

Осколков А.А., Матвеев Е.В., Безукладников И.И., Трушников Д.Н., Кротова Е.Л. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 90–105. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11

Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., Krotova E.L. Advanced technologies for additive manufacturing of metal product. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 90–105. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 20, № 3, 2018**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11  
УДК 539.3

**А.А. Осколков, Е.В. Матвеев, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников, Е.Л. Кротова**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Рассмотрены наиболее эффективные технологии аддитивного производства металлических изделий, использующие методы послойного нанесения материала. Описаны принципы работы таких технологий, как GMAW, GTAW, PAW, CMT, DMD, LBDMD, EBAM, FDM. Приведена сводная таблица ключевых характеристик данных процессов, и представлен их сравнительный анализ. Выявлены преимущества и недостатки данных методов, основные области применения и тенденции развития.

Определено наиболее перспективное направление развития технологий создания металлических изделий методом послойного нанесения материала. Сделан вывод о том, что технология FDM далеко не полностью раскрыла свой потенциал из-за широкого спектра технических проблем. Рассмотрены текущие исследования, направленные на преодоление существующих технологических барьеров, препятствующих развитию FDM технологии 3D-печати.

Рассмотрен круг вопросов, на которые необходимо ответить для успешного изготовления металлических изделий при помощи данной технологии. Выдвинуты гипотезы, и найдены пути решения проблем. Рассмотрены перспективы данной технологии, а также дана оценка ее полезности в производстве и для общества.

Представлен начальный этап разработки научным коллективом Пермского национального исследовательского политехнического университета более мобильной и легкодоступной технологии печати металлических изделий сложной геометрической формы на основе FDM технологии 3D-печати. Описан ряд технических решений, позволяющих обойти или решить существующие проблемы и ограничения, действующие в данной области. Например, разогрев горячей части экструдера до 1000 °С за несколько десятков секунд и ранее невозможный быстрый и точный контроль температуры, позволяющий полностью контролировать процесс экструзии материала.

**Ключевые слова:** аддитивное производство, FDM, 3D-печать, WAAM, GMAW, PAW, CMT, DMD, LBDMD, EBAM, индукционный нагрев, электромагнитная индукция, ультразвук.

**A.A. Oskolkov, E.V. Matveev, I.I. Bezukladnikov, D.N. Trushnikov, E.L. Krotova**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia Federation

**ADVANCED TECHNOLOGIES FOR ADDITIVE MANUFACTURING  
OF METAL PRODUCT**

In this article, the most effective technologies for the additive manufacturing of metal products, using the methods of layer-by-layer deposition of the material are considered. The principles of operation of such technologies as GMAW, GTAW, PAW, CMT, DMD, LBDMD, EBAM, FDM are described. A summary table of key characteristics of these processes and their comparative analysis are presented. The advantages and disadvantages of these methods, main applications and development tendencies are revealed.

The most promising direction of development of technologies for creating metal products by the method of layer-by-layer deposition of the material is determined. It is concluded that FDM technology has not fully revealed its potential due to a wide range of technical problems. Current research is considered aimed at overcoming existing technological barriers that impede the development of FDM 3D printing technology.

The range of issues to be solved for the successful manufacture of metal products using this technology is considered. Hypotheses and ways of solving problems are being put forward. Prospects of this technology are considered, as well as an assessment of its utility in production and for society.

The initial stage of development by the scientific team of Perm National Research Polytechnic University of a more mobile and easily accessible technology for printing metal products of complex geometric shapes based on FDM technology of 3D printing is presented. A number of technical solutions have been described that allow to avoid or solve existing problems and limitations in this area. For example, heating the hot-end of the extruder to 1000 °C for several tens of seconds and previously impossible rapid and accurate temperature control, which allows to fully control the extrusion process of the material.

**Keywords:** additive manufacturing, FDM, 3D printing, WAAM, GMAW, PAW, CMT, DMD, LBDMD, EBAM, induction heating, electromagnetic induction, ultrasound.

## Введение

За последние годы аддитивное производство приобрело значительное влияние в обрабатывающей промышленности, особенно в сфере создания моделей и прототипов [1]. Оригинальные методы аддитивного производства включают стереолитографию, лазерное спекание и сплавление материала, а также послойное нанесение материала. В данной статье будут рассмотрены методы послойного нанесения материала. На текущий момент данные технологии используются преимущественно для быстрого прототипирования, осуществления ремонта изделий и производства конечной продукции.

Использование для проектирования прототипа непосредственно САД-моделей помогает в несколько раз сократить время, необходимое для разработки продукта.

Огромные издержки, которые терпит, например, автомобильная и аэрокосмическая промышленность при производстве компонентов традиционными (субтрактивными) способами, стали отправной точкой к тому, чтобы направление исследований в области аддитивных технологий сместилось к вопросу изготовления сложных металлических компонентов методами послойного наплавления металла.

На данный момент аддитивное производство металлических компонентов позволяет создавать конструкции такой геометрической сложности и в таком объеме при тех же или меньших затратах материала, что традиционные методы не выдерживают конкуренции.

Таким образом, аддитивное производство обладает рядом серьезных преимуществ по сравнению с обычными методами производства, при которых деталь тем или иным образом вытачивают из цельного куска металла.

Во-первых, можно полностью автоматизировать процесс аддитивного производства от этапа проектирования до изготовления в различных САПРах. Это минимизирует время производства и уменьшает человеческое участие при изготовлении каждой новой детали.

Во-вторых, аддитивное производство позволяет существенно снизить затраты материала для изготовления детали, что особенно важно при производстве компонентов из дорогостоящих металлов, таких как титан и никелевые сплавы.

Кроме того, аддитивные технологии позволяют осуществлять мелкосерийное производство деталей сложной формы, что совершенно невыгодно экономически при использовании традиционных технологий.

На наш взгляд, наиболее интересными и эффективными технологиями изготовления металлических изделий методами послойного нанесения материала являются следующие: WAAM (GMAW, PAW, CMT), DMD, LBDMD, EBAM.

## WAAM

Проволочно-дуговое аддитивное производство [1–3] (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing) является одной из аддитивных технологий, применяющих проволоку в качестве строительного материала. На данный момент различные исследовательские группы работают над усовершенствованием таких технологий проволочно-дугового аддитивного производства, как сварка металлическим электродом в газовой среде (GMAW), газозлектрическая сварка вольфрамовым электродом (GTAW) и сварка плазменной дугой (PAW).

GMAW – это тип сварки, иначе называемый MIG/MAG-сваркой (дуговая сварка плавящимся электродом в среде инертного газа), который предполагает автоматическую подачу непрерывного твердого плавящегося электрода в защитной внешней газовой атмосфере.

При использовании данного типа сварки перенос металла осуществляется одним из четырех основных способов: крупнокапельный с короткими замыканиями дугового промежутка, крупнокапельный без коротких замыканий, перенос каплями среднего размера без коротких замыканий, струйный перенос. Каждый из них имеет свои особенности. Электрод при таком типе сварки находится перпендикулярно поверхности изделия. Кроме того, существует также технология холодного переноса металла (CMT), являющаяся модифицированным вариантом GMAW. Данный процесс отличается высокой скоростью осаждения металла и низким потреблением тепла. Он будет рассмотрен отдельно.

В процессах GTAW и PAW используют неплавящийся вольфрамовый электрод и дополнительный материал, подающийся в виде проволоки, для получения сварного шва.

В отличие от GMAW, ориентация подачи проволоки в GTAW и PAW является переменной и влияет на качество наплавки, что делает процесс планирования наплавки более сложным.

Технология GTAW является, по сути, дуговой сваркой вольфрамовым электродом в инертном газе. В качестве инертного газа для создания защитной атмосферы часто используют гелий или аргон. Сплавление слоев подаваемого материала происходит благодаря нагреву материала электрической дугой между электродом и обрабатываемой дета-

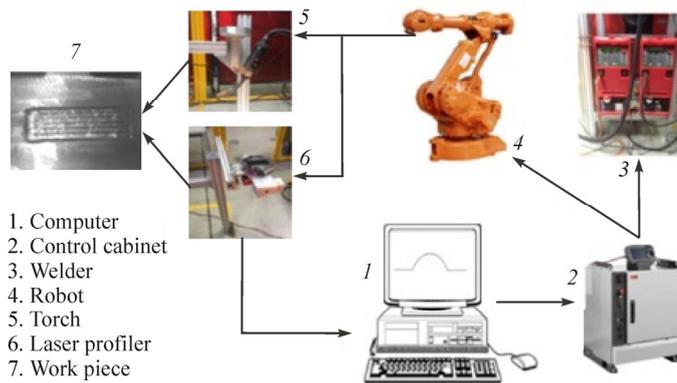


Рис. 1. Схематичное изображение роботизированной системы WAAM

лю. Технология предполагает возможность сварки под давлением и использования сварочных металлов. Защитный газ подается через сварочный аппарат.

Сварка плазменной дугой (PAW) является модификацией газозлектрической сварки вольфрамовым электродом (GTAW). В данной технологии используется специальная фокусирующая насадка, благодаря которой получается более точная, тонкая и длинная электрическая дуга, чем в процессе GTAW-сварки. Благодаря сужающей насадке значительно возрастает напряжение дуги и, следовательно, степень ионизации газа.

Помимо повышения температуры самой дуги насадка фокусирует участок плазменной дуги с наибольшей температурой на узкой поверхности сварного шва, уменьшая ее рассеивание. В результате получается источник более концентрированного и мощного нагрева, существенно повышающий эффективность теплопередачи и позволяющий увеличивать скорость прохода.

Схема системы WAAM представлена на рис. 1.

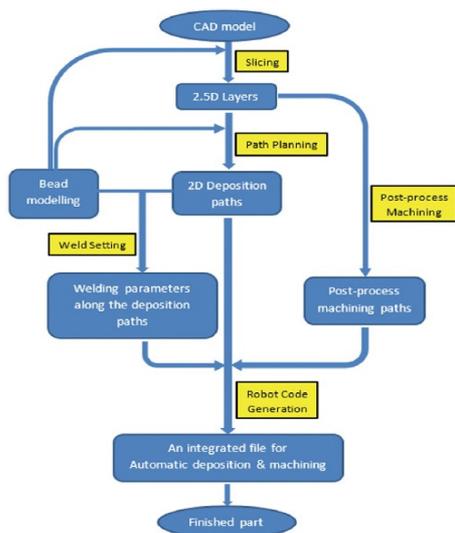


Рис. 2. Алгоритм процесса изготовления изделия с помощью системы WAAM

Как правило, весь процесс изготовления детали системой WAAM включает в себя создание модели в САПР, 3D-нарезку модели, 2D-планирование пути, моделирование сварного шва, установку параметров сварки, генерацию кода робота, непосредственно процесс наплавки и постобработку [4].

Алгоритм процесса изготовления детали системой WAAM представлен на рис. 2.

### GMAW

GMAW – это тип сварки, иначе называемый MIG/MAG-сваркой (дуговая сварка плавящимся электродом в среде инертного газа), который предполагает автоматическую подачу непрерывного твердого плавящегося электрода в защитной внешней газовой атмосфере.

Схема процесса GMAW приведена на рис. 3.

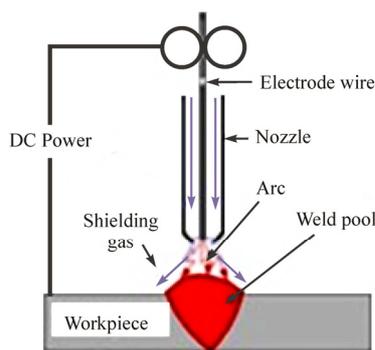


Рис. 3. Схематичное изображение процесса GMAW

Одним из интересных примеров использования технологии GMAW для изготовления металлических компонентов являются результаты опытов в университете Wollongong [4].

В ходе экспериментов для осуществления процесса наплавки металла использовался промышленный робот ABB 1400, а для постобработки,

т.е. отделки и фрезерования робот АВВ 6660. Данные процессы выполнялись посредством движения рабочих инструментов роботов относительно подложки.

В качестве расходного материала использовался проволочный алюминиевый электрод (5 % Mg) диаметром 1,2 мм. Для создания защитной газовой атмосферы применялся аргон с расходом 15 л/мин.

В результате эксперимента исследовательской группой была получена алюминиевая форма высотой 20 мм, изображенная на рис. 4 и 5 во время и после постобработки.



Рис. 4. Процесс механической обработки изделия



Рис. 5. Изделие после механической обработки

Ряд важных параметров и технических характеристик данного процесса указан в конце статьи в сводной таблице для последующего сравнения и анализа описанных в статье методов.

### PAW

Плазменная дуговая сварка представляет собой процесс, в котором дуга создается между неплавящимся вольфрамовым электродом (катодом) и медным анодом в горелке. Инертный газ (обычно аргон) пропускается через сопло, которое к тому же фокусирует электрическую дугу. Это приводит к более высокой плотности энергии и формированию более стабильной дуги [5–8]. На рис. 6 приведена схема плазменной дуговой наплавки.

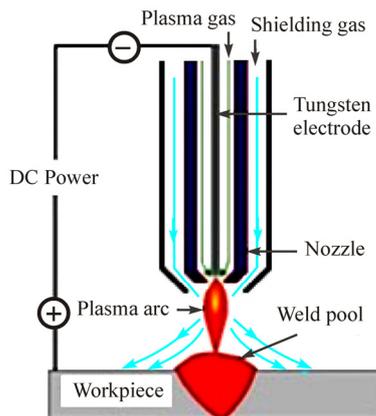


Рис. 6. Схема процесса PAW

Исследовательская группа из Университета Кренфилда [9] провела эксперименты по использованию технологии плазменной сварки в аддитивном производстве. В ходе опытов использовалась установка для плазменной сварки PW-400C с электродом 5 мм. Аргон использовался как для создания плазменной дуги, так и в качестве защитного газа. В качестве материала использовалась титановая проволока диаметром 1,2 мм.

В результате эксперимента были сделаны 3 титановых стенки длиной 140 мм. Изображение стенок приведено на рис. 7.



Рис. 7. Титановые стенки, изготовленные с помощью PAW

Кроме того, результаты другого эксперимента [10], проводившегося в этом же университете, можно видеть на рис. 8. Данный результат был достигнут исследовательской группой с использованием плазменной дуговой сварки с роботизированной 7-осевой системы. Лонжерон крыла сделан из титана, и его длина составляет 1,2 м. На рис. 9 изображена сборка внешнего шасси, также изготовленная из титана.



Рис. 8. Лонжерон крыла (Ti, PAW)

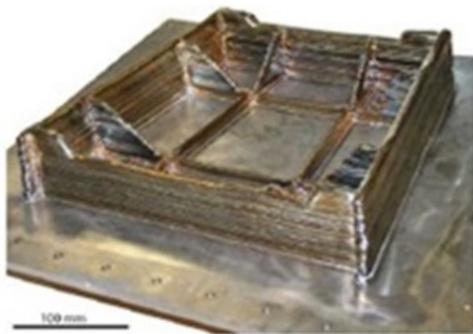


Рис. 9. Внешнее шасси (Ti, PAW)

*CMT*

CMT-сварка – это MIG/MAG-процесс, который имеет особенный тип отрыва капли материала. Это позволяет применять CMT-процесс там, где раньше технологии MIG/MAG-сварки либо не применялись, либо их было крайне затруднительно применять. CMT означает Cold Metal Transfer (холодный перенос металла), т.е. процесс позволяет осуществлять «холодный» перенос металла при сварке или пайке. По сравнению с обычным MIG/MAG-процессом, здесь вкладывается значительно меньше тепла.

Процесс основан на сварке коротким замыканием. Во время такого процесса образование короткого замыкания сопровождается значительным повышением тока (резким понижением напряжения и повышением сопротивления), что непременно приводит к повышению тепловложения в основной металл. С электрической дугой в CMT-процессе ситуация иная: при 1-м обнаружении короткого замыкания ток снижается до минимально допустимого значения, в то же время происходит отрыв капли за счет обратного движения сварочной проволоки. Таким образом, перенос металла осуществляется при значении тока, практически равном 0, и поэтому количество передаваемой теплоты очень мало. Во время горения дуги сварочная проволока подводится к ванне. В момент входа сварочной проволоки в сварочную ванну дуга гасится, ток снижается для исключения разрыва перемычки. В момент короткого замыкания ток снижается до минимума, сварочная проволока отводится назад для облегчения отделения капли. Проволока снова подается в сварочную ванну, зажигается дуга, начинается новый цикл сварки [11–12]. Процесс изображен на рис. 10.

Установка представлена на рис. 11.

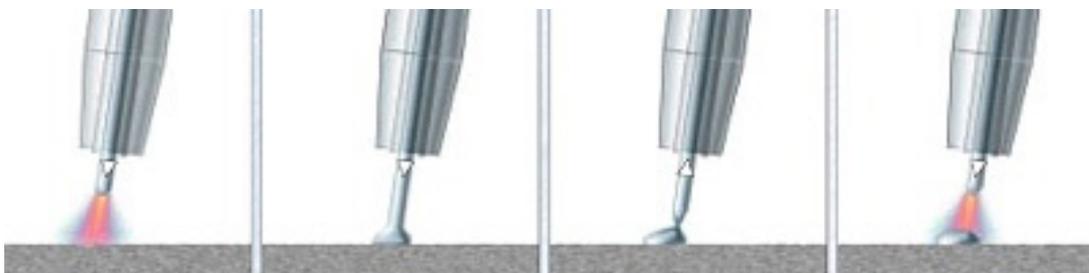


Рис. 10. Изображение основных стадий переноса капли металла в ходе процесса CMT

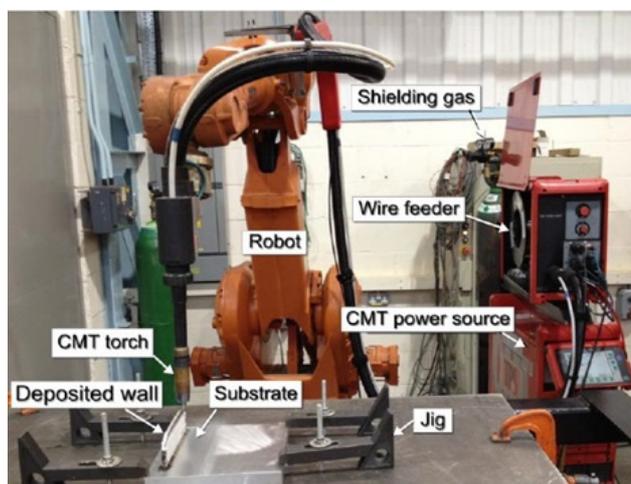


Рис. 11. Изображение основных компонентов установки CMT-процесса

Ряд экспериментов по работе с СМТ-процессом провели исследовательская группа из Университета Кренфилда совместно с представителями таких китайских университетов, как Северо-Восточный и Бэйханский университеты [13], а также другие группы ученых [14–15]. В 1-м эксперименте с помощью технологии СМТ были изготовлены алюминиевые стенки 500 мм в длину и 200 мм в высоту. В качестве источника питания использовался Fronius CMT Advanced 4000 R, который был подключен к роботу IRB2400 ABB. В качестве защитного газа использовался аргон.

Кроме того, исследовательская группа из Кренфилда провела еще ряд испытаний технологии СМТ [10]. На рис. 12 представлены результаты.

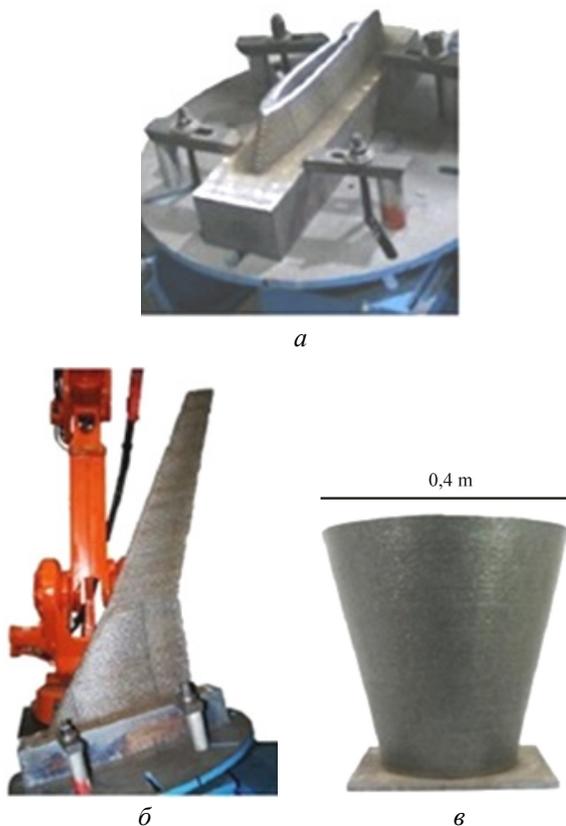


Рис. 12. Стальные изделия, созданные с помощью СМТ-процесса: *а* – основание крыла; *б* – завершенное крыло; *в* – профилированный конус

На рис. 12, *а, б* показано крыло длиной 0,8 м, которое изготовлено из стали с помощью процесса осаждения Fronius CMT11. На рис. 12, *в* представлен стальной профилированный конус, также построенный с помощью процесса Fronius CMT11.

### DMD

Промышленный лазерный луч под числовым программным или роботизированным управлением фокусируется на заготовку, производя ванну рас-

плава, в которую вместе с инертным газом впрыскивается небольшое количество металлического порошка, за счет чего происходит наращивание детали тонкими слоями. Луч перемещается по траектории, заданной на основе геометрии 3D-модели изделия. В целом этапы процесса DMD ничем не отличаются от WAAM.

Схема процесса DMD изображена на рис. 13.

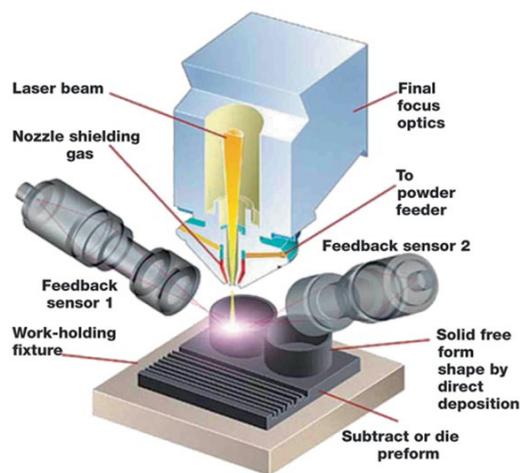


Рис. 13. Схематичное изображение процесса DMD

В данном подразделе среди ряда работ [16–18] приведены результаты совместных исследований POM Group с Университетом штата Мичиган [16]. Изделия, которые показаны на рис. 14, созданы с помощью системы DMD, использующей 5- или 6-координатных роботов с дополнительной осью вращения на рабочем столе, что позволяет создавать изделия, имеющие геометрию практически любой сложности.

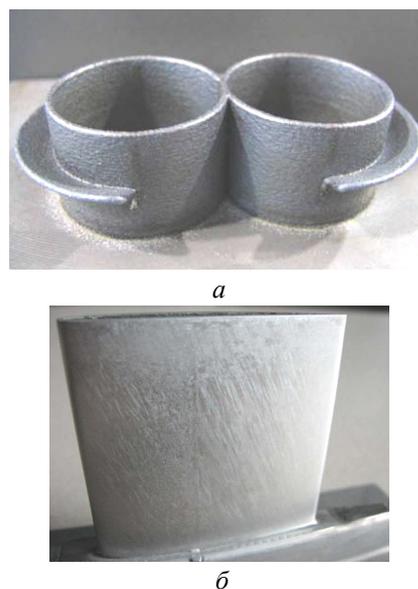


Рис. 14. Изделия сложной геометрической формы, созданные с помощью процесса DMD: *а* – изделия случайной формы; *б* – лопатки газовой турбины

### LBDMD

Одной из вариаций технологии DMD является перспективная технология LBDMD, над которой ведутся работы в Южном методистском университете [19–22]. Университет разрабатывает робота, управляемого системой LBDMD, которая соединяет 6-осевой робот-манипулятор с дополнительной 2-осевой вращающейся системой позиционирования. Это упрощает планирование процесса осаждения для сложных деталей и сокращает время производства. Благодаря синхронизированным движениям рабочего инструмента робота и 2-осевой вращающейся системы позиционирования данный метод позволяет избавиться от необходимости построения поддерживающих конструкций для нависающих элементов детали, а также упростить и ускорить создание деталей вращения. Схема LBDMD представлена на рис. 15.

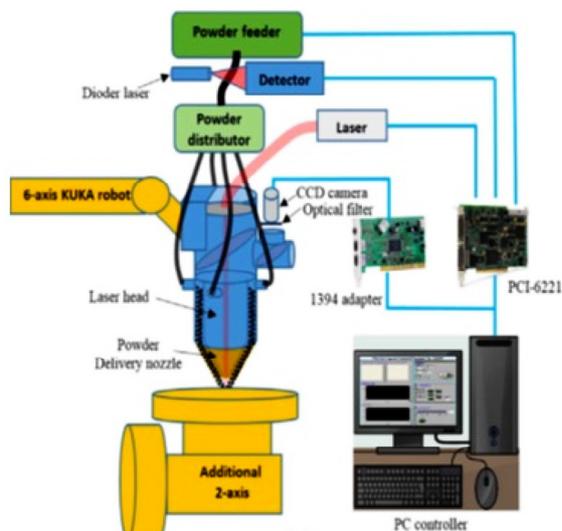


Рис. 15. Схематичное изображение процесса LBDMD

В эксперименте, проводившемся в Южном методистском университете, использовался волоконный лазер мощностью 4 кВт с длиной волны 1070 нм. Лазерная головка смонтирована на 6-осевом робота-манипулятора KUKA.

Устройство, разработанное RCAM, подает стальной порошок. Оптико-электронный датчик контролирует расход порошка на выходе из устройства подачи порошка. Несущий газ аргон подает частицы порошка в сопло и вводит их в сварочную ванну, образованную лазерным лучом. Защитный газ (аргон) направляется через сопло по направлению к сварочной ванне, чтобы защитить расплавленный материал от контакта с атмосферой.

На рис. 16 можно увидеть построенный в результате эксперимента винт. Общее время сборки составило 72 мин.



Рис. 16. Стальной винт, изготовленный с помощью процесса LBDMD

### ЕВАМ

Технология печати ЕВАМ основана на электронно-лучевой плавке металлической проволоки. Печать осуществляется в жестком вакууме, что позволяет добиваться высокой плотности и однородности изделия, а также работать с самыми разными металлами и сплавами: титаном, вольфрамом, никелевыми сплавами, нержавеющей сталью, танталом, ниобием и т.д. Скорость наращивания при этом достигает 10 кг/ч, хотя платить за высокую производительность приходится необходимостью механической постобработки изделий [23–24].

Работы над совершенствованием технологии ведутся в исследовательском институте Nuclear AMRC при Университете Шеффилда [25] и других [26]. Эксперименты проводятся на установке K2000, которая представляет собой объект с мобильной ЭЛС-пушкой 60 кВ / 30 кВт, установленной внутри вакуумной камеры на порталные системы, обеспечивающие линейные перемещения пушки в 3 направлениях и вращение вокруг 2 осей. Вакуумная камера имеет объем 208 м<sup>3</sup>. Мощные механические и диффузионные насосы могут создавать вакуум 10<sup>-4</sup> мбар в течение 45 мин. Вместе с 5 осями свободы ЭЛС-пушки действует также 100-тонный поворотный стол.

Другим важным преимуществом технологии ЕВАМ Sciaky является то, что установка может быть оснащена несколькими соплами подачи проволоки одновременно. Эта опция позволяет одновременно и независимо подавать 2 или более различных металлических сплава в общую сварочную ванну.

Высокий вакуум и природа электронного пучка создают условия, недоступные для других процессов. В частности, ЕВАМ превосходно справляется с работой над материалами, которые

легко окисляются или имеют очень высокую температуру плавления. Более того, EBAM предлагает одну из самых высоких скоростей осаждения. Схема процесса представлена на рис. 17.

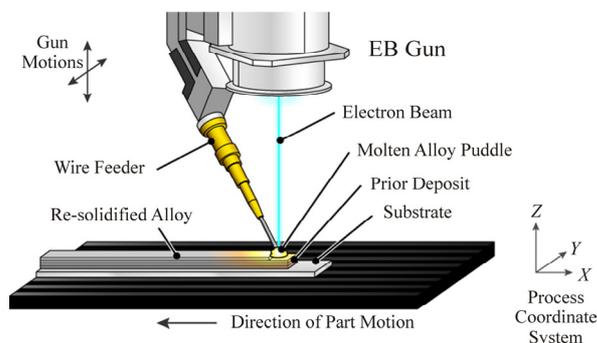


Рис. 17. Схематичное изображение процесса EBAM

Работы, представленные на рис. 18 и 19, были выполнены из титана с использованием 1 сопла подачи проволоки. Расходуемая проволока имеет диаметр 1,2 мм.

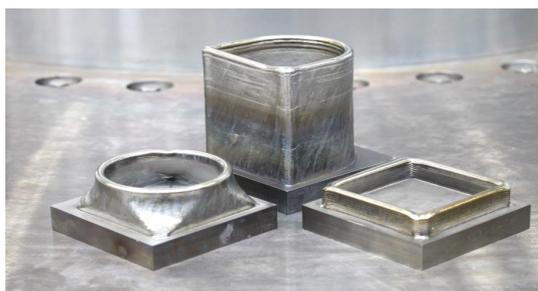


Рис. 18. Изделия произвольной формы из титана

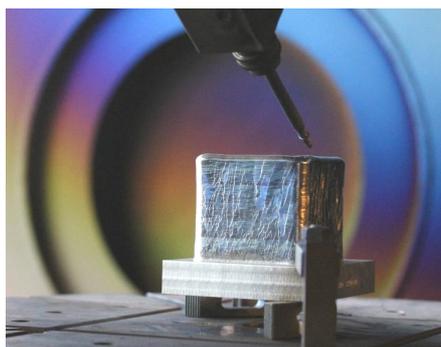


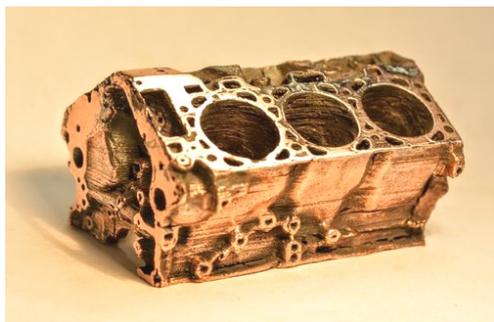
Рис. 19. Куб из титана

Основные параметры процессов приведены в подразделе сравнения характеристик процессов.

#### Метод на основе FDM технологии 3D-печати

Все ранее описанные технологии реализованы на крупногабаритных установках, которые имеют достаточно сложную конструкцию и высокую стоимость. Вышеперечисленные факты нега-

тивно влияют на мобильность данных устройств и возможность быстрого разворачивания производства. На данный момент в мире постепенно развивается концепция высокоподвижных портативных производственных или ремонтных установок, которые можно было бы легко транспортировать и использовать сразу при появлении такой необходимости. Одним из направлений реализации такой концепции является разработка компактного и технически простого FDM 3D-принтера, способного быстро изготавливать изделия сложной формы из композиционных материалов или металлов. Попыткой реализации данной концепции является, например, создание не принтера для печати металлом, но композита на основе полимерной матрицы (содержание пластика 8–20 %) с вкраплением металлического порошка. В частности, меди, бронзы и стали [27]. На рис. 20 приведены примеры изделий из наполненного бронзовым и стальным порошком полимера соответственно. Данная технология позволяет осуществлять печать в несколько раз быстрее всех вышеперечисленных аналогов, а температура плавления металлонаполненных полимеров составляет 205–215 °С. Изготовленное с помощью данной технологии буровое долото для бурения льда успешно применяется на практике для проведения исследований в Антарктике. Через буровое долото крайне сложной геометрической формы пропускают горячую воду для плавления льда. Существуют и другие случаи успешного применения этой технологии, сочетающие относительно высокие физико-химические свойства материалов и возможность изготовления изделий сложной геометрической формы прикратно меньших финансовых затратах по сравнению со всеми ранее описанными методами. Уменьшение финансовых затрат происходит главным образом за счет в несколько десятков раз меньшей стоимости FDM 3D-принтера по сравнению с роботами-манипуляторами или сложными установками для DMD и EBAM. Тем не менее прочностные характеристики конечных изделий недостаточны для их использования в качестве силовых элементов конструкций. Это обусловлено порошковой структурой изделий, вкраплением полимерных структур и острой зависимостью от качества порошка наполнителя. Кроме того, для работы с данными композитами требуется докупать ряд комплектующих для FDM 3D-принтера, а стоимость материала колеблется от 110 до 250 долл. за 1 кг, что в несколько раз выше стоимости цельнометаллической проволоки из соответствующих материалов. Впрочем, на данный момент это решение является наиболее эффективным, например, в области быстрого прототипирования металлических конструкций.



а



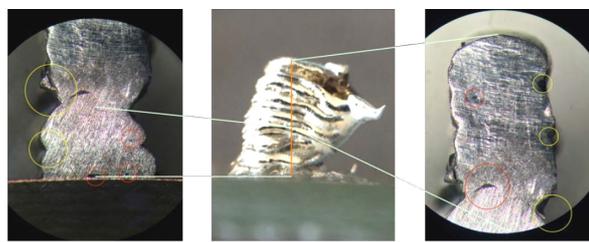
б

Рис. 20. Изделия, изготовленные из наполненного металлом полимерного композита: а – с использованием бронзового порошка; б – с использованием стального порошка

Другим способом реализации данной концепции является собственно разработка FDM 3D-принтера с использованием нестандартного метода нагрева горячей части экструдера. Данное решение должно обеспечить высокую скорость и температуру нагрева филамента, проходящего через сопло, и позволить, таким образом, использовать для печати материалы, имеющие высокую температуру плавления. Таким нестандартным для FDM 3D-печати, но хорошо известным методом нагрева является индукционный метод нагрева токами высокой частоты [28]. Благодаря использованию данного метода нагрева можно осуществлять наплавку цельнометаллическим филаментом, состоящим из припоя Sn96,5/Ag3/Cu0,5 [29]. В приведенной статье автор ставит целью подтверждение гипотезы возможности печати металлами с использованием FDM-технологии. Автору статьи удается достигнуть температуры в 230 °С за 12 с и успешно осуществить печать, используя сопло стандартной формы диаметром 0,4 мм. Результаты опыта можно видеть на рис. 21.

Однако из-за недостатков конструкции автор вынужден ограничить рабочую температуру экструдера 350 °С. Кроме того, не были полностью решены проблемы, связанные со слишком боль-

шой тепловой массой горячей части, расходуемого материала, низким градиентом нагрева сопла, эффективной глубиной проникновения вихревых токов, несвоевременным истечением материала из сопла. Как уже было сказано, данный метод нагрева горячей части известен достаточно давно и основным препятствием перед его использованием является не создание оптимальной конструкции экструдера, а невозможность быстрого контроля температуры горячей части и, как следствие, невозможность быстрого контроля экструзии материала, что неизменно ведет к неприемлемому качеству конечных изделий, т.е. к низким прочностным характеристикам изделий и низкому качеству поверхности изделий.



а

б

в

Рис. 21. Наплавленная с помощью индукционного нагрева стенка: а – вид снизу; б – вид сбоку; в – вид сверху

Научному коллективу нашего университета в ходе исследований в области аддитивных технологий и FDM 3D-печати удалось полностью решить или минимизировать перечисленные выше проблемы. Был разработан метод высокоскоростного бесконтактного резонансного (вихретокового) метода измерения и контроля температуры. Исследования в области бесконтактных методов контроля активно ведутся по всему миру [30–32].

Разработка данного метода позволила преодолеть технологический барьер, препятствующий эффективному использованию индукционного нагрева в FDM-печати (контроль нагрева тел малой массы). Разработанный метод измерения и контроля температуры основан на применении в качестве материала сопла ферромагнитных сплавов с нужными механическими свойствами и совместном анализе ряда температурозависимых параметров этих материалов вихретоковым методом в процессе индукционного нагрева. Одним из таких параметров, непосредственно зависящим от температуры и ранее использовавшимся для беспроводного ее контроля, является магнитная проницаемость материала. В ходе проведенных исследований авторскому коллективу удалось устранить основные присущие такому методу контроля недостатки, а также за счет одновременного учета ряда других

температурозависимых параметров, измерение которых также возможно вихретоковым методом, обеспечить беспроводное малоинерционное измерение температуры непосредственно в процессе индукционного нагрева.

В свою очередь, использование метода индукционного нагрева горячей части экструдера позволяет за несколько десятков секунд достигать температуры около 1000 °С и обеспечивать высокое качество печати за счет ее высокоскоростного динамического контроля, не допускающего переэкструзии или недоэкструзии материала.

Хотя основная деятельность научного коллектива и направлена на работу с высокотемпературными инженерными пластиками и полимерными композиционными материалами, данной температуры нагрева горячей части экструдера достаточно для работы с широким спектром металлов.

Первый опыт по экструдированию металла был произведен в декабре 2017 г. Его результат представлен на рис. 22.



Рис. 22. Прототип нового экструдера



Рис. 23. Стандартный экструдер процесса FDM

На рис. 22 изображен 1-й прототип горячей части экструдера, разработанного научным коллективом нашего университета. Как видно, конструкция разработанного прототипа существенно отличается от стандартной (рис. 23). Сопло выполнено из нержавеющей стали 40×13. Радиатор из алюминия д16т. Примечательно, что в качестве экструдированного материала использовалась проволока из алюминия той же марки. Это оказалось возможным благодаря особой конструкции сопла и

индуктора, обеспечивающей высокий заданный градиент нагрева горячей части экструдера. В ходе эксперимента сопло было разогрето до 690 °С.

Безусловно, данный опыт подтвердил только саму возможность экструзии металла с помощью разработанного нашим коллективом устройства при подаче цельнометаллического филамента. На этапе приведенного эксперимента не была возможна непосредственная печать изделий по технологии FDM. Кроме того, естественным ограничением для печати алюминием является его окисляемость. Оксидная пленка препятствует процессу адгезии. На данный момент ведутся эксперименты по печати в защитной атмосфере и внутри вакуумной камеры. В данном контексте стоит обратить внимание на эксперименты по созданию композиционных материалов на основе алюминиевой матрицы с помощью FDM 3D-печати в вакууме [33]. Кроме того, наш творческий коллектив в ходе работы с полимерными материалами уже сталкивался с проблемой образования поверхностных пленок. Одним из возможных методов разрушения поверхностной пленки может стать физическое воздействие непосредственно сопла одновременно с воздействием ультразвуковых колебаний, возникающих в сопле. Ультразвуковые колебания возникают в сопле из магнестрикционного материала в результате возникновения в нем токов Фуко. На данный момент влияние ультразвуковых колебаний на процесс печати и качество конечных изделий является одним из приоритетных направлений исследований нашего коллектива.

В настоящее время создан прототип устройства, который используется в качестве испытательной установки для печати металлом. Действующий прототип экструдера представляет собой механизм подачи филамента для 3D-печати. Нагрев сопла осуществляется индуктивным способом с помощью электромагнитной катушки, установленной в нижней части экструдера. Форма сопла представляет собой трубку длиной 15 или 25 мм с фиксатором корпуса подающего механизма. Прототип выдерживает температуру нагрева свыше 1000 °С, обеспечивает пропускную способность около 500 мм/с и способен достигать расхода материала до 20 кг/ч. Обеспечивается точность печати 0,15 мм. Потребляемая мощность устройства не превышает 200 Вт. Обеспечивается точность поддержания температуры не менее 5 % в интервале значений температуры от 150 до 500 °С. Обеспечивается скорость нагрева до температуры 300 °С не более чем за 5 с. Действующий прототип изображен на рис. 24. Схема процесса печати по FDM технологии представлена на рис. 25.

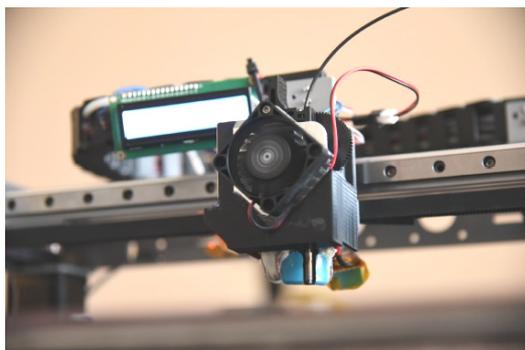


Рис. 24. Действующий прототип экструдера

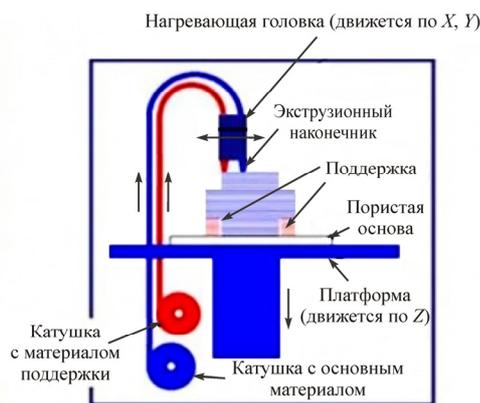


Рис. 25. Схематичное изображение процесса FDM

Таблица 1

WAAM и FDM

Характеристика	GMAW	PAW	CMT	FDM
Скорость осаждения материала, кг/ч	3–9	0,8–2,0	2,5–6,5	10,0
Материал	Алюминий	Титан, Алюминий	Алюминий, Сталь	Наполненный полимерный композит (88 % медь), (87 % бронза), (81 % сталь)
Точность, мм	0,2	0,2	0,05	0,15–0,25
Скорость подачи проволоки, м/мин	5,7–6,0	2,4–4,0	6,0	1,2–8,0
Скорость движения инструмента, м/мин	0,4–0,55	0,12–0,2	0,2–0,8	2,0
Метод подачи материала	Плавящийся электрод	Проволока	Плавящийся электрод	Проволока

Таблица 2

Лазерная и электронно-лучевая наплавка

Характеристика	DMD	LBDMD	EBAM
Скорость осаждения материала, кг/ч	1,8–2,9	2,9	3,0–9,0
Материал	Сталь, никель, алюминий, медь, титан, кобальт, свинец	Сталь, никель, алюминий, медь, титан, кобальт, свинец	Титан, вольфрам, никелевые сплавы, сталь, тантал, ниобий
Точность, мм	0,1	0,1	0,05
Скорость подачи проволоки, м/мин	–	–	2,0–6,0
Скорость движения инструмента, м/мин	–	–	0,3–0,6
Метод подачи материала	Порошок	Порошок	Проволока
Скорость подачи порошка	0,1–4,1 см <sup>3</sup> /мин	0,45 г/с	–

**Характеристики существующих методов**

Основные характеристики методов WAAM и FDM, лазерной и электронно-лучевой наплавки приведены в табл. 1, 2.

На данный момент общим слабым местом всех аддитивных технологий является потребность

в механической постобработке изделий, т.е. потребность в дополнительном оборудовании. Сильными сторонами данных методов изготовления металлических изделий являютсякратно меньшие затраты материала и времени на изготовление изделия, возможность построения изделий крайне сложной геометрической формы и определенная

гибкость, позволяющая быстро перестраиваться под новые задачи без изменения всего цикла производства. В настоящее время широкое промышленное применение нашли технологии DMD и EBAM, следом за ними идет CMT, далее FDM с использованием металлонаполненных полимеров. Технология плазменной наплавки постепенно дорабатывается, а GMAW и GTAW постоянно модернизируются в целях получения таких необычных методов производства, как CMT.

Основными потребителями аддитивных технологий, специализирующихся на наплавке металла, являются аэрокосмическая, автомобильная и электротехническая отрасли. Такая компания, как TWI LTD, использует технологии DMD в целях производства различных комплектующих для компаний Airbus и Messier-Dowty. Большая часть изделий производится данной компанией по технологии DMD, среди них корпуса турбин, охлаждающие элементы, цилиндры двигателей и т.д. Среди других компаний, преуспевающих в применении DMD-технологии, можно назвать DMG Mori, Optomec, CNC, Insstek. Данная технология также широко применяется для скоростного прототипирования, ремонта деталей, например лопаток турбин, и напыления тонких слоев материала. Одними из основных преимуществ данной технологии являются высокая степень детализации и возможность создания тонкостенных элементов (0,1–5,0 мм), например антенн или различных элементов электрических цепей. Кроме того, детали, построенные по этой технологии, практически не требуют постобработки. Технология позволяет применять широкий спектр материалов и осуществлять одновременную подачу нескольких порошков. Однако подобные установки имеют высокую стоимость, потребляют много энергии. Один лазер потребляет около 4 кВт. Технология зависит от качества весьма дорогих порошков, а сами установки имеют маленькую рабочую зону и низкую скорость выращивания изделия. В то же время ранее упомянутая компания TWI LTD также использует в производстве технологию CMT. Данная технология обеспечивает скорость осаждения материала в несколько раз выше DMD, использует в качестве материала металлическую проволоку, которая в 1,5–2,0 раза дешевле порошков. Позволяет осуществлять сварку алюминия со сталью, а также потребляет гораздо меньше мощности. Стоимость полноценной установки весьма высока. Площадь рабочей зоны не имеет принципиальных ограничений по масштабированию. В то же время общий спектр применяемых материалов на данный момент весьма узок, а конечные изделия требуют серьезной механической постобработки.

Технология EBAM является детищем компании Sciaky. В настоящее время это единственная технология, обеспечивающая достаточные прочностные характеристики конечных изделий для их использования в качестве силовых конструкций. Компания Sciaky занимается производством комплектующих компании Boeing, Министерства обороны и воздушных сил США. Рабочая зона установки также является на данный момент самой большой среди перечисленных технологий и составляет 5,7×1,2×1,2 м. Таким образом, обеспечивается возможность создания прочных крупногабаритных изделий. Она также имеет самую высокую скорость осаждения материала, а в качестве самого расходного материала используется металлическая проволока. Спектр применяемых материалов не уступает технологии DMD. Установка может быть оснащена несколькими соплами подачи проволоки одновременно. Однако изделия, полученные таким способом, требуют серьезной механической обработки, а создание тонкостенных элементов весьма затруднительно. Стоимость данной установки весьма высока, как и потребляемая ею мощность. Одна электронно-лучевая пушка потребляет около 60 кВт. Конкуренцию в величине доступной рабочей зоны данной технологии может составить PAW.

Технология наплавки металлических изделий методом FDM-технологии была в полном объеме рассмотрена ранее на примере использования металлонаполненных полимеров и успешной разработки прототипа экструдера, использующего индукционный нагрев. Задачей нашего коллектива является совершенствование данной технологии и получение ее наиболее экономически выгодного варианта, т.е. использование дешевой установки и наиболее дешевого расходного материала – цельнометаллической проволоки. При этом будет возможно использование широкого спектра материалов и достижение скоростей осаждения материала выше, чем у всех перечисленных ранее технологий. Кроме того, FDM-технология также не имеет принципиальных ограничений по масштабированию рабочей зоны.

### Заключение

Исходя из приведенных в статье данных, можно сделать вывод, что метод изготовления металлических изделий, предлагаемый коллективом авторов статьи, в перспективе не будет уступать другим методам по точности и скорости печати, спектру используемых материалов. В то же время разрабатываемый экструдер несравнимо дешевле и мобильней, чем станки и роботы-манипуляторы.

Многие проблемы, возникающие при печати металлом, являются общими для FDM 3D-печати в целом и в частных случаях уже разрешены нашим и другими научными коллективами.

Дальнейшая проработка метода мультипараметрического управления процессом печати с использованием множественных обратных связей, частью которого является упоминавшийся метод высокоскоростного бесконтактного резонансного (вихретокового) измерения и контроля температуры, позволит обеспечить высокое качество конечных изделий из широкого спектра материалов.

В свою очередь, изучение влияния ультразвука на качество конечных изделий уже дало результаты при печати угленаполненным пластиком. В частных случаях изделие получается близким по качеству к литым деталям, т.е. наблюдается отсутствие слоистости и низкая пористость. В настоящий момент образцы изделий направлены на проведение испытаний. Это наводит на мысль о возможности получения металлических изделий высочайшего качества и широких перспективах использования данной технологии. Кроме того, подобное воздействие ультразвуковых колебаний может использоваться как аналог ультразвуковой проковки для уменьшения механических напряжений и деформаций, что также положительно повлияет на качество конечных изделий.

В перспективе данная технология сделает качественную печать металлом легкодоступной и поможет удовлетворить растущий спрос рынка на мелкосерийное производство во многих отраслях.

В свою очередь, уникальная мобильность и компактность разрабатываемого устройства может стать серьезным подспорьем в домашнем хозяйстве или при необходимости срочного изготовления какого-либо изделия, например в результате аварии, поломки, в ходе боевых действий или в условиях крайне ограниченного рабочего пространства.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/787 от 21.12.2017 (обзор методов 3D-наплавки проволоочных материалов концентрированными источниками), при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ №18-08-01016 А (обзор методов прямого дугового осаждения металла) и при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части №9.9697.2017 /8.9 (обзор методов на основе FDM-технологии 3D-печати).*

## Список литературы

1. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 811, № 4. – P. 465–481.
2. Manufacture of complex titanium parts using wire + arc additive manufacture 2 [Электронный ресурс] / A. Addison, J. Ding, F. Martina, H. Lockett, S. Williams // As Deposited Mechanical Properties, Titan. Eur. – 2015. – URL: <http://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/AddisonAdrianTiEU2015-3DAddi.pdf> (дата обращения: 21.08.2017).
3. Bonaccorso F., Cantelli L., Muscato G. Arc welding control for shaped metal deposition process // IFAC Proceedings Volumes. – 2011. – Vol. 44. – P. 11636–11641.
4. Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part / D. Ding [et al.] // Comput Aided Des. – 2016. – № 73. – P. 66–75.
5. Metal direct prototyping by using hybrid plasma deposition and milling / X. Xiong [et al.] // J Mater Process Technol. – 2009. – № 209. – P. 124–130.
6. Micro plasma powder deposition as a new solid freeform fabrication process / H. Wang, W. Jiang, M. Valant, R. Kovacevic // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 2003. – № 217. – P. 1641–1650.
7. Jhavar S., Jain N., Paul C. Development of micro-plasma transferred arc ( $\mu$ -pta) wire deposition process for additive layer manufacturing application // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214, № 5. – P. 1102–1110.
8. Jhavar S., Jain N. Development of micro-plasma wire deposition process for layered manufacturing // Daaam international scientific book. – 2014. – № 20. – P. 239–256.
9. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V / F. Martina, J. Mehnen, S.W. Williams, P. Colegrove, F. Wang // J. Mater. Process. Technol. – 2012. – Vol. 212, № 6. – P. 1377–1386.
10. Wire arc additive manufacturing / S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove // Materials Science and Technology. – 2015. – Vol. 32, iss. 7. – P. 641–647.
11. Fronius CMT [Электронный ресурс]. – URL: <http://tctena.ru/tehnologii/cmt> (дата обращения: 21.08.2017).
12. Fronius CMT [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-2BF524E9-5150258D/fronius\\_international/hs.xml/79\\_17482\\_ENG\\_HT ML.htm](https://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-2BF524E9-5150258D/fronius_international/hs.xml/79_17482_ENG_HT ML.htm) (дата обращения: 21.08.2017).
13. Wire+arc additive manufacturing of aluminium / J. Gu, B. Cong, J. Ding, S.W. Williams, Y. Zhai // Proc. 25th Int. Solid Freeform Fabrication Symp., August 2014 / University of Texas, 451–458. Dutta. Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition // Advanced Materials & Processes. – 2011. – P. 33–36.
14. Prado-Cerqueira J.L., Diéguez J.L., Camacho A.M. Preliminary development of a wire and arc additive manufacturing system (WAAM) // Procedia Manufacturing. – 2017. – № 13. – P. 895–902.

15. Cong B., Ding J., Williams S.W. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy // *J. Adv. Manuf. Technol.* – 2015. – № 76. – P. 1593–1606.
16. Dutta. Additive manufacturing by direct metal deposition // *Advanced materials & processes.* – 2011. – P. 33–36.
17. Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactors components / L. Thivillon, P. Bertrand, B. Laget, I. Smurov // *J. Nucl. Mater.* – 2009. – Vol. 385, № 2. – P. 236–241.
18. Yan J., Battiato I., Fadel G. Planning the process parameters during direct metal deposition of functionally graded thin-walled parts based on a 2D model // *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium.* – Austin, 2016. – P. 185–186.
19. Ding Y., Dwivedi R., Kovacevic R. Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition (LBDMD) system: a case on building revolved parts // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* – 2017. – № 44. – P. 67–76.
20. Ding Y., Warton J., Kovacevic R. Development of sensing and control system for robotized laser-based direct metal addition system // *Addit. Manuf.* – 2016. – № 10. – P. 24–35.
21. Ding Y., Kovacevic R. Feasibility study on 3-d printing of metallic structural materials with robotized laser-based metal additive manufacturing // *JOM.* – 2016. – P. 1–6.
22. Zeković S., Kovacević R. Modeling of laser-based direct metal deposition // *Tribology in industry.* – 2006. – Vol. 28, № 1, 2. – P. 9–14.
23. Аддитивные технологии [Электронный ресурс]. – URL: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am/> (дата обращения: 21.08.2017).
24. Sciaky: 'Sciaky's metal additive manufacturing [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.sciaky.com/documents/Sciaky\\_Direct\\_Manufacturing.pdf](http://www.sciaky.com/documents/Sciaky_Direct_Manufacturing.pdf). (дата обращения: 16.07.2017).
25. Cheng B., Chou K. Geometric consideration of support structures in part overhang fabrications by electron beam additive manufacturing // *Computer-Aided Design.* – 2015. – № 69. – P. 102–111.
26. Baufeld B. Electron Beam Additive Manufacturing at the Nuclear AMRC // *Elektronika ir Elektrotehnika.* – 2016. – Vol. 22, № 5–6. – P. 7–13.
27. Компания The Virtual Foundry [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.thevirtualfoundry.com/> (дата обращения: 30.08.2017).
28. Сайт разработчика [Электронный ресурс]. – URL: <http://diy3dprinting.blogspot.com/2015/03/making-induction-heated-extruder.html> (дата обращения: 26.08.2017).
29. Tan W.S. Proof of concept: application of induction heating to 3D print low melting point metal alloy: final project summary report 2015 / UNSW@ADFA. – 2015. – P. 1–13.
30. Себко В.В. Бесконтактный комплексный многопараметровый вихретоковый контроль образцов слабоферромагнитных и ферромагнитных жидких сред // *Электротехника і Електромеханіка.* – 2011. – № 1. – С. 53–57.
31. Себко В.В. Вихретоковый многопараметровый метод контроля плоских изделий авиационного оборудования // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2010. – № 5 – С. 83–90.
32. Себко В.В. Воздействие температуры на магнитную проницаемость и удельное электрическое сопротивление цилиндрического изделия // *Электротехника і Електромеханіка.* – 2003. – № 3 – С. 44–47.
33. Singh R., Singh S. Process capability analysis of MMC prepared by combining FDM, vacuum moulding and stir casting // *Asian J. Eng. Appl. Technol.* – 2013. – Vol. 2, № 2. – P. 69–72.

## References

1. D. Ding et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 811, no. 4, pp. 465–481.
2. A. Addison, J. Ding, F. Martina, H. Lockett, S. Williams Manufacture of complex titanium parts using wire + arc additive manufacture 2. *As Deposited Mechanical Properties, Titan. Eur.*, 2015. URL: <http://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/AddisonAdrianTiEU2015-3DAddi.pdf> (accessed 21 August 2017).
3. Bonaccorso F., Cantelli L., Muscato G. Arc welding control for shaped metal deposition process. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, vol. 44, pp. 11636–11641.
4. D. Ding et al. Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part. *Comput Aided Des.*, 2016, no. 73, pp. 66–75.
5. X. Xiong et al. Metal direct prototyping by using hybrid plasma deposition and milling. *Journal Mater Process Technol.*, 2009, no. 209, pp. 124–130.
6. H. Wang, W. Jiang, M. Valant, R. Kovacevic. Micro plasma powder deposition as a new solid freeform fabrication process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2003, no. 217, pp. 1641–1650.
7. Jhavar S., Jain N., Paul C. Development of micro-plasma transferred arc ( $\mu$ -pta) wire deposition process for additive layer manufacturing application. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, no. 5, pp. 1102–1110.
8. Jhavar S., Jain N. Development of micro-plasma wire deposition process for layered manufacturing. *Daaam international scientific book*, 2014, no. 20, pp. 239–256.
9. F. Martina, J. Mehnert, S.W. Williams, P. Colegrove, F. Wang. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal Mater. Process. Technol.*, 2012, vol. 212, no. 6, pp. 1377–1386.
10. S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove. Wire arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 2015, vol. 32, iss. 7, pp. 641–647.
11. Fronius CMT. URL: <http://tctena.ru/texnologii/cmt> (accessed 21 August 2017).
12. Fronius CMT. URL: <https://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-2BF524E9->

50258D/fronius\_international/hs.xsl/79\_17482\_ENG\_HTM L.htm (accessed 21 August 2017).

13. J. Gu, B. Cong, J. Ding, S.W. Williams, Y. Zhai. Wire+arc additive manufacturing of aluminium. *Proc. 25th Int. Solid Freeform Fabrication Symp., August 2014. University of Texas*, 451–458. Dutta. *Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition. Advanced Materials & Processes*, 2011, pp. 33–36.

14. Prado-Cerqueira J.L., Diéguez J.L., Camacho A.M. Preliminary development of a wire and arc additive manufacturing system (WAAM). *Procedia Manufacturing*, 2017, no. 13, pp. 895–902.

15. Cong B., Ding J., Williams S.W. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al–6.3%Cu alloy. *Journal Adv. Manuf. Technol.*, 2015, no. 76, pp. 1593–1606.

16. Dutta. Additive manufacturing by direct metal deposition. *Advanced materials & processes*, 2011, pp. 33–36.

17. L. Thivillon, P. Bertrand, B. Laget, I. Smurov. Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactors components. *Journal Nucl. Mater.*, 2009, vol. 385, no. 2, pp. 236–241.

18. Yan J., Battiatto I., Fadel G. Planning the process parameters during direct metal deposition of functionally graded thin-walled parts based on a 2D model. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, 2016, pp. 185–186.

19. Ding Y., Dwivedi R., Kovacevic R. Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition (LBDMD) system: a case on building revolved parts. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, no. 44, pp. 67–76.

20. Ding Y., Warton J., Kovacevic R. Development of sensing and control system for robotized laser-based direct metal addition system. *Addit. Manuf.*, 2016, no. 10, pp. 24–35.

21. Ding Y., Kovacevic R. Feasibility study on 3-d printing of metallic structural materials with robotized laser-based metal additive manufacturing. *JOM*, 2016, pp. 1–6.

22. Zeković S., Kovacević R. Modeling of laser-based direct metal deposition. *Tribology in industry*, 2006, vol. 28, no. 1, 2, pp. 9–14.

23. Additivnye tekhnologii [Additive technologies]. URL: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am/> (accessed 21 August 2017).

24. Sciaky: 'Sciaky's metal additive manufacturing. URL: [http://www.sciaky.com/documents/Sciaky\\_Direct\\_Manufacturing.pdf](http://www.sciaky.com/documents/Sciaky_Direct_Manufacturing.pdf). (accessed 16 June 2017).

25. Cheng B., Chou K. Geometric consideration of support structures in part overhang fabrications by electron beam additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, 2015, no. 69, pp. 102–111.

26. Baufeld B. Electron Beam Additive Manufacturing at the Nuclear AMRC. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2016, vol. 22, no. 5–6, pp. 7–13.

27. Kompaniia The Virtual Foundry. URL: <https://www.thevirtualfoundry.com/> (accessed 30 August 2017).

28. Sait razrabotchika [website of the developer]. URL: <http://diy3dprinting.blogspot.com/2015/03/making-induction-heated-extruder.html> (accessed 26 August 2017).

29. Tan W.S. Proof of concept: application of induction heating to 3D print low melting point metal alloy: final project summary report 2015. UNSW@ADFA, 2015, pp. 1–13.

30. Sebko V.V. Beskontaktnyi kompleksnyi mnogoparametrovyi vikhretokovy kontrol' obraztsov slaboferromagnitnykh i ferromagnitnykh zhidkikh sred [Non-contact complex multiparameter vikhretokovy control of samples of slaboferromagnitny and ferromagnetic liquid environments]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 2011, no. 1, pp. 53–57.

31. Sebko V.V. Vikhretokovy mnogoparametrovyi metod kontrolya ploskikh izdelii aviatsionnogo oborudovaniia [Vikhretokovy multiparameter control method of flat articles of the aviation equipment]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 5, pp. 83–90.

32. Sebko V.V. Vozdeistvie temperatury na magnitnuiu pronitsaemost' i udel'noe elektricheskoe soprotivlenie tsilindricheskogo izdeliia [Impact of temperature on magnetic permeability and specific electric resistance of a cylindrical product]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 2003, no. 3, pp. 44–47.

33. Singh R., Singh S. Process capability analysis of MMC prepared by combining FDM, vacuum moulding and stir casting. *Asian J. Eng. Appl. Technol.*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 69–72.

Получено 13.08.2018

#### Об авторах

**Осколков Александр Андреевич** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: [oskolkov.w@yandex.ru](mailto:oskolkov.w@yandex.ru).

**Матвеев Евгений Владимирович** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: [zhenyamatveev@yandex.ru](mailto:zhenyamatveev@yandex.ru).

**Безукладников Игорь Игоревич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: [correcor@at.pstu.ru](mailto:correcor@at.pstu.ru).

**Трушников Дмитрий Николаевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: [trdimitr@yadex.ru](mailto:trdimitr@yadex.ru).

**Кротова Елена Львовна** (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: [lenkakrotova@yandex.ru](mailto:lenkakrotova@yandex.ru).

**About the authors**

**Alexander A. Oskolkov** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: oskolkov.w@yandex.ru.

**Evgenii V. Matveev** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: zhenyamatveev@yandex.ru.

**Igor I. Bezukladnikov** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor,

Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: corrector@at.pstu.ru.

**Dmitrii N. Trushnikov** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Engineering Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: trdimitr@yandex.ru.

**Elena L. Krotova** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lenkakrotova@yandex.ru.