

УДК 67.05

И.Ю. Бакеев, Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, И.В. Осипов, А.Г. Рау, Г.В. Семенов

Установка электронно-лучевого выращивания металлических изделий

Продемонстрированы научно-технические решения, реализованные при разработке установки электронно-лучевого выращивания (УЭЛВ) изделий путем электронно-лучевой наплавки металлической проволоки. Указаны отличительные черты разработанного подхода среди существующих аналогов аддитивных технологий.

Ключевые слова: электронно-лучевая установка, аддитивные технологии, трехмерная печать, электронно-лучевая наплавка.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-76-78

Повсеместный интерес к разработке и внедрению в производство технологий трехмерной печати в машиностроительной и прочих областях промышленности во многом обусловлен возможностью производства изделий сложной формы, не осложненно необходимостью корректировки технологического процесса для каждой детали, и экономичностью расходования материала [1]. К настоящему времени печать полностью функциональных металлических изделий осуществляется путем послойного наращивания материала расплавлением металлического порошка или проволоки как лазерным излучением [2], так и электронным лучом [3].

Применение конкретного способа определяется исключительно требованиями заказчика к механическим характеристикам готовой детали и качеству поверхности: технологии порошковой лазерной плавки присущи большая точность построения и меньшая шероховатость поверхности [4], в то время как при наплавке электронным лучом образуется непористый монолитный материал, механические свойства которого сравнимы с произведенными традиционными методами литья иковки, а в некоторых случаях даже превосходящие их [5].

Также стоит отметить, что электронный луч при трехмерной печати обладает рядом преимуществ над лазерным излучением, к которым относятся простота и точность позиционирования электронного пучка, достигаемая за счет отсутствия в устройстве отклонения механически подвижных частей; практически полное поглощение энергии электронного пучка в приповерхностном слое материала; нечувствительность электронного источника к запылению продуктами испарения.

Производительная электронно-лучевая печать металлических изделий, обеспечивающая высокие прочностные характеристики, обеспечивается технологией электронно-лучевого аддитивного производства (ЕВАМ) компании SciaCy [6], использующей послойное наплавление металлической проволоки. Компания специализируется на изготовлении крупногабаритных изделий с размерами, превышающими 1 м. Изменение местоположения точки наплавления в данных установках осуществляется двумя механическими системами: трехкоординатной системой перемещения электронного источника с воз-

можностью его поворота вокруг горизонтальной оси и системой поворота и вращения изготавливаемой детали. Наличие двух систем манипуляции электронным источником и печатаемым изделием в совокупности с необходимостью размещения источника наплавляемой проволоки внутри вакуумной камеры приводит к существенному ограничению рабочей области вакуумной камеры. Кроме того, такое количество степеней свободы перемещения для большинства требований при печати является избыточным, из-за чего для повышения точности печатаемого изделия целесообразен поиск более простого и надежного устройства позиционирования. Также имеющийся у коллектива настоящей работы научный и технический опыт разработки и применения плазменных источников электронов позволяет воспользоваться их преимуществами [7] перед термокатодными пушками при электронно-лучевом выращивании.

Результаты поиска научно-технических решений, направленных на устранение вышеописанных недостатков технологии ЕВАМ при разработке установки электронно-лучевого выращивания (УЭЛВ) [8] путем наплавления металлической проволоки, отражены в настоящей статье.

Описание установки и демонстрация электронно-лучевого выращивания

Принципиальная схема установки и процесса электронно-лучевого выращивания представлена на рис. 1.

Технологический комплекс электронно-лучевого выращивания включает в себя вакуумную камеру 1 с внутренними размерами $500 \times 500 \times 500$ мм³, откачиваемую до рабочих давлений $10^{-1} - 10^{-4}$ Па. Верхняя часть вакуумной камеры оборудована фланцем для установки электронной пушки 2. Система электропитания установки предусматривает использование пушек как с термокатодом, так и с плазменным катодом. Энергия электронов пучка может варьироваться в диапазоне 0–60 кэВ, ток пучка – 0–100 мА, диаметр пучка вплоть до 200 мкм, достижимый уровень плотности мощности пучка – порядка $10^5 - 10^6$ Вт/см². Для управления электронным лучом используется система магнитной фокусировки и отклонения 4.

Процесс электронно-лучевой наплавки происходит следующим образом. Электронный пучок с

плотностью мощности достаточной для плавления, фокусируется на поверхности подложки 5 или уже выращенного слоя металла 6. В месте обработки образуется ванна расплава 7, в которую вводится проволока 8, тем самым увеличивая объем расплавленного материала. При смещении положения обработки манипулятором 9 путем поворота подложки или ее движением в горизонтальном направлении происходит смещение ванны расплава, в результате чего наплавленный в предыдущий момент времени металл застывает.

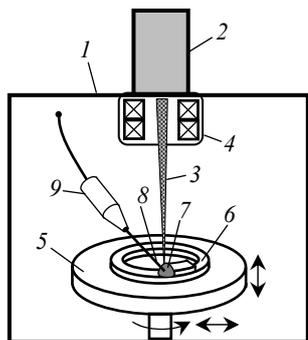


Рис. 1. Схема установки электронно-лучевого выращивания: 1 – вакуумная камера; 2 – электронный источник; 3 – электронный пучок; 4 – система магнитной фокусировки и отклонения луча; 5 – подложка; 6 – предыдущий наплавленный слой; 7 – ванна расплава; 8 – подаваемая проволока; 9 – манипулятор подачи проволоки; стрелками показаны направления смещения подложки

Как отмечено в [8], такой способ позиционирования обеспечивает наилучшую точность по сравнению с традиционной трехкоординатной системой перемещения. Также стоит отметить, что помимо сокращения количества степеней свободы механической системы перемещения печатаемым изделием по сравнению с [6] повышение точности позиционирования места обработки осуществляется заменой механического манипулятора электронным источником на систему электромагнитного отклонения электронным пучком. После завершения выращивания слоя подложка опускается, и описанный процесс осуществляется вплоть до готовности изделия. Фотография внутренней оснастки вакуумной камеры представлена на рис. 2.

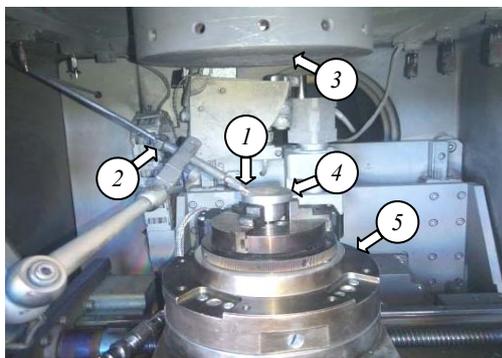


Рис. 2. Внутреннее оснащение вакуумной камеры: 1 – подаваемая проволока; 2 – система подачи проволоки; 3 – выходная апертура электронного источника; 4 – подложка; 5 – манипулятор выращиваемым изделием

Помимо прецизионного манипулятора с повышенной точностью пространственного перемещения, ключевым отличием разрабатываемой установки для электронно-лучевого выращивания является расположение источника наплавливаемой проволоки снаружи вакуумной камеры. Для этих целей разработана уникальная система подачи проволоки, состоящая из трех частей (рис. 3): 1 – привод подачи проволоки, управляемый шаговым двигателем; 2 – система вакуумного ввода с промежуточной откачкой; 3 – система подачи проволоки, обеспечивающая контроль угла подачи (2 на рис. 2).

На рис. 4 показаны образцы изделий из нержавеющей стали 308, произведенные методом электронно-лучевого выращивания. Точность построения по всем координатам составляет 0,2 мм. Скорость нанесения – около одного килограмма металла в час. Линейная скорость наплавки – 20 мм/с. Продемонстрированные на рис. 4 изделия размером 50×50×60 мм выращиваются за 10 мин. Напечатанные изделия обладают размерами и формой, наиболее приближенными к конечной продукции с учетом обеспечиваемого запаса, по геометрическим размерам равного точности построения. Дальнейшее удаление лишнего материала и доводка до требуемых размеров так же, как и в порошковых технологиях печати металлов, осуществляются традиционными способами.

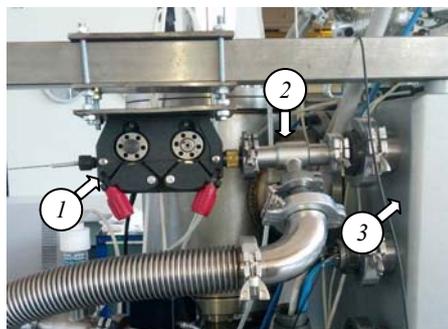


Рис. 3. Система подачи проволоки: 1 – привод подачи проволоки; 2 – система вакуумного ввода; 3 – задняя стенка вакуумной камеры



Рис. 4. Образцы, полученные способом электронно-лучевого выращивания (диаметр основания 50 мм, высота 60 мм)

Стоит отметить, что отличительными преимуществами данного способа, ввиду использования электронного луча и проволоочной технологии, являются:

- плазменный электронный источник обеспечивает надежную работу и более длительный срок эксплуатации по сравнению с традиционными термокатодными пушками;
- работа в вакууме исключает возможность окислительных процессов и их влияние на структуру и свойства материала;
- относительная дешевизна источников электронов мощностью в десятки киловатт по сравнению с мощными лазерами;
- высокая энергоэффективность по сравнению с лазерной плавкой ввиду полного поглощения электронов пучка обрабатываемой деталью;
- возможность наплавления любого тугоплавкого металла, включая вольфрам;
- прочностные характеристики наплавленного металла не уступают полученным традиционными методами литья;
- высокая скорость наплавки;
- использование нескольких систем подачи различных материалов позволяет создавать композитные металлические конструкции.

Заключение

Продемонстрирована разрабатываемая установка для электронно-лучевого выращивания (УЭЛВ) металлических изделий путем послойного наплавления проволоки, использующая для генерации электронного пучка источник с термокатодом или плазменным катодом. Оригинальная система позиционирования и подачи наплавляемой проволоки позволила повысить предельные размеры выращиваемых изделий до 100 мм в любом направлении при габаритных размерах вакуумной камеры 500×500×500 мм³. Продемонстрированы изделия, созданные методом электронно-лучевого выращивания.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) – головном исполнителе НИОКТР «Создание производства нового поколения электронно-лучевого оборудования на основе различных эмиссионных систем для сварки, пайки, обработки поверхностей и аддитивных технологий» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Договора № 02.G25.31.018.

Литература

1. Chua C.K. Rapid Tooling in Manufacturing / C.K. Chua, K.F. Leong, Z.H. Liu // Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. – 2015. – P. 2525–2549.
2. Kruth J.P. Selective laser melting of iron-based powder / J.P. Kruth et al. // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 149, No. 1. – P. 616–622.
3. Heintl P. Cellular Ti–6Al–4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting / P. Heintl et al. // Acta biomaterialia. – 2008. – Vol. 4, No. 5. – P. 1536–1544.

4. Murr L.E. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies / L.E. Murr et al. // Journal of Materials Science & Technology. – 2012. – Vol. 28, No. 1. – P. 1–14.

5. Gong X. Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology / X. Gong, T. Anderson, K. Chou // ASME/ISCIE 2012 international symposium on flexible automation. American Society of Mechanical Engineers. – 2012. – P. 507–515.

6. Sciaky, Inc. Industrial Metal 3D-Printing: официальный сайт компании Sciaky. Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sciaky.com/>, свободный (дата обращения: 21.06.2017).

7. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: НТЛ, 2005. – 212 с.

8. Осипов И.В. Установки электронно-лучевой сварки производства ТЭТа / И.В. Осипов, А.Г. Рау, Г.В. Семенов // Сб. матер. и докл. междунар. конф. «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии». – М.: МЭИ(ТУ), 2015. – С. 84–92.

Бакеев Илья Юрьевич

Аспирант, мл. науч. сотрудник каф. физики ТУСУРа
Тел.: +7-953-923-17-26
Эл. почта: bakeeviyu@mail.ru

Бурачевский Юрий Александрович

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. физики
Тел.: +7-913-807-16-49
Эл. почта: Yury_BYA@mail.ru

Бурдович Виктор Алексеевич

Д-р техн. наук, профессор каф. физики
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: burdov@fet.tusur.ru

Осипов Игорь Владимирович

Коммер. директор ООО «Научно-производственной компании Томские электронные технологии» (ООО «НПК ТЭТа»)
Тел.: +7-923-447-00-39
Эл. почта: osipov@tetacom.ru

Рау Александр Григорьевич

Директор ООО «НПК ТЭТа»
Тел.: +7-923 447 0004,
Эл. почта: rau@tetacom.ru

Семенов Григорий Валерьевич

Председатель Совета директоров ООО «НПК ТЭТа»
Тел.: +7-923-547-90-90
Эл. почта: semenov@tetacom.ru

Bakeev I.Yu., Burachevsky Yu.A., Burdovitsin V.A.,
Osipov I.V., Rau A.G., Semenov G.V.

Setup for the electron beam build up of metal products

The paper demonstrates the scientific and technical solutions realized in the development of an electron-beam additive manufacturing of products by welding metal wire. Distinctive features of the developed approach among existing analogs of additive technologies are presented.

Keywords: electron-beam setup, additive technologies, three-dimensional printing, electron-beam building up.