов получения перспективных образцов пористых проницаемых материалов, в первую очередь, медицинского назначения (рис. 1). Результаты этих исследований показали [7, 8], что

существуют такие режимы импульсно-периодического лазерного излучения, при которых, как между частицами металлических порошков, так и между этими частицами и металлической основой в контактных зонах могут образовываться неразъемные соединения. Основным механизмом

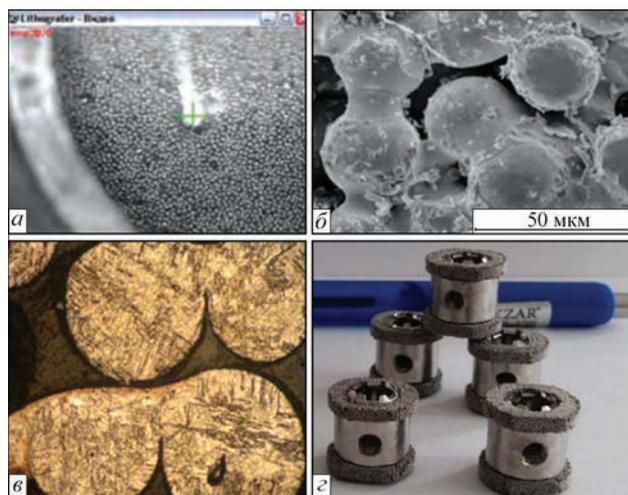


Рис. 1. Наблюдаемый системой контроля аналога 3D-принтера процесс импульсно-периодического лазерного воздействия (а), получаемая структура пористого материала (б) и контакта частиц (в) имплантата межжелудочкового спонделоза (з)

формирования таких соединений является жидкофазное спекание.

Показатели назначения аналога металлургического 3D-принтера

Твердотельный лазер	$P = 150$ Вт; $\lambda = 1064$ нм,
.....система управления и контроля микропроцессорная
Система наложения слоев	Регулируемая,
.....система регулировки микропроцессорная
Рабочая зона печати	$250 \times 250 \times 100$ мм
Минимальная зона построения	$x = 100$ мкм; $y = 100$ мкм; $z = 20$ мкм
Повторяемость	$x = 20$ мкм; $y = 20$ мкм; $z = 20$ мкм
Система загрузки	Ручная
Система сбора и возврата порошка	Ручная
Расходные материалы	Титановые сплавы,
.....сплавы цветных металлов	

Следует отметить, что не только селективное лазерное сплавление, используемое при 3D-печати отдельными типами металлургических 3D-принтеров, можно отнести к разновидности родственных сварке процессов. К ним также можно отнести [6, 9, 10] и такие используемые при 3D-печати процессы, как Fused Deposition Modeling или, как их еще называют «Fused Filament Fabrication», которые основаны на модельном послойном осаждении расплавленной полимерной нити. Вместе с ними к разновидности родственных сварке процессов следует также отнести и процессы Direct Metal Deposition, основанные на прямом послойном осаждении расплавленного под воздействием лазерного излучения или электрического тока металла, а также Electron Beam Melting, основанные на послойном селективном электронно-лучевом проплавлении порошкового слоя.

Аддитивные технологии, появившиеся во второй половине 1980-х гг. в виде быстрого прототипирования с использованием лазерных установок селективной фотополимеризации, к концу первого десятилетия XXI века, наряду с нанoeлектроникой, оптоинформатикой, фотоникой, системами искусственного интеллекта, а также CALS-технологиями, вошли в основу складывающегося шестого технологического уклада, который определяет настоящее и будущее развития науки и промышленности во всем мире [6, 10, 11]. В ГНПО ПМ с 2015 г. проводятся целенаправленные работы по организации собственного аддитивного производства. При этом учитывается не только полученный ранее практический опыт, связанный с разработкой и изготовлением аналога металлургического 3D-принтера, а также получения на нем перспективных, в первую очередь для медицины, пористых проницаемых материалов, но и приобретенный опыт собственного производства металлических порошков со сферической формой частиц с использованием процессов плавки и распыления в газовом потоке металлических расплавов [1, 3]. В настоящее время осно-

ву организуемого в ГНПО ПМ аддитивного производства составляет следующее технологическое оборудование:

- собранный во Франции металлургический 3D-принтер ProX DMP 300 международной компании 3D-Systems (штаб-квартира США), в котором процесс 3D-печати осуществляется послойным селективным лазерным сплавлением металлических порошков;

- изготовленную в Китае вакуумно-индукционную установку JT-QWH-25KG;

- изготовленный компанией Ultimaker B.V. (Нидерланды) 3D-принтер Ultimaker 3 Extended, в котором процесс 3D-печати осуществляется послойным осаждением расплавленной полимерной нити;

- изготовленный компанией GOM (Германия) 3D-сканер ATOS Triple Scan 16M.

Характеристики указанного технологического оборудования приведены ниже.

Показатели назначения 3D-принтера ProX DMP 300

Оптоволоконный лазер	$P = 500$ Вт; $\lambda = 1070$ нм,
.....система управления и контроля микропроцессорная
Система наложения слоев	Регулируемая,
.....система регулировки микропроцессорная
Рабочая зона печати	$250 \times 250 \times 300$ мм
Минимальная зона построения	$x = 100$ мкм; $y = 100$ мкм; $z = 20$ мкм
Повторяемость	$x = 20$ мкм; $y = 20$ мкм; $z = 20$ мкм
Система загрузки	Автоматическая,
.....пневмомеханическая с микропроцессорной системой контроля
Система сбора и возврата порошка	Автоматическая,
.....пневмомеханическая с микропроцессорной системой контроля
Расходные материалы	Нержавеющая сталь,
.....инструментальная сталь, сплавы цветных металлов,	
..... жаропрочные сплавы, оксиды алюминия и титана,	
.....металлокерамика	

Показатели назначения вакуумно-индукционной установки JT-QWH-25KG

Максимальный объем загрузки, кг	25 (для стали)
Мощность индукционного среднечастотного нагревателя, кВт	100 (на частоте 4 кГц)
Максимальная температура, °С:	
в раздаточном тигле	≤ 2200
в плавильном тигле	≤ 1850
Рабочее давление вакуума, Па	$\leq 0,66$
Максимальное давление в распылительной камере, МПа	6
Используемые газы для распыления	Ar, N ₂

Показатели назначения 3D-принтера Ultimaker 3 Extended

Технология печати	Fused deposition modeling (FDM)
Количество экструдеров	2
Рабочая зона печати	$215 \times 215 \times 315$ мм (для одного экструдера)
.....	$197 \times 215 \times 315$ (для двух экструдеров)
Расходные материалы	ABS, PLA, PVA, HIPS, BATICON,
.....нейлон, поликарбонат	

Показатели назначения 3D-сканера ATOS Triple Scan 16M

Количество захватываемых за одно сканирование с выделенной зоны точек поверхности до 16 Мп
 Параметры поля сканирования в выделенной зоне:
 320×240×200 мм;
 535×400×320 мм
 Точность сканирования в выделенной зоне для поля сканирования:
 320×240×200 мм не хуже 7 мкм
 535×400×320 мм не хуже 19 мкм

На аддитивном производстве проводятся работы по созданию технологий получения как путем 3D-печати перспективных для машиностроения и медицины образцов изделий (рис. 2, *а, б*) из титановых и жаропрочных металлических сплавов, так и самих порошков (рис. 2, *з*) жаропрочных сплавов. При этом планируется использовать данные порошки в качестве расходного материала не только для металлической 3D-печати, но и для традиционной газопламенной и плазменной наплавки.

Следует отметить, что исследование структуры (рис. 2, *в*) получаемых после 3D-печати на металлургическом 3D-принтере ProX DMP 300 перспективных для машиностроения образцов изделий, позволяет сделать вывод о том, что основным механизмом импульсно-периодического лазерного сплавления является микросварка, при которой может образовываться наплавочная ванна с размерами, превышающими диаметр исходных порошковых частиц в несколько раз.

На аддитивном производстве также проводятся работы по освоению выпуска отечественных медицинских имплантатов (рис. 3, *а, б*) и эндопротезов (рис. 3, *в, з*), наиболее точно учитывающих индивидуальные анатомические особенности пациентов для нужд здравоохранения Беларуси.

На аддитивном производства, кроме перспектив совершенствования создаваемых аддитивных технологий, также планируется создавать и совершенствовать основанные на использовании 3D-сканера технологии, как автоматизированного технического контроля качества по точности изготовления выпускаемых изделий, так и реинжиниринга. При создании и совершенствовании технологий реинжиниринга планируется делать акцент на снижении, в итоге, себестоимости получаемой на аддитивном производстве продукции. В рамках развития этого производства также планируется создавать и совершенствовать технологии быстрого прототипирования и получения с использованием процессов модельного послойного осаждения расплавленной полимерной нити, а также совершенствовать уже имеющиеся в ГНПО ПМ технологии по термической обработке и горячему изостатическому прессованию порошковых материалов, включая технологии по лазерной и

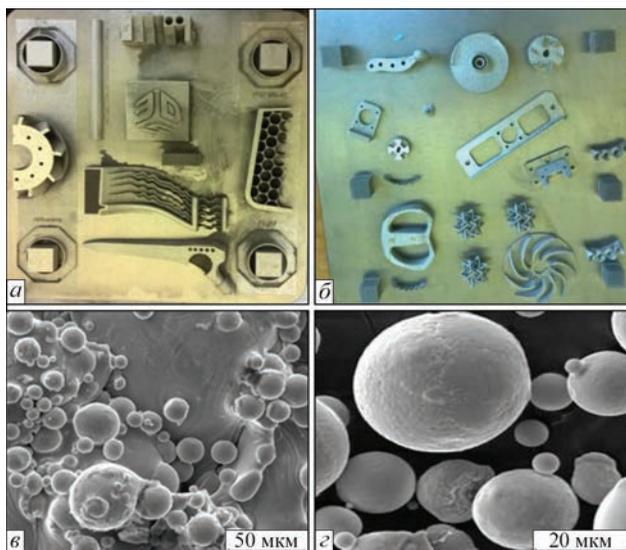


Рис. 2. Тестовые (*а*) и перспективные (*б*) образцы изделий, их структура (*в*) и предлагаемые порошки для 3D-печати (*з*)

электроэрозионной резке. Использование указанных технологии в аддитивном производстве будет способствовать повышению эффективности его функционирования и повышению при этом физико-механических и прочностных свойств выпускаемых изделий.

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений в области сварки в последние десятилетия является сварка трением с перемешиванием (СТП).

С 1991 г., после патентования этого способа сварки трением в твердой фазе (Friction Stir Welding — FSW) Британским институтом сварки (TWI), активно ведутся научные исследования в этой области, создается оборудование и инструмент. Техничко-экономические преимущества процесса позволяют ему активно внедряться в производство, вытесняя традиционные способы сварки плавлением. К основным преимуществам СТП относятся:

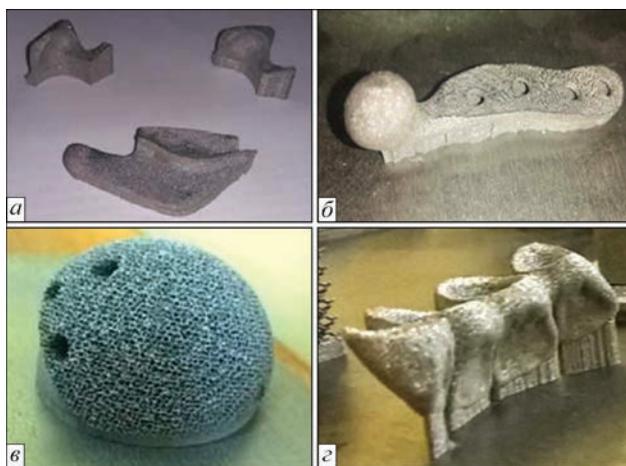


Рис. 3. Образцы отечественных имплантатов в виде: *а* — височно-нижнечелюстного сустава; *б* — нижнечелюстной минипластины; эндопротезов в виде: *в* — чашки тазобедренного сустава; *з* — зубных коронок

– высокие стабильность качества шва, прочность и выносливость сварных соединений (ударная вязкость, временное сопротивление, угол сгиба, циклическая прочность и некоторые другие показатели) при отсутствии короблений и термических деформации без пор, включений и трещин;

– уменьшение производственного цикла на 50...70 % по сравнению с обычными способами сварки, например, дуговой;

– возможность сварки деталей из разнородных материалов, не свариваемые традиционными способами;

– возможность автоматизации и применения активного контроля качества в режиме реального времени (при наличии специальной оснастки и инструмента может выполняться на обычном металлорежущем оборудовании) на универсальных фрезерных станках и станках с ЧПУ, а также с использованием робототехнических систем;

– низкое потребление энергии (2,5 % энергии, потребляемой при лазерной сварке, 10 % энергии, потребляемой при дуговой сварке);

– быстрая окупаемость, обусловленная низким потреблением энергии и отсутствием расходных материалов, необходимости обеспечения санитарных и экологических мероприятий;

– высокая гигиеничность сварки, так как отсутствуют брызги раскаленного металла, выделения вредных веществ (сварочных аэрозолей и газов), нет ультрафиолетового излучения, электромагнитных полей.

К недостаткам процесса следует отнести:

– необходимость больших капитальных затрат на внедрение сложного современного наукоемкого оборудования с максимальной комплексной автоматизацией и роботизацией;

– необходимость специализированной оснастки для базирования и жесткого закрепления деталей перед сваркой, в несколько раз большее, чем при сварке плавлением;

– необходимость применения выводных планок или многократного усложнения конструкции инструмента.

Для успешного применения СТП требуется комплексный подход, включающий проведение исследований, разработку технологии, оборудования, инструмента и их производство. В ГНПО ПМ с 2014 г. проводятся исследования процессов СТП, разрабатывается и производится инструмент. Исследуются и разрабатываются технологические процессы сварки однородных и разнородных сплавов на основе алюминия, железа и меди толщиной от 0,5 до 10 мм, ведутся работы по 3D-наплавке.

Для проведения экспериментальных исследований и практического применения СТП создана лабораторная установка с программируемой автоматической системой управления (ЧПУ) технологическим процессом и системой регистрации параметров режимов сварки.

При проведении исследований и разработке технологических процессов и конструкций инструмента используются программы компьютерного моделирования (Deform, Sysweld, Ansys и др.).

На опытном производстве осуществляется выпуск инструмента методами порошковой металлургии и 3D-печати. Сегодня выпускается инструмент из инструментальных сталей для сварки алюминиевых сплавов толщиной от 0,3 до 10 мм, и из твердых сплавов и WRe для сварки материалов толщиной от 0,8 до 6,0 мм. На рис. 4 представлен выпускаемый инструмент.

Проводятся работы по разработке и организации производства в Республике Беларусь оборудования для СТП. Одно из направлений работ в области сварки и родственных технологий, получившее дальнейшее развитие в научном и практическом плане в ГНПО ПМ — технологии газопламенного нанесения покрытий.

Газопламенное нанесение покрытий из самофлюсующихся сплавов, созданных фирмой «Wall



Рис. 4. Примеры инструмента, выпускаемого методами порошковой металлургии и 3D-печати

Colmonoy Corporation» (США) в 1945 г., до настоящего времени широко применяется при поверхностном упрочнении изделий различного назначения, как правило, небольших габаритных размеров, например, выхлопные клапана, рычаги и толкатели газораспределительного механизма двигателей внутреннего сгорания, детали различных машин. С увеличением габаритных размеров и, соответственно, массы изделий, для нанесения покрытий недостаточно количества тепла, выделяющегося при работе существующих стандартных аппаратов.

С учетом недостатков существующих методов, нами был разработан новый процесс — непрерывного газопламенного нанесения покрытий из самофлюсующихся никелевых сплавов (НГНП) и оборудование для его осуществления. В соответствии с процессом, предварительный подогрев напыляемой поверхности детали до требуемой температуры, нанесение слоя покрытия, нагрев его и поверхности детали до температуры плавления материала покрытия — оплавление, производится без перерывов между операциями, одним газопламенным аппаратом ТЕНА-ГНпм высокой мощности (рис. 5).

Важной особенностью аппарата ТЕНА-ГНпм является обеспечение безопасной работы при нанесении покрытий, что достигнуто благодаря оригинальной системе смешения газов и газовым соплам. В качестве горючего газа используется синтетический газ МАФ по ТУ 38.102.1267-89 (метилацетилен-алленовая фракция), производство которого осуществлено в Республике Беларусь, работы по газопламенному нанесению покрытий производятся при его расходе от 1,0 до 3,5 м³/ч (максимальная тепловая мощность пламени — более 100 кВт). Широкие пределы регулирования мощности аппарата ТЕНА-ГНпм позволяют наносить покрытия на детали различных размеров и массы с производительностью от 1 до 8 кг/ч [12].

Аморфные газопламенные покрытия в настоящее время применяются для восстановления и упрочнения различных деталей: коренных и шатунных шеек коленчатых валов, опорных шеек

распределительных валов, коленчатых и эксцентриковых валов холодильного оборудования, что позволило увеличить ресурс их работы в 1,3...1,6 раза по сравнению с новыми деталями без покрытия. Покрытие чугунных поршневых колец аморфизированным покрытием позволило повысить их износостойкость по сравнению с гальваническим хромом в 1,6...2,5 раза, при этом наблюдается снижение в 1,5...1,6 раза коэффициента трения и снижение в 1,4...2,4 раза износа гильзы [13].

Нами разработан новый процесс газопламенного порошкового напыления и аппарат ТПпм-18, для нанесения покрытий высокого качества из широкой номенклатуры материалов, включая металлические сплавы, оксидные керамики, аморфные материалы, специальные композиты и т. п. Аппарат снабжен новой системой смешения газов и специальными многосопловыми наконечниками, обеспечивающими безопасную работу (без обратных ударов) при высокой мощности (до 100 и более кВт). Важным отличием аппарата ТЕНА-Ппм18 является оснащение его воздушными соплами, образующими камеру сгорания (диаметром около 15 мм, длиной от 25 до 120 мм), а также кольцевым распределителем воздуха, устанавливаемым на воздушное сопло, что позволило сконцентрировать (сжать) вдоль оси двухфазную струю, повысить ее давление и температуру, увеличить длину высокотемпературной зоны струи более, чем в 3 раза, эффективный КПД нагрева порошка и снизить тепловое воздействие на изделие.

Новый процесс был использован для ремонта изношенной рабочей поверхности барабана флексографической печати (диаметр 1250...1600 мм, ширина 250...350 мм) напылением слоя покрытия порошком аморфного сплава БХМ [14]. Дистанция напыления составляла 250 мм, время напыления покрытия толщиной 0,6 мм — 90 мин, расход порошка 11200 г, производительность 7,5 кг/ч.

Режимы работы аппарата

Порошок	БХМ
Размер частиц, мкм	20...40
Расход, г/мин (кг/ч)	100 (7,5)
Давление газов, МПа	
воздух	0,4



Рис. 5. Аппарат ТЕНА-ГНпм

МАФ	0,2
O ₂	0,6
Расход газов, м ³ /ч	
воздух	27,6
МАФ	3,3
O ₂	8,25
Мощность N, кВт	81,36

Эксплуатационные испытания показали, что аморфное покрытие рабочей поверхности барабана порошком БХМ, при трехсменном режиме, в течение двух лет обеспечивает нормальную работу барабана (без следов износа), при высоком качестве печати. Газопламенное напыление покрытия из аморфного материала БХМ было также использовано для упрочнения алюминиевого корпуса двигателя Ванкеля. Для сравнения на рис. 6 представлены процессы напыления аморфного покрытия порошком БХМ аппаратом ТПпм-18 на барабан машины флексографической печати и покрытия WC-12Co аппаратом сверхзвукового напыления Jet Kote фирмы Delogo на вал. Из рис. 6 видно, что при осуществлении обоих процессов струи подобны. Твердость аморфного покрытия нанесенного аппаратом ТЕНА-ТПпм-18 составляет *HRC* 70...74, а покрытия WC-12Co, нанесенного аппаратом Jet Kote, *HRC* 62...68, при этом производительность напыления в первом случае в три раза выше, чем во втором.

Разработана новая технология газопламенного нанесения толстослойных (2...4 мм) покрытий из наноструктурированных ферритовых порошков со специальным комплексом свойств, в частности, обеспечивающим широкодиапазонное микроволновое поглощение, и изготовлено технологическое оборудование для ее осуществления [15]. Сущность предлагаемой технологии заключается в том, что порошкообразный ферромагнитный материал с размерами частиц (-53,0 + 5,0) мкм подают в струю газопламенного аппарата-распылителя ТЕНА-Ппм, движущуюся со скоростью 300...750 м/с, энергией которой переносят и осаждают частицы порошка на закрепленные на оправ-

ке подложки. Расход горючего газа МАФ при работе аппарата составляет 3500 л/ч, а кислорода — 8750 л/ч. Процесс и аппаратура переданы заказчику по контракту.

Экономия энергетических ресурсов и сокращение трудозатрат на производство находятся на первом месте в деятельности каждого машиностроительного или ремонтного предприятия. В этих условиях, для восстановления утраченных в процессе эксплуатации служебных свойств деталей машин и механизмов, улучшения эксплуатационных характеристик, повышения ресурса применяют методы с использованием концентрированных потоков энергии, к числу которых относится электроискровое легирование (ЭИЛ). Метод ЭИЛ позволяет наносить покрытия на обрабатываемую поверхность компактным электродом из любого токопроводящего материала, характеризуется малой энергоемкостью. Сформированные электроискровые покрытия отличаются высокой прочностью сцепления с материалом основы, однако одним из недостатков метода является малая толщина наносимого покрытия (до 300...500 мкм), что ограничивает сферу его применения [16, 17].

В настоящее время проблема увеличения толщины электроискровых покрытий находит свое решение. В ФГБНУ ГОСНИТИ (Россия) были получены толстослойные покрытия повышенной сплошности способом применения чередующихся циклов нанесения грубых покрытий с высокой неровностью профиля поверхности и циклов оплавления для выравнивания профиля поверхности с уменьшением высоты этих неровностей не менее чем на 50 %. При этом оплавление неровностей профиля осуществлялось с использованием электродных материалов с повышенными теплопроводностью и эрозионной стойкостью по отношению к электродному материалу, формирующему покрытие. Формирование толстослойных покрытий осуществлялось на режимах низкочастотного электроискрового легирования с

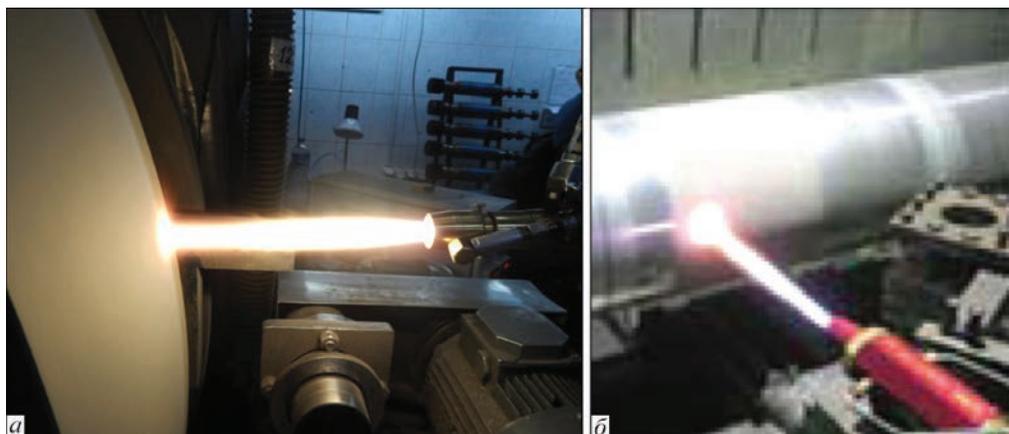


Рис. 6. Процессы напыления: а — аморфного покрытия порошком БХМ аппаратом ТПпм-18; б — покрытия WC-12Co аппаратом Jet Kote фирмы Delogo

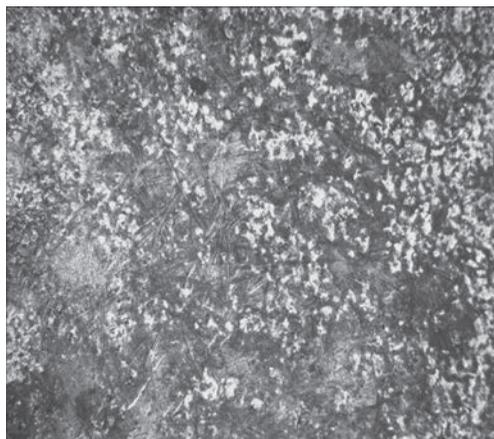


Рис. 7. Покрытие, сформированное при частоте колебаний анода 22 кГц ($\times 20$)

максимальной частотой вибрации легирующего электрода 600 Гц [18].

В ГНПО ПМ был проведен комплекс исследовательских работ с применением экспериментального оборудования для высокочастотного электроискрового легирования с целью определения влияния ультразвукового воздействия на процесс формирования электроискровых покрытий увеличенной толщины и сплошности. По результатам проводимых ранее исследований установлено, что ультразвуковое воздействие частотой 20,4...23,6 кГц, применяемое до начала и по окончании основной электроискровой обработки активно влияет на рост массы и толщины покрытия. Увеличение массы покрытия в первом случае в три раза больше, а втором — в два раза больше, чем в случае, когда дополнительное УЗВ не применялось [19].

Исследования выполняли с использованием установки «Alieg-55» и ультразвукового устройства, разработанного в секторе электрофизических покрытий ОХП ИСЗП, состоящего из генератора, блока питания и ультразвукового пьезопреобразователя.

Для проведения экспериментальных работ были выбраны следующие энергетические режимы установки «Alieg-55»: нанесение покрытий производилось с энергией импульсов 4,3 Дж и частотой их следования 100 Гц; оплавление покрытия производилось комбинированным способом — рабочие импульсы с энергией 10 Дж частотой следования 50 Гц получали от установки «Alieg-55», а частота колебаний электрода-анода частотой 20,4...23,6 кГц задавалась генератором ультразвукового устройства, причем периодическое контактирование «оплавляющего» электрода с нанесенным грубым слоем покрытия, осуществляемое с ультразвуковой частотой 20,4...23,6 кГц, обуславливало высокую дисперсацию выступов грубого слоя покрытия с перемещением диспергированных частиц во впадины рельефа, обеспе-

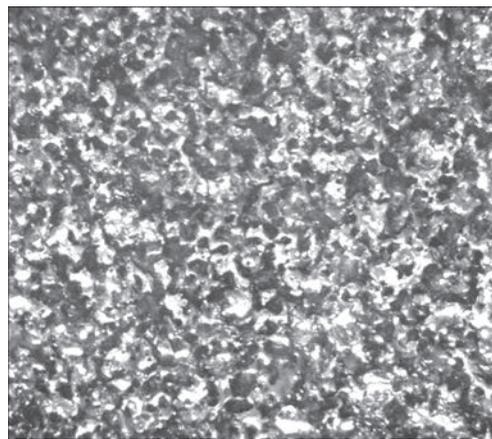


Рис. 8. Покрытие, сформированное при частоте колебаний анода 600 Гц ($\times 20$)

чивая выравнивание покрытия и возрастание его сплошности до 85...90 % и толщины до 5000 мкм.

Топография поверхности катода (сталь 45) после обработки электродом-анодом из титановольфрамокобальтового сплава Т15К6 с частотой вибровозбудителя 22 кГц показана на рис. 7. Сформированное покрытие имеет структуру с размером элементов до 10 мкм. Покрытие, после обработки электродом-анодом с частотой вибровозбудителя 600 Гц, показано на рис. 8. Сформированное покрытие имеет структуру с размером элементов до 100 мкм.

Таким образом, экспериментально установлено, что использование в операциях оплавления ультразвукового преобразователя с частотой вибрации электрода-анода 22 кГц позволяет производить оплавление и измельчение материала выступов покрытия до величин на порядок меньших, чем при использовании вибровозбудителя со стандартной частотой колебаний в 600 Гц. При этом происходит более полное перемещение оплавленного материала выступов во впадины и сплошность покрытия возрастает.

Определено, что энергетические режимы установки «Alieg-55» мощностью 4,3 и 10 Дж, обеспечивающие жидко-капельный характер массопереноса и оплавление неровностей профиля, а также ультразвуковое воздействие частотой 20,4...23,6 кГц, создают в процессе нанесения покрытия и оплавления вершин выступов термодинамические явления, сходные по характеру действия на материал катода, с местным отжигом.

Это способствует уменьшению значений растягивающих (остаточных) напряжений, образующихся в легированном слое покрытия в процессе электроискрового легирования, и отодвигает порог хрупкого разрушения материала, что создает благоприятные условия для монотонного и непрерывного роста толщины электроискровых покрытий до величин, на порядок больших, чем при использовании стандартных приемов ЭИЛ.

По результатам исследований в настоящее время разрабатывается оборудование для формирования толстослойных (до 5000...7000 мкм) электроискровых покрытий с применением вибрации электрода-анода частотой 20,4...23,6 кГц.

Список литературы

1. Дорошкевич Е. А. (ред.). (2000) *40 лет порошковой металлургии в Республике Беларусь*. Минск, Ковчег.
2. Ильющенко А. Ф. и др. (2007) *Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий*. Минск, Бестпринт.
3. Ильющенко А. Ф. и др. (2010) *50 лет порошковой металлургии Беларуси: История, достижения, перспективы*. Минск, Диатэкс.
4. Белявин К. Е. и др. (2008) О припекании сферических порошков титана под воздействием твердотельного лазера. *Порошковая металлургия*, **7/8**, 155–160.
5. Ильющенко А. Ф. (2016) Эффективный инструмент современного машиностроения. *Наука и инновации*, **2**(156), 16–20.
6. Довбыш В. М., Забеднов П. В., Зленко М. А. (2014) *Аддитивные технологии и изделия из металла*. Москва, Препринт, НАМИ.
7. Белявин К. Е. и др. (2006) Исследование влияния мощности импульсно-периодического лазерного излучения на устойчивость жидкометаллических контактов между частицами порошка при селективном лазерном спекании. *Порошковая металлургия*, **29**, 268–272.
8. Быков Р. П. и др. (2010) Исследование процесса селективного припекания импульсным лазером сферических порошков титана. *Литье и металлургия*, **4**(58), 137–140.
9. Ильющенко А. Ф., Савич В. В. (2017) История и современное состояние аддитивных технологий в Беларуси, порошки металлов и сплавов для них. *Космична наука і технологія*, **23**, **4**, 33–45.
10. Степанова Е. Ю. (2015) *Аддитивные технологии, как прорывные инновации ресурсосбережения 21 века*. Режим доступа: http://oreluniver.ru/file/science/confs/2015/ee/publ/s_7_Stepanova_E_YU.doc.
11. Ilushchenko A. F., Manylo E. D., Andreev M. A., Onashchenko F. E. (2017) Flame spraying of coatings of self-fluxing alloys. *Welding International*, **31**, **11**, 887–891.
12. Борисов Ю. С., Коржик В. Н. (1995) Аморфные газотермические покрытия. Теория и практика (Обзор). *Автоматическая сварка*, **4**, 3–11.
13. Манойло Е. Д., Онащенко Ф. Е., Суша Г. К. (2018) К вопросу о газопламенном напылении аморфных покрытий. *Симпозиум «Технологии. Оборудование. Качество» в рамках «Белпромфорума», 30 мая – 1 июня 2018 г., Минск*.
14. Ильющенко А. Ф., Манойло Е. Д., Онащенко Ф. Е. (ВУ) ГНУ «Институт порошковой металлургии» (2012) *Способ формирования покрытия из порошкообразного ферромагнитного материала на металлической подложке.*, РБ, Пат. 15869, 2012.06.30. МПК С23С 24/08 (2006.01). Заявка № а 20101456, 08.10.2010.
15. Гитлевич А. Е., Перканский Н. Я., Игнатков Д. А. (1981) Об ограничении толщины слоев, формируемых в процессе электроискрового легирования. *Электронная обработка материалов*, **3**, 25–29.
16. Иванов В. И., Бурумкулов Ф. Х., Верхотуров А. Д. и др. (2012) Формирование поверхностного слоя низкоуглеродистой стали при электроискровой обработке. *Сварочное производство*, **11**, 36–40.
17. Иванов В. И., Бурумкулов Ф. Х. (2014) Об электроискровом способе нанесения толстослойных покрытий повы-

шенной сплошности. *Электронная обработка материалов*, **50**(5), 7–12.

18. Ловыгин С. И. (2017) Влияние очередности ультразвукового воздействия при электроискровой обработке на кинетику массопереноса легирующих анодов и размерные характеристики покрытий. *Порошковая металлургия*, **0**, 201–206.

References

1. (2000) *40 years of powder metallurgy in Belarus Republic*. Ed. by E.A. Doroshkevich. Minsk, Kovcheg [in Russian].
2. Ilyushchenko, A.F. et al. (2007) *High-energy treatment of plasma coatings*. Minsk, Bestprint [in Russian].
3. Ilyushchenko, A.F. et al. (2010) *50 years of powder metallurgy in Belarus: History, achievements, perspectives*. Minsk, Diateks [in Russian].
4. Belyavin, K.E. et al. (2008) On sintering of titanium spherical powders under action of solid-state laser. *Poroshk. Metallurgiya*, **7/8**, 155–160 [in Russian].
5. Ilyushchenko, A.F. (2016) Efficient tool of modern mechanical engineering. *Nauka i Innovatsii*, **2**(156), 16–20 [in Russian].
6. Dovbysh, V.M., Zabednov, P.V., Zlenko, M.A. (2014) *Additive technologies and products from metal*. Moscow, NAMI [in Russian].
7. Belyavin, K.E. et al. (2006) Examination of effect of power of pulse-periodic laser radiation on stability of liquid-metal contacts between particles powder in selective laser sintering. *Poroshk. Metallurgiya*, **29**, 268–272 [in Russian].
8. Bykov, R.P. et al. (2010) Examination of laser selective sintering process of spherical titanium powders. *Litio i Metallurgiya*, **4**(58), 137–140 [in Russian].
9. Ilyushchenko, A.F., Savich, V.V. (2017) History and current state of additive technologies in Belarus, powders of metals and alloys for them. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*, **23**(4), 33–45 [in Russian].
10. Stepanova, E.Yu. *Additive technologies as break through innovations of resource saving of 21st century*. http://oreluniver.ru/file/science/confs/2015/ee/publ/s_7_Stepanova_E_YU.
11. Ilushchenko, A.F., Manylo, E.D., Andreev, M.A., Onashchenko, F.E. (2017) Flame spraying of coatings of self-fluxing alloys. *Welding Intern.*, **31**(11), 887–891.
12. Borisov, Yu.S., Korzhik, V.N. (1995) Amorphous gas-thermal coatings. Theory and practice (Review). *Avtomatich. svarka*, **4**, 3–11.
13. Manylo, E.D., Onashchenko, F.E., Susha, G.K. (2018) To problem of flame spraying of amorphous coatings. In: *Proc. of Symp. on Technologies. Equipment. Quality in frame of Belpromforum (30 May – 1 June 2018, Minsk)* [in Russian].
14. Ilushchenko, A.F., Manylo, E.D., Onashchenko, F.E. *Method of coating material on metallic substrate*. Pat. 15869, RB, 2012.0630, Int. Cl. C23C 24/08 (2006.01). Application a 20101456, 08.10.2010 [in Russian].
15. Gitlevich, A.E., Perkansky, N.Ya., Ignatkov, D.A. (1981) On limitation of thickness of layers formed during spark alloying process. *Elektronnaya Obrab. Materialov*, **3**, 25–29 [in Russian].
16. Ivanov, V.I., Burumkulov, F.Kh., Verkhotur, A.D. et al. (2012) Formation of surface layer of low-alloy steel in spark treatment. *Svaroch. Proizvodstvo*, **11**, 36–40 [in Russian].
17. Ivanov, V.I., Burumkulov, F.Kh. (2014) About spark deposition of three-layer coatings of higher density. *Elektron. Obrabotka Materialov*, **50**(5), 7–12 [in Russian].
18. Lovygin, S.I. (2017) Influence of sequence of ultrasonic action during spark treatment on kinetics of mass transfer of alloying anodes and dimensional characteristics of coatings. *Poroshk. Metallurgiya*, **0**, 201–206 [in Russian].

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОБІТ В ГАЛУЗІ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, ЩО РОЗВИВАЮТЬСЯ В ДНВО ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

О. Ф. ІЛЬЮЩЕНКО, Є. Д. МАНОЙЛО, С. І. ЛОВИГІН, А. І. ЛЕЦКО, О. А. РАДЧЕНКО

ДНУ «Інститут порошкової металургії».

220005, Республіка Білорусь, м. Мінськ, вул. Платонова, 41. E-mail: alexil@mail.belpak.by

В роботі представлено перспективні напрямки та отримано результати в галузі зварювання та споріднених технологій, що розвиваються в Білорусі в ДНВО порошкової металургії, в тому числі: зварювання тертям з перемішуванням, адитивні технології, газополуменеве напилення порошкових матеріалів і нанесення електроіскрових покриттів. Комплексний розвиток робіт в галузі адитивних технологій досягається застосуванням обладнання, яке забезпечує 3D-друк полімерами і металами, виробництво металевих порошків та операції доущільнення. Поряд з проведенням досліджень на даному обладнанні здійснюється випуск продукції. Для проведення експериментальних досліджень і практичного застосування зварювання тертям з перемішуванням створена установка з системою реєстрації параметрів режимів зварювання. При проведенні досліджень і розробці технологічних процесів і конструкцій інструменту використовуються програми комп'ютерного моделювання (Deform, Sysweld, Ansys та ін.). На дослідному виробництві здійснюється випуск інструменту, в тому числі методами порошкової металургії та адитивних технологій. Отримано нові наукові і практичні результати в розробці процесів та обладнання газополуменевого нанесення покриттів з порошкових матеріалів на деталі різного функціонального призначення з використанням струменів високої потужності (до 125 кВт). Проведено дослідження та створено обладнання для формування товстошарових (до 5000 ... 7000 мкм) електроіскрових покриттів із застосуванням вібрації електрода-анода частотою 22 кГц. Бібліогр. 18, рис. 8.

Ключові слова: зварювання тертям з перемішуванням, адитивні технології, газополуменеве напилення, комп'ютерне моделювання, виробництво інструментів, обладнання для електрошлакового нанесення покриттів

PROMISING DIRECTIONS OF WORKS IN THE FIELD OF WELDING AND RELATED TECHNOLOGIES AT SSPA «POWDER METALLURGY»

A.F. ILYUSHCHENKO, E.D. MANOJLO, S.I. LOVYGIN, A.I. LETSKO and A.A. RADCHENKO

SSI «Powder Metallurgy Institute». 41 Platonov Str., 220005, Minsk, Belarus. E-mail: alexil@mail.belpak.by

The paper presents the promising directions and obtained results in the fields of welding and related technologies, pursued in Belarus at SSPA «Powder Metallurgy», including friction stir welding, additive technologies, flame spraying of powder materials and electrospark coating. Comprehensive development of works in the field of additive technologies is achieved by application of equipment, which ensures polymer and metal 3D-printing, production of metal powders and additional compaction operations. Alongside research performance, this equipment is used for product manufacturing. A unit with a system of recording the welding mode parameters was developed for conducting experimental studies and practical application of friction stir welding. Computer modeling programs (Deform, Sysweld, Ansys, etc.) are used during performance of investigations and development of technological processes and tool designs. Tool manufacture is performed in experimental production, in particular by the methods of powder metallurgy and additive technologies. New scientific and practical results were obtained on development of processes and equipment for flame deposition of coatings from powder materials on parts of various functional purposes, using high power jets (up to 125 kW). Investigations were performed and equipment was developed for forming thick-layer (up to 5000 – 7000 μm) electrospark coatings with application of electrode-anode vibration of 22 kHz frequency. 18 Ref., 8 Fig.

Keywords: friction stir welding, additive technologies, flame spraying, computer modeling, tool manufacture, equipment for electrospark coating deposition

Поступила в редакцію 02.07.2018

Петров С.В., Катырджюглу Т.Я. **Технологические аспекты пароводяной плазмы.** — Киев—Анкара, 2018. — 528 стр.

В монографии обобщены многочисленные материалы относительно развития, становления и применения пароводяной плазмы в плазмохимических технологиях. Освещены вопросы теории и практики генерирования пароводяной плазмы и её использования для переработки материалов в различных агрегатных состояниях. Рассмотрен современный уровень представлений о процессах в плазме и её взаимодействии с различными веществами в жидком, твердом и газообразном состояниях. Основное внимание уделено перспективе промышленного применения процессов с использованием пароводяной плазмы как в небольших мобильных установках, так и в крупнотоннажном производстве. Изложены методики инженерных расчетов пароводяных плазмотронов. Показаны возможности использования пароводяной плазмы в процессах конверсии углеводородных материалов и обезвреживания опасных и вредных отходов. Для научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области высокотемпературных химических процессов, плазмохимии, плазмохимического аппаратостроения. Полезна студентам и преподавателям вузов соответствующих специальностей. Табл. 70. Ил. 231. Библиогр. 683.

