

## НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ТЕХНОЛОГИЕЙ xBeam 3D Metal Printing (Обзор)\*

Д. В. КОВАЛЬЧУК, В. И. МЕЛЬНИК, И. В. МЕЛЬНИК, Б. А. ТУГАЙ  
ЧАО «НВО «Червона Хвиля». 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 15.  
E-mail: dv\_kovalchuk@yahoo.com

Новая технология под названием xBeam 3D Metal Printing разработана ЧАО «НВО «Червона Хвиля» для решения наиболее важных технических и экономических проблем существующих методов аддитивного производства. Она основана на применении профильного электронного луча в качестве источника нагрева и использовании проволоки в качестве расходного материала. Ключевым элементом нового технического решения является специальная низковольтная газоразрядная электронная пушка, в которую вдоль оси встроена направляющая для подачи расходной проволоки. Уникальный полой конический электронный луч, генерируемый такой пушкой, создает исключительные физические условия для расплавления расходного материала и его послойного осаждения, что обеспечивает не только возможности точно контролируемого и повторяемого производства изделий, но и открывает возможности создания новых технологий и материалов. К настоящему времени технология xBeam 3D Metal Printing успешно прошла проверку в лабораторных и практических условиях на экспериментальном xBeam 3D-принтере. Библиогр. 16, рис. 13.

*Ключевые слова:* электронный луч, газоразрядные электронно-лучевые пушки, аддитивное производство металлов, 3D печать металлов

Аддитивное производство (Additive Manufacturing) в течение последнего десятилетия стало одним из важнейших направлений развития мировой промышленности. Технологии аддитивного производства открывают возможности быстрого и точного изготовления изделий по индивидуальным требованиям заказчика, что является давней мечтой любого производителя. Благодаря этой уникальной способности аддитивное производство, наряду с роботизацией и информационными технологиями, даже называют третьей промышленной революцией [1–3].

Аддитивное производство определяют как процесс изготовления изделия согласно трехмерной модели путем послойного соединения материалов с помощью автоматического компьютерного управления (CAD/CAM). Технологии аддитивного производства также называют промышленной 3D печатью, а оборудование для их реализации 3D-принтерами [4–6].

Особенное значение имеет аддитивное производство изделий из металлов, так как именно металлы по-прежнему являются основным промышленным конструкционным материалом [7].

К настоящему времени разработан целый ряд различных технологий аддитивного производства металлов, различающихся по:

– расходному материалу — порошок, проволока или порошок в смеси со связующим веществом;

– источнику нагрева — лазер, электронный луч, плазма, электрическая дуга и т. п.;

– методу формирования слоев — выборочное расплавление (спекание) подготовленного слоя порошка (powder bed), прямое осаждение порошка или проволоки на предыдущий слой («direct energy deposition») или инъекционное литье (binder jetting) [4, 5, 8].

Но, несмотря на постоянные исследования и многочисленные эксперименты, разработанные к настоящему времени технологии аддитивного производства по-прежнему имеют ряд недостатков, сдерживающих их широкое внедрение в промышленность. Среди основных недостатков разработанных к настоящему времени аддитивных технологий можно выделить следующие [9, 10]:

- сложное и дорогое оборудование;
- дорогие исходные материалы;
- ограниченные размеры изготавливаемых трехмерных изделий и низкая производительность (для технологий с использованием порошка в качестве исходного материала);
- толстые стенки изделий и грубая поверхность изготавливаемых трехмерных изделий (для технологий с использованием проволоки в качестве исходного материала);
- остаточная пористость, неравномерная структура, остаточные напряжения и деформации;
- необходимость в дополнительных операциях;

\* По материалам доклада на VIII Международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 10–16 сентября 2017 г., г. Одесса.

– сложное управление, требующее высококвалифицированных кадров.

Все это в итоге приводит к высокой себестоимости изделий, что резко ограничивает действительно широкое распространение аддитивных технологий в мировом промышленном производстве [11].

Специалистами ЧАО «НВО «Червона Хвиля» разработан новый способ изготовления трехмерных объектов и устройство для его реализации [12], в котором изделие формируется путем послойного осаждения на основу расходуемого материала, подаваемого в зону осаждения, перемещаемую по заданной траектории, там расплавляется с помощью электронного луча и потом затвердевает по мере выхода из зоны нагрева, образуя наплавленный слой материала. Источником нагрева в указанном способе и устройстве является газоразрядная электронно-лучевая пушка с кольцевым катодом, непосредственно генерирующая электронный луч в форме полого перевернутого конуса.

Новая технология, получившая название xBeam 3D Metal Printing, согласно общепринятой классификации различных типов аддитивных технологий относится к процессам прямого осаждения (direct energy deposition), в которых сфокусированная тепловая энергия используется для расплавления материалов при их осаждении [4, 5].

Технология xBeam 3D Metal Printing по мнению как разработчиков, так и ряда экспертов в области аддитивного производства, способна решить многие технические и технологические проблемы существующих аддитивных технологий, прежде всего устранить противоречие между точностью изготовления и высокой производительностью, и обеспечить за счет этого кардинальное снижение себестоимости производства трехмерных металлических изделий.

В основе разработки нового способа лежит уникальная способность газоразрядных электронно-лучевых пушек генерировать профильные электронные пучки путем прямой эмиссии из катода без применения дополнительных отклоняющих и фокусирующих средств [13]. Также для реализации указанной технологии и достижения положительных технологических и экономических эффектов важны другие характерные возможности газоразрядных электронно-лучевых пушек, такие как способность стабильно работать в широком диапазоне остаточных давлений в рабочей камере ( $10^{-2} \dots 10$  Па), в том числе в парциальном давлении различных газов, способность генерировать и формировать электронный луч при относительно невысоком ускоряющем напряжении (от 5 кВ), простая и компактная конструкция, удобное обслуживание, долгий срок служ-

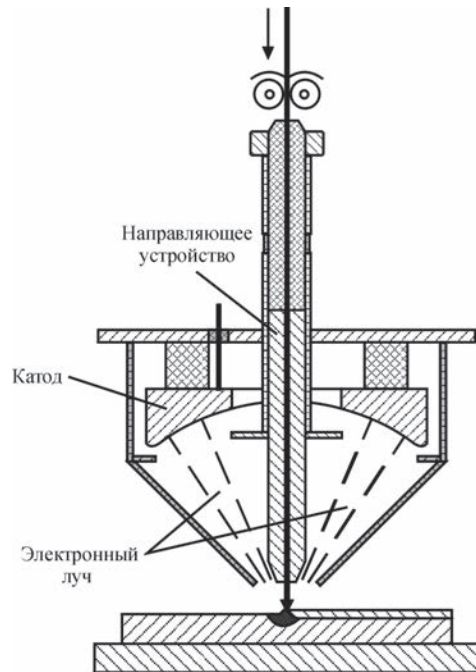


Рис. 1. Схема устройства для реализации технологии xBeam 3D Metal Printing

бы катода, простое и гибкое управление технологическими параметрами.

Основными отличительными признаками способа и устройства, лежащими в основе технологии xBeam 3D Metal Printing, являются следующие:

- для создания ванны расплава на подложке и расплавления расходуемого материала используется электронный луч в форме полого перевернутого конуса, генерируемый специальной газоразрядной электронно-лучевой пушкой;

- расходуемый материал в виде проволоки подается через направляющее устройство точно в центр ванны расплава на подложке соосно с указанным полым коническим электронным лучом;

- указанные специальная газоразрядная электронная пушка и направляющее устройство для подачи расходуемого материала объединены в один общий технологический модуль (рис. 1).

Указанная конфигурация электронного луча, взаимное расположение этого луча и подаваемого расходуемого материала по отношению к подложке создают ряд критически важных физических и металлургических условий осаждения расплавленного материала и образования наплавленного валика, и тем самым в результате обеспечивается контролируемое формирование очередного слоя с определенными геометрическими параметрами и требуемой структурой осажденного материала. В первую очередь необходимо отметить следующие технологические особенности xBeam 3D Metal Printing.

Круглая форма ванны расплава и вертикальная подача расходуемого материала точно в центр ванны расплава (рис. 2) обеспечивают отсутствие затененных зон на подложке (что предотвраща-

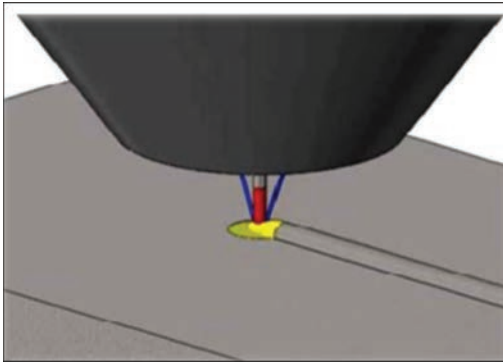


Рис. 2. Схематическое изображение процесса осаждения

ет возникновение пористости и несплавлений в осажденных слоях), возможность формирования валика шириной, лишь слегка превышающей диаметр расходуемой проволоки (что позволяет изготавливать изделия с тонкими и точными стенками), общий высокий КПД процесса за счет эффективного использования всей мощности, подаваемой в зону осаждения.

Такая осесимметричная конфигурация тепловых потоков и массопереноса значительно упрощает математическое моделирование процесса, что очень важно для улучшения управления технологическими операциями с целью получения заданных свойств материала [14].

Расходуемый материал полностью охватывается точно и гибко регулируемым потоком энергии (рис. 3), что обеспечивает абсолютно осесимметричный и равномерный предварительный подогрев и контролируемое расплавление расходуемого материала. Важно подчеркнуть, что полая конфигурация луча, получаемая без применения сканирования, обеспечивает действительно постоянно равномерный нагрев как проволоки, так и подложки. Это свойство, кроме всего, открывает также интересные технологические возможности, например, использование сложных вариантов расходуемого материала, таких как порошковая проволока или связка из нескольких проволок различных материалов.

Неразрывный стационарный массоперенос жидкого металла с конца оплавливаемой расходуе-

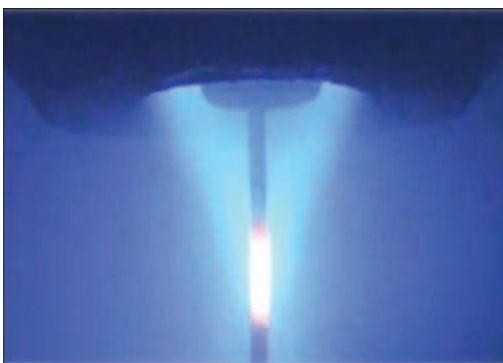


Рис. 3. Воздействие полого конического электронного луча на расходуемую проволоку

мой проволоки на подложку надежно удерживается силами поверхностного натяжения (рис. 4). Как только жидкий металл, образующийся на конце подаваемой проволоки, касается жидкого металла в ванне на подложке, происходит немедленное образование перешейка между концом проволоки и подложкой, удерживаемого силами поверхностного натяжения, по которому происходит плавное и равномерное перетекание жидкого металла на подложку, на скорость которого также влияет сила всемирного тяготения. Жидкий металл, достигший подложки, немедленно растекается в пределах границ существующей в данный момент времени ванны расплава, которая определяется границами зоны воздействия электронного луча на подложку, за счет полной адгезии между однородными жидкостями. Как только жидкий металл достигает твердого металла на подложке, он немедленно затвердевает. Таким образом реализуется надежный и в то же время гибкий механизм формирования наплавленного валика заданной ширины, и, соответственно, толщины стенки изготавливаемого трехмерного изделия.

Отдельно стоит отметить, что указанное свойство неразрывного массопереноса жидкого металла с конца проволоки на подложку обеспечивает реализуемость технологии xBeam 3D Metal Printing в условиях невесомости, так как силы поверхностного натяжения там действуют так же, как и на Земле. Потребность в аддитивном производстве металлических деталей в условиях невесомости на борту космических аппаратов, а также в миссиях по освоению Луны и Марса, постоянно подчеркивается в планах соответствующих организаций и компаний, таких как NASA, ESA, SpaceX и других [15, 16].

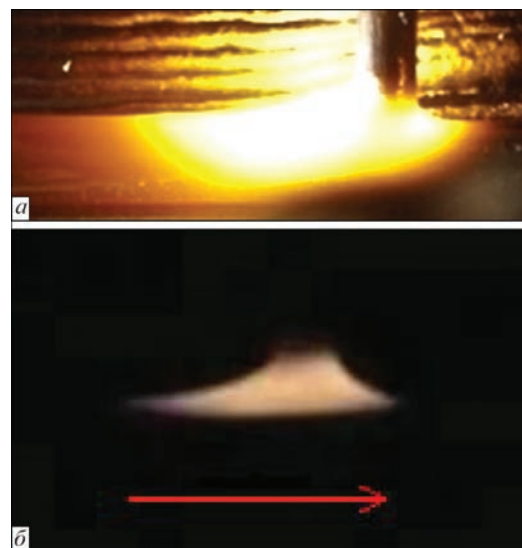


Рис. 4. Растекание жидкого металла с конца проволоки по подложке: а — прямая фотосъемка, б — фотосъемка через темное стекло



Чрезвычайно важным свойством технологии xBeam 3D Metal Printing является существенно меньшая концентрация мощности источника нагрева, электронного луча, генерируемого низковольтной газоразрядной электронно-лучевой пушкой, по сравнению с источниками нагрева всех других известных в настоящее время процессов аддитивного производства металлов. Как правило, разработчики 3D-принтеров по металлу в качестве источников нагрева применяют устройства (электронно-лучевые пушки термоионного типа, лазеры, плазмотроны), разработанные для реализации процессов сварки, где минимально возможный фокус (как правило от десятков до сотен микрон) и высокая концентрация мощности (до  $10^5 \dots 10^7$  кВт/см<sup>2</sup>) являются важными технологическими параметрами. В аддитивном производстве чрезмерная концентрация мощности может привести к слишком глубокому проплавлению предыдущих слоев вплоть до образования дефектов в изделии. Поэтому мощность высокой концентрации приходится распределять по поверхности за счет сканирования с высокой частотой, что, во-первых, является сложной технической задачей, а во-вторых, нарушает непрерывность процесса формирования осажденного слоя.

Специальная газоразрядная электронно-лучевая пушка, разработанная для реализации технологии xBeam 3D Metal Printing, генерирует электронный

луч при низком ускоряющем напряжении до 20 кВ, что при уровне мощности до 20 кВт и минимальном фокусе диаметром около 1,5 мм обеспечивает очень мягкий и плавный нагрев обрабатываемых поверхностей без применения сканирования, при этом концентрация мощности в фокусе электронного луча не превышает  $10^3$  кВт/см<sup>2</sup>.

Воздействие такого луча на поверхность позволяет образовывать на ней весьма мелкую ванну расплава, достаточную лишь для создания условий растекания поступающего жидкого металла в пределах жидкой фазы на поверхности и минимально воздействующую на материал подложки.

Поддержание мелкой ванны расплава на подложке в процессе осаждения (рис. 5) обеспечивает более высокую скорость охлаждения и быструю кристаллизацию расплавленного материала подложки и наплавленного материала, благодаря чему достигается лучшая структура полученного металла.

Меньшее количество материала, пребывающего в жидкой фазе в единицу времени, существенно снижает потери легирующих элементов из-за испарения, что особенно актуально для многих сплавов титана, ниобия и других тугоплавких металлов. Так, исследования изменения химического состава титанового сплава Ti-6Al-4V в процессе осаждения по технологии xBeam 3D Metal Printing показали незначительное снижение содержания алюминия с 5,91 % в исходной проволоке до 5,72...5,79 % (в зависимости от параметров процесса) в осажденном материале.

Сниженная концентрация мощности на поверхности осаждения существенно уменьшает температурные градиенты на подложке и в наплавленных ранее слоях, что обеспечивает уменьшение остаточных напряжений и деформаций.

Для демонстрации положительного эффекта, обеспечиваемого применением низковольтного электронного луча, был проведен эксперимент, в котором в качестве подложки вместо традиционной толстой плиты использовалась проволока, концы которой закреплялись струбцинами. В качестве наплавленного материала использовалась проволока из титанового сплава Ti-6Al-4V диаметром 3 мм, в качестве подложки — проволока диаметром 3,2 мм из титана VT1-00.

Установленная мощность электронно-лучевой пушки составляла 3 кВт при ускоряющем напряжении 15 кВ. Проволоку подавали со скоростью 14 мм/с, подложку перемещали также со скоростью 14 мм/с. Предварительный прогрев подложки не применялся. В результате эксперимента была построена ровная стенка (рис. 6), по основным параметрам (ширина и высота стенки, толщина слоя) соответствующая такой же стенке, нанесенной на массивную подложку, но при этом полностью отсутствовало остаточное искривление (коробление)



Рис. 5. Макрошлиф металла зоны термического влияния при осаждении проволоки: а — из титана VT1-0 диаметром 1,6 мм на плиту из титана VT1-0; б — из титанового сплава Ti-6Al-4V диаметром 3,0 мм на плиту из сплава Ti-6Al-4V

подложки, что практически неизбежно при использовании массивной плиты [14].

Использование этого свойства может быть весьма эффективным в случае построения изделия, в котором базовая плита не является его частью и должна быть полностью удалена механической обработкой.

Важной особенностью технологии xBeam 3D Metal Printing является небольшое количество базовых параметров процесса и простота управления ими, что крайне важно для надежного обеспечения повторяемости и повышения общей эффективности производства. Основными параметрами процесса являются:

- мощность электронно-лучевой пушки;
- величина зазора  $Z$  между выходным отверстием для проволоки и подложкой (рис. 7);
- скорость подачи расходуемой проволоки;
- линейная скорость перемещения подложки (зоны осаждения).

Имеется в виду, что в одном процессе используется проволока одного диаметра.

Ключевым параметром, определяющим основные характеристики процесса формирования трехмерного изделия, является именно зазор  $Z$  между выходным отверстием для проволоки и подложкой.

Величина зазора  $Z$  определяет распределение мощности электронного луча между расходуемой проволокой и подложкой, а также ширину зоны воздействия электронного луча на подложку (т. е. ширину ванны расплава на подложке), практически соответствующую ширине наплавляемого валика. Таким образом, при постоянной мощности электронного луча поддержание стабильной величины зазора  $Z$  обеспечивает стабильную скорость осаждения, т. е. постоянную производительность процесса осаждения.

Важным достоинством технологии является то, что стабильность этого ключевого параметра процесса обеспечивается простым соблюдением постоянной геометрической конфигурации компонентов оборудования, что легко реализуется механическими средствами и также легко контролируется.

Далее, при постоянных мощности электронного луча и зазора  $Z$ , т. е. при постоянной производительности осаждения и ширине получаемого наплавочного валика, высота осаждаемого слоя может меняться путем изменения линейной скорости перемещения подложки, так как при этом то же количество поступающего жидкого металла будет распределяться на другой площади прямо пропорционально изменению линейной скорости перемещения подложки.

На рис. 8 показаны стенки с разными параметрами осажденных слоев, сформированные из проволоки одинакового диаметра.



Рис. 6. Образец, полученный с использованием проволоки в качестве подложки для осаждения: *a* — вид сбоку; *b* — сверху; *v* — снизу

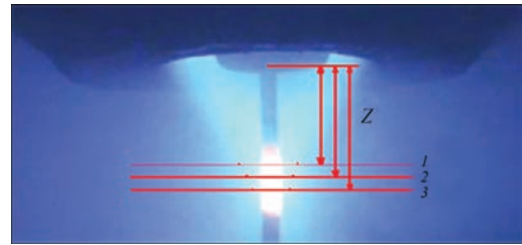


Рис. 7. Зазор  $Z$  между выходным отверстием для проволоки и подложкой



Рис. 8. Стенки, сформированные из проволоки диаметром 2 мм: *a* — нержавеющая сталь 304L, толщина слоя 0,6 мм; *b* — титановый сплав Ti-6Al-4V, толщина слоя 1,2 мм

Таким образом, контроль всего нескольких простых параметров оборудования обеспечивает гибкое управление формированием трехмерного изделия и гарантирует повторяемость основных параметров осаждения каждого слоя (рис. 9).

При этом при определении полного набора управляемых параметров процесса также могут приниматься во внимание и соответствующим образом контролироваться параметры вакуума, тип рабочего газа газоразрядной электронно-лучевой пушки, температура подложки для осаждения, соотношение ускоряющего напряжения и тока луча при одной и той же мощности.

Существенным фактором выбора правильной стратегии формирования трехмерного изделия является выбор диаметра расходуемой проволоки. Технология xBeam 3D Metal Printing изначально ориентирована главным образом на использование стандартной промышленной проволоки диаметром от 1 до 3 мм. Это является важным аргументом в пользу повышения экономической





Рис. 9. Стакан из титана марки Ti-Grade 4 (а), изготовленный по технологии xBeam 3D Metal Printing (б) проволокой диаметром 3 мм, наложенной в 50 слоев с производительностью около 2,5 кг/ч

эффективности технологии, так как стандартная проволока всегда дешевле специально заказываемой. Кроме того, цена проволоки существенно снижается с увеличением ее диаметра. При этом очевидно, что формирование тонких стенок с меньшей шероховатостью удобнее выполнять проволокой меньших диаметров.

Особенно важным становится оптимальный выбор диаметра расходуемой проволоки при необходимости изготовления изделий с толстыми стенками,

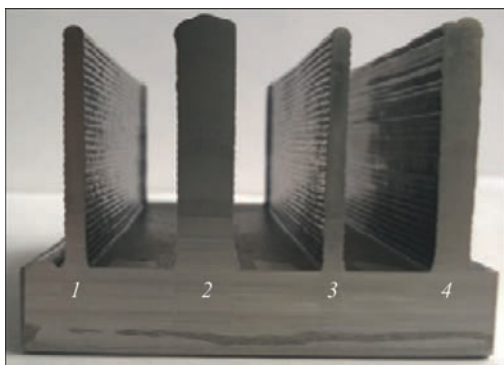


Рис. 10. Стенки различной толщины, сформированные по технологии xBeam 3D Metal Printing проволокой диаметром 2 мм из титанового сплава Ti-6Al-4V с производительностью около 1,1 кг/ч: стенки 1 и 3 за один проход, толщина 3,1...3,3 мм; 2 — три прохода, толщина 10,0...10,3 мм, 4 — два прохода, толщина 6,0...6,2 мм

которые превышают предельную ширину одного наплавочного валика. В этом случае применяется стратегия осаждения нескольких параллельных наплавочных валиков с некоторым перекрытием между соседними проходами, как показано на рис. 10.

Макроструктура толстой стенки, сформированной за несколько параллельных проходов, показана на рис. 11.

Одной из серьезных технологических проблем существующих процессов аддитивного производства металлов является образование столбчатой структуры с направлением роста вверх, когда столбчатые зерна прорастают через все наплавленные слои. Такая структура является весьма нежелательной, так как она приводит к неравномерности свойств в различных направлениях. Технология xBeam 3D Metal Printing, благодаря гибким возможностям управления распределением мощности и динамичному процессу осаждения, что дает возможность обеспечить весьма высокие скорости кристаллизации и последующего охлаждения, продемонстрировала возможность предотвращения образования столбчатой структуры в трехмерных металлических изделиях.

На рис. 12 показана макроструктура образца титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного из проволоки диаметром 2 мм с производительностью около 0,9 кг/ч. Получена структура литого типа с зернами, по форме близкими к равноосным. При этом зерна прорастают через соседние наплавленные слои (не более двух), что подтверждает отсутствие каких-либо межслойных особенностей, сегрегаций и дефектов. Продолжаются исследования механических свойств, а также влияния параметров процесса на структуру и свойства материалов, получаемых послойным осаждением по технологии xBeam 3D Metal Printing.

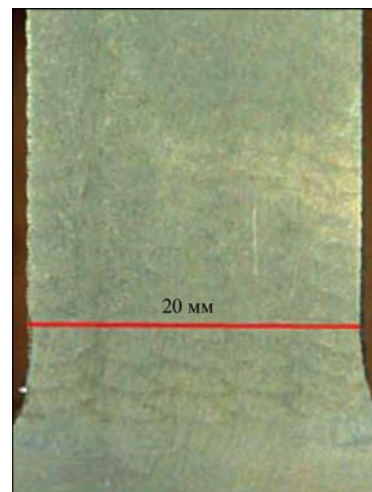


Рис. 11. Макроструктура толстой стенки, сформированной за пять параллельных проходов. Титановый сплав Ti-6Al-4V, проволока диаметром 3 мм, производительность около 2 кг/ч

В процессе пробного изготовления реальных промышленных деталей из титановых сплавов была проведена оценка прямых и сопутствующих эксплуатационных расходов, а также выход годного при производстве изделий по технологии xBeam 3D Metal Printing. Полученные оценочные данные показали операционную себестоимость для титановых сплавов на уровне 40 дол. США за 1 кг готового изделия, при этом учитывалась заключительная механическая обработка для приведения детали к окончательному виду. Это соответствует показателю менее 0,01 дол. США за 1 см<sup>3</sup> осажденного материала, что является наименьшим показателем среди всех существующих в настоящее время процессов аддитивного производства металлов.

Для реализации технологии xBeam 3D Metal Printing, изучения ее возможностей и отработки основных технологических приемов была разработана и построена пилотная установка xBeam-01 (рис. 13). Установка отличается простой и компактной конструкцией — для ее эксплуатации достаточно 10 м<sup>2</sup> полезной площади, т. е. она может быть установлена даже в университетской лаборатории. Загрузка расходуемого материала может производиться без развакуумирования рабочей камеры, что очень удобно для проведения исследовательских работ. Особенности эксплуатации газоразрядной электронно-лучевой пушки позволяют осуществлять процесс в низком вакууме – в пределах 10<sup>-2</sup>...10<sup>-1</sup> мбар, поэтому установка укомплектована одним механическим форвакуумным насосом. Благодаря применению низкого ускоряющего напряжения в электронной пушке (10...15 кВ) повышается безопасность персонала от воздействия рентгеновского излучения из камеры.

Ниже приведены технические характеристики пилотной установки xBeam-01.

Полезный размер (Д×Ш×В), мм .....	300×300×300
Система позиционирования .....	трехосевая, линейная
Максимальная мощность, кВт .....	20
Предельное ускоряющее напряжение, кВ .....	20
Максимальное энергопотребление, кВт .....	30
Предельный вакуум, Па .....	5·10 <sup>-1</sup>
Рабочий вакуум, Па .....	10...50
Возможные виды расходуемого материала .....	проволока, прутки, порошковая проволока
.....	диаметром 1...3 мм
Потребление рабочего газа (гелий), при 0,1 МПа, л/мин .....	2,5
Рекомендуемое рабочее пространство (Ш×Д×В), мм .....	3300×3000×2400
Общая масса, кг, примерно .....	1500

В ходе экспериментальных работ на установке xBeam-01 к настоящему времени была достигнута производительность осаждения 700 см<sup>3</sup>/ч, что для титановых сплавов соответствует более 3 кг/ч, при этом точность изготовления трехмерных из-

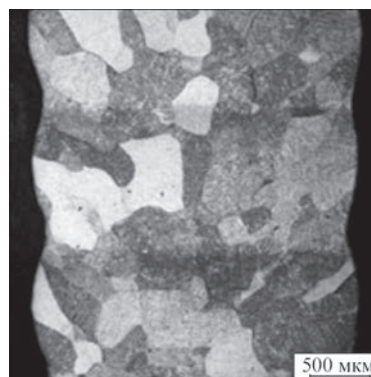


Рис. 12. Макроструктура образца титанового сплава Ti-6Al-4V

делий и шероховатость поверхности требуют последующей чистовой обработки не более 1 мм на каждой стенке, что намного лучше существующих аналогов. Для достижения такой производительности хватило номинальной мощности электронно-лучевой пушки на уровне всего около 7 кВт. Это позволяет ожидать достижения производительности не менее 2000 см<sup>3</sup>/ч при максимальной номинальной мощности пушки, что соответствует максимальным показателям на рынке аддитивных технологий, продемонстрированных на настоящий момент.

Продолжается разработка автоматического программного управления технологическим процессом, а также испытания средств наблюдения и анализа его параметров и оборудования.

На базе экспериментальной эксплуатации пилотной установки и проводимых усовершенствований специалисты ЧАО «НВО «Червона Хвиля» разрабатывают прототипы серийных установок лабораторного и промышленного класса.

Новая электронно-лучевая технология аддитивного производства xBeam 3D Metal Printing и 3D-принтеры семейства xBeam обещают стать надежным и эффективным оборудованием для быстрого и высококачественного производства



Рис. 13. Установка xBeam-01

сложных деталей и для научно-исследовательских работ за счет использования дешевых стандартных промышленных материалов (проволоки) в качестве расходного материала, минимальных потерь материала при окончательной обработке, бездефектной структуры, простой и безопасной работы, разумной цены оборудования.

### Список литературы/References

1. A third industrial revolution. *The Economist*. <http://www.economist.com/node/21552901>.
2. Is 3D Printing the Next Industrial Revolution? *TechCrunch*, <https://techcrunch.com/2016/02/26/is-3d-printing-the-next-industrial-revolution>.
3. (2013) Additive manufacturing market outlook. Value chain-market size-key players-business models. *Additive Manufacturing. A game changer for the manufacturing industry?* Strategy Consultants GmbH, Roland Berger, pp. 19–24.
4. ISO/ASTM 52900:2015 (ASTM F2792). *Additive manufacturing – General principles – Terminology*.
5. *Wohlers Report 2017. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. ISBN 978-0-9913332-3-3.
6. What is Additive Manufacturing? <http://additivemanufacturing.com/basics>.
7. Andrew Zaleski (2015) Here's Why 3D Printing Needs More Metal. *Fortune*, **11**.
8. *3D Printing Processes: The Free Beginner's Guide*. <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes>.
9. Chaplais Ch. (2016) 7 Challenges to a Wider Adoption of Additive Manufacturing in the Industry. *Manufacturing Transformation*. <http://www.aprison.com/blog/2016/07/7-challenges-to-a-wider-adoption-of-additive-manufacturing-in-the-industry-part-1>.
10. Gao Wei, Zhang Yunbo, Ramanujan Devarajan et al. (2015) The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, **69**, 65–89.
11. Douglas S. Thomas, Stanley W. Gilbert (2014) *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing*. NIST Special Publication 1176.
12. Ковальчук Д. В., Мельник В. Г., Мельник І. В., Тугай Б. А. (2016) *Спосіб виготовлення тривимірних об'єктів та пристрій для його реалізації*. Україна, Пат. 112682.
13. Kovalchuk D., Melnyk V, Melnyk I, Tugai B. (2016) Prospects of Application of Gas-Discharge Electrons Beams Guns in Additive Manufacturing. *Electrotechnics and Electronics (E+E)*, **5-6**, 36–42.
14. Махненко О. В., Миленин А. С., Великоиваненко Е. А. и др. (2017) Моделирование температурных полей и напряженно-деформированного состояния малого трехмерного образца при его послойном формировании. *Автоматическая сварка*, **3**, 11–19.
15. Ghidini T. (2013) An Overview of Current AM Activities at the European Space Agency. *3D Printing & Additive Manufacturing – Industrial Applications. Global Summit 2013* – London, UK.
16. Clinton R. G. Jr. (2017) NASA Marshall Space Flight Center Additive Manufacturing: Rocket Engines and In Space Manufacturing. *2nd International Symposium Additive Manufacturing. February 8-9, 2017, Dresden, Germany*.

Д. В. Ковальчук, В. І. Мельник, І. В. Мельник, Б. А. Тугай

ПАТ «НВО «Червона Хвиля».  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 15.  
E-mail: dv\_kovalchuk@yahoo.com

### НОВІ МОЖЛИВОСТІ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА З ТЕХНОЛОГІЄЮ xBeam 3D Metal Printing (Огляд)

Нова технологія під назвою xBeam 3D Metal Printing розроблена ПАТ «Червона Хвиля» для вирішення найбільш важливих технічних і економічних проблем існуючих методів адитивного виробництва. Вона заснована на застосуванні профільного електронного променя в якості джерела нагріву і використанні дроту в якості матеріалу, що витрачається. Ключовим елементом нового технічного рішення є спеціальна низьковольтна газорозрядна електронна гармата, в яку уздовж осі вбудована напрямна для подачі дроту, що витрачається. Унікальний порожнистий конічний електронний промінь, що генерується такою гарматою, створює виняткові фізичні умови для розплавлення матеріалу, що витрачається і його пошарового осадження, що забезпечує не тільки можливості точно контрольованого і повторюваного виробництва виробів, але і відкриває можливості створення нових технологій і матеріалів. До теперішнього часу технологія xBeam 3D Metal Printing успішно пройшла перевірку в лабораторних і практичних умовах на експериментальному xBeam 3D-принтері. Бібліогр. 16, рис. 13.

*Ключові слова:* електронний промінь, газорозрядні електронно-променеви гармати, адитивне виробництво металів, 3D друк металів

D. V. Kovalchuk, V. I. Melnik, I. V. Melnik and B. A. Tugai

JSC «NVO «Chervona Hvilya».  
15 Kazimir Malevich Str., 03150, Kiev, Ukraine  
E-mail: dv\_kovalchuk@yahoo.com

### NEW POSSIBILITIES OF ADDITIVE MANUFACTURING USING xBeam 3D Metal Printing Technology (REVIEW)

A new technology called xBeam 3D Metal Printing was developed by JSC «NVO «Chervona Hvilya» to solve the most important technical and economical problems of existing additive manufacturing methods. It is based on application of a profile electron beam as a heat source and wire as a consumable. The key element of the new technical solution is a special low-voltage gas-discharge gun, which is equipped along the axis with a guide for consumed wire feeding. A unique hollow cone electron beam, generated by such a gun, develops the exceptional physical conditions for consumed material melting and its layer-by-layer deposition that provides the possibilities of accurately controlled and repeatable manufacturing of the products as well as reveals new abilities for development of new technologies and materials. Up to the moment xBeam 3D metal Printing has been successfully tested under laboratory and practice conditions on experimental xBeam 3D-printer. Ref. 16, 13 Fig.

*Keywords:* electron beam, gas-discharge electron beam guns, additive manufacturing of materials, 3D metal printing

Поступила в редакцію 31.10.2017