

**В386
В.40**



**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ С МАТЕРИАЛАМИ
В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ И МЕДИЦИНЕ**

**Доклады
VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Том II

Новосибирск, Россия

24 – 27 марта 2015 г.



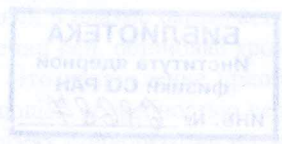
**Новосибирск
Параллель
2015**

B386
B.40
T. II

ДАР БИБЛИОТЕКИ ИТГИМ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН



**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ С МАТЕРИАЛАМИ
В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ И МЕДИЦИНЕ**

**Доклады
VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Том II

*Новосибирск, Россия
24–27 марта 2015 г.*

**Новосибирск
Параллель
2015**

VF



Проект организации и проведения VI Всероссийской конференции с приглашением иностранных участников “Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине” (Грант РФФИ № 15-08-20071 Г)



МАКЕТ 3D-ПРИНТЕРА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ю.И. Семенов, О.Н. Алякринский, Д.Ю. Болховитянов, П.В. Логачев, А.М. Медведев, А.Б. Спесивцев, А.А. Старостенко, К.Р. Яминов

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

Разработан и изготовлен макет 3D-принтера для печати металлических изделий, в том числе из тугоплавких металлов. Исходный металл подается в виде проволоки, которая наплавляется на изделие с помощью электронного пучка. Для производства электронного пучка использовался энергоблок электронно-лучевой сварки, разработанный ранее в ИЯФ СО РАН. Для тестирования работы макета были изготовлены трубчатые структуры из стали и вольфрама.

В настоящее время одной из быстроразвивающихся областей современной промышленности является область аддитивных технологий. Технологии «трехмерной печати» внедряются во многих областях производства и научных исследований и позволяют существенно ускорить и удешевить процесс изготовления трехмерных изделий. Применение узлов, изготовленных из тугоплавких металлов и сплавов, актуально в авиационном строении, ракетостроении, в исследованиях в области физики плазмы и термоядерных реакций. В настоящей работе разработан и изготовлен макет 3D-принтера и построены образцы металлических структур цилиндрической формы из нержавеющей стали и вольфрама, проведено сравнение энергетических затрат при их изготовлении. Аналогичные работы с алюминием, сплавами титана и со сталями проводятся в NASA [1].

Эксперимент

В эксперименте выращивалась цилиндрическая стенка на подложке методом непрерывной наплавки металлической проволоки. Плавка производилась электронным пучком. В качестве мощного источника пучка электронов был использован энергоблок электронно-лучевой сварки, разработанный и изготовленный в ИЯФ СО РАН в ограниченном количестве для нужд военно-промышленного комплекса России [2]. Энергоблок обеспечивает постоянную энергию электронов 60 кэВ, ток электронов регулируется с долей миллиампера до 250 мА.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Структура выращивается на подложке из нержавеющей стали или вольфрама в зависимости от материала выращиваемой стенки. На вращающийся молибденовый столик 9 с подложкой подается электронный пучок 11 с энергией электронов 60 кэВ.

Подача проволоки для полуавтоматической сварки марки ER308LSi из нержавеющей стали или из вольфрама марки ВА диаметрами 1,2 мм осуществлялась механизмом подачи 3, приводом которого служит шаговый двигатель 4. Скорость подачи проволоки, 5 мм/с, равна линейной скорости вращающейся подложки в точке плавки проволоки. Столик 9 прикреплен через тепловую развязку из тонкой трубки из нержавеющей стали к шаговому двигателю 10. После каждого наплавленного витка проволоки столик опускается на высоту одного витка по модулю линейного перемещения 5. Привод модуля осуществляется через ввод вращения в вакуум 7 шаговым двигателем 6. Весь процесс наплавки управляется от компьютера 1.

© Ю.И. Семенов, О.Н. Алякринский, Д.Ю. Болховитянов, П.В. Логачев, А.М. Медведев, А.Б. Спесивцев, А.А. Старостенко, К.Р. Яминов, 2015

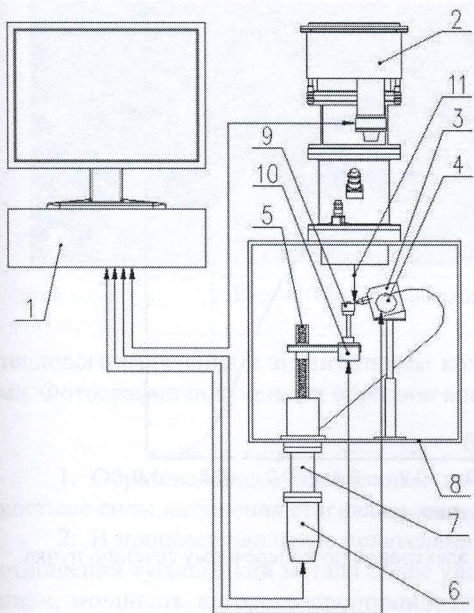


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – компьютер управления экспериментом; 2 – источник электронного пучка; 3 – механизм подачи проволоки; 4 – шаговый двигатель FL42BY12; 5 – модуль вертикального перемещения подложки; 6 – шаговый двигатель ШД-5; 7 – ввод вращения в вакуум; 8 – вакуумная камера; 9 – столик вращения подложки выращиваемой структуры; 10 – шаговый двигатель FL42BY12; 11 – электронный пучок.

Компьютерная система управления является модифицированным вариантом системы, используемой на установке электронно-лучевой сварки. Программное обеспечение построено на базе ПО «СХ» (использующего 3-уровневую модель, которая является стандартной в автоматизации экспериментальных установок в физике высоких энергий) и работает под управлением ОС Linux. Управляющая электроника, в силу решаемых задач, довольно разнородна: связь с блоками управления накалом, высоковольтным питанием и магнитной системой идет по интерфейсу CANbus, блоки синхронизации выполнены в стандарте SAMAC, а связь с контроллерами шаговых двигателей осуществляется по интерфейсам CANbus и RS485.

Фотография общего вида макета представлена на рис. 2.

С помощью проволочного датчика измерен диаметр электронного пучка при токе наплавки проволоки из нержавеющей стали 2,7 мА. Осциллограмма измерения приведена на рис. 3. Диаметр электронного пучка при токе наплавки проволоки вольфрама 20,5 мА измерен методом прожига металлической пластины.

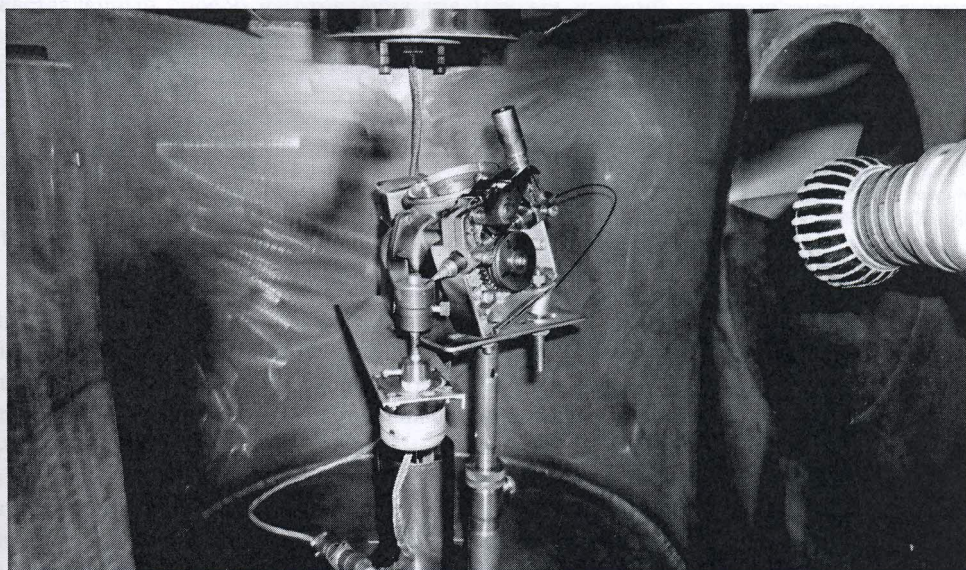


Рис. 2. Макет 3D-принтера.

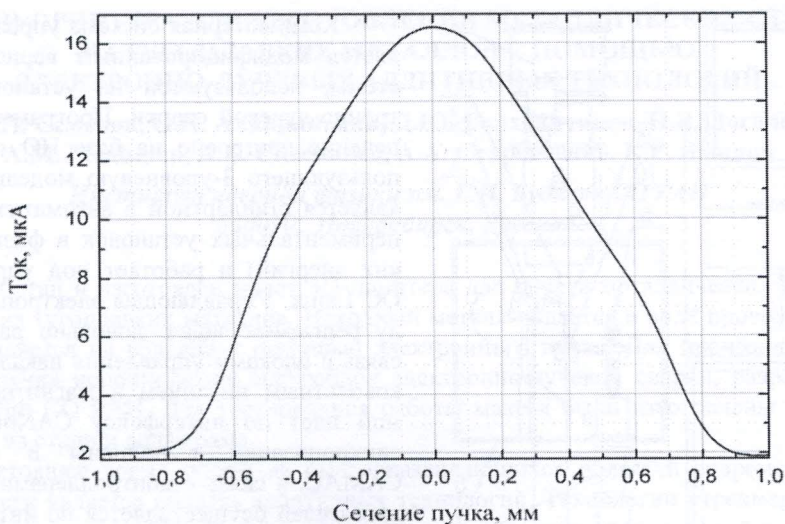


Рис. 3. Оциллограмма распределения плотности тока электронов по поперечному сечению пучка.

Таблица 1. Термодинамические характеристики наплавляемых материалов

Материал проволоки	Температура плавления, °С	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплота плавления, кДж/кг	Оценка мощности для плавки проволоки, Вт
Нержавеющая сталь марки ER308LSi	1410	500	270	74
Вольфрам марки ВА	3380	132	191	116

Таблица 2. Параметры пучка электронов, использованные при печати металлических образцов

Материал проволоки	Ток пучка электронов, мА	Мощность пучка, Вт	Размер пучка, мм
Нержавеющая сталь марки ER308LSi	2,7	162	1,1 (на полуввысоте)
Вольфрам марки ВА	20,5	1230	1,2 (на полуввысоте)

Результаты и их обсуждение

Построены образцы цилиндрической формы из нержавеющей стали и вольфрама, приведены для сравнения термодинамические параметры и мощности энергетических затрат по электронному пучку на наплавку этих материалов. Как видно из таблиц, мощность пучка и оценка мощности, требуемой для плавления стальной проволоки, различаются примерно в два раза. Это можно объяснить тем, что не весь электронный пучок высаживается на проволоку, и потерями мощности за счет отражения электронов на остаточном газе и от поверхности проволоки, которые составляют 25 % при нормальном падении и возрастают до 100 % при касательном, а также потерями на излучение [3]. Для вольфрама мощности различаются на порядок, что объясняется большей мощностью

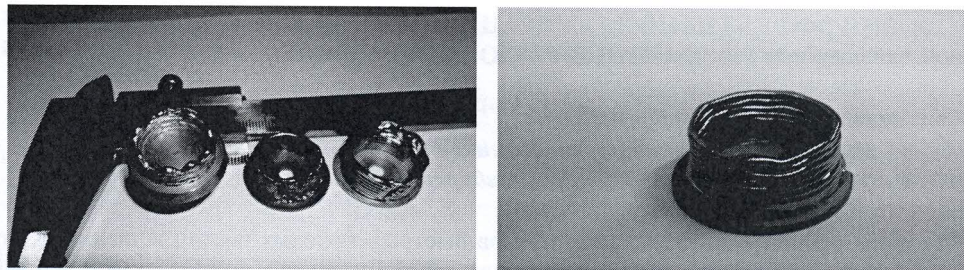


Рис. 4. Образцы, выращенные на макете 3D-принтера.

теплового излучения и значительным коэффициентом отражения электронов у вольфрама. Фотографии полученных образцов показаны на рис. 4.

Выводы

1. Образовавшиеся на верхнем витке капли вызваны перегревом, когда поверхностные силы натяжения стягивают жидкий металл в капли.
2. В процессе наплавки желательнее быстрое охлаждение нанесенных слоев. В этом отношении тугоплавкий металл более удобен, так как слои быстрее охлаждаются излучением, мощность которого пропорционально четвертой степени температуры материала наплавки.
3. В дальнейшем необходимо провести структурный анализ получаемых образцов и исследовать их механические свойства.

Заключение

Продемонстрирована возможность применения высококонцентрированного потока энергии электронов в производстве трехмерных изделий из тугоплавких материалов. При интеграции управления данной технологией с системой автоматического проектирования и системой прецизионного позиционирования изготавливаемых изделий в вакууме представленный способ изготовления трехмерных изделий из тугоплавких материалов сулит существенное сокращение времени их изготовления и экономию сырья для их изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tamingер К.М., Hafley R.A.** Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing // <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080013538.pdf>.
2. **Semenov Yu.I., Akimov V.E., Batazova M.A. et al.** 60 keV 30 kW electron beam facility for electron beam technology // Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, TUPP161. URL: <http://www.inp.nsk.su/~kozak/papers/tupp161.pdf>
3. **Шиллер З., Гайзинг З., Панцер З.** Электронно-лучевая технология. М.: Энергия, 1980.

Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами
в перспективных технологиях и медицине: Доклады VI Всероссийской
конференции. Т. 2. Новосибирск: Параллель, 2015. 152 с.

Ответственный за выпуск В.В. Бублик
Редактор Н.А. Лившиц
Технический редактор Т.В. Ветровская

Подписано в печать 16.05.2015
Формат бумаги 70 × 100/16, Усл. печ. л. 12.6
Уч.-изд. л. 12.3, Тираж 150 экз., Заказ № 2904-4

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1