

СЕКЦИЯ 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ВЫБОР РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Лю Юаньсюнь, студент гр.4БМ01,

научный руководитель: Ковалевская Ж.Г., профессор, д.т.н.,

Томский политехнический университет, 634050, Томская обл., г. Томск, ул. Усова, 13В.

E-mail: liuyuanx110@163.com

Аннотация. В данном исследовании электронно-лучевое плавление (ЕВМ) было использовано для получения аддитивным методом однослойных образцов – монослоев из алюминиевой проволоки на подложке из титана с целью получения интерметаллида системы Ti-Al. Были исследованы изменения в строении монослоев под воздействием изменения тока в интервале 6.5-9.5 мА и изменения точки подачи проволоки в интервале 1.5-3.5 мм. Для дальнейшего наращивания образца были выбраны подходящие экспериментальные параметры.

Abstract: In this study, electron-beam melting (EBM) was used to produce single-layer samples, monolayers of aluminum wire on a titanium substrate, in order to get an intermetallide of the Ti-Al system. Changes in the structure of monolayers under the influence of current in the range of 6.5-9.5 mA and changes in the wire feeding point in the range of 1.5-3.5 mm were investigated. Suitable experimental parameters were chosen for further sample buildup.

Ключевые слова: алюминий, титан, электронно-лучевое плавление, проволока, монослой.

Keyword: Aluminium; titanium; electron beam melting; Wire; monolayer.

Сегодня технология ЕВМ широко используется в аддитивном производстве и имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами производства: высокая производительность изделий, возможность изготовления сложных геометрических форм, уменьшение внутренних примесей и повышение прочности материала, высокая скорость энергии для плавления тугоплавких металлов и низкие остаточные напряжения в изделиях [1]. Метод ЕВМ использует высокую плотность энергии, генерируемой в фокальной точке отклоненным и сфокусированным высокоэнергетическим электронным пучком, для создания высокой локальной температуры в сканируемой проволоке, которая расплавляет металл и образует серию небольших сварочных ванн, которые застывают и соединяются, образуя слой металла [2-4]. Качество деталей, полученных с помощью этой технологии, в значительной степени зависит от плотности энергии и распределения энергии электронного пучка. Определение влияния силы тока электронного пучка и места взаимодействия электронного пучка с проволокой на строение образцов является важнейшей задачей, поскольку эти параметры оказывают наибольшее влияние на характеристики будущей детали [5].

Для данного исследования использовалась установка электронно-лучевого плавления, разработанная Томским политехническим университетом (Томск, Россия), со следующими характеристиками: ускоряющее напряжение 40 кВ, вакуумное давление $5 \cdot 10^{-3}$ Па, максимальный ток 200 мА, минимальный диаметр луча 150 мкм, площадь сборки 150*150 мм и мощность 6 кВт.

Экспериментальные образцы были изготовлены из алюминиевой проволоки диаметром 2 мм, марки СвА97 (99,97% Al). Роль подложки выполнял технически чистый титан марки ВТ1 (99,7% Ti).

В первой серии экспериментов использовались токи 6.5 мА, 8.0 мА и 9.5 мА с ускоряющим напряжением 30 кВ и скоростью печати 5 мм/с. Диаметр фокуса составлял 5 м. Результаты эксперимента показывают, что в данном интервале значений тока, электронный пучок имеет достаточную плотность энергии для формирования монослоя, а алюминий показал хорошую адгезию на титановой подложке. На рисунке 1 показано оптическое изображение поперечного сечения одиночных треков и монослоев, полученных при разных значениях тока.

Образцы, изготовленные по технологии ЕВМ, имеют четкое расслоение между алюминиевой фазой сверху и фазой титановой подложки снизу, между которыми металлический материал образует интерметаллическое соединение титан-алюминий. Наибольшая доля интерметаллических соединений образуется при силе тока 9,5 мА по сравнению с другими значениями силы тока.

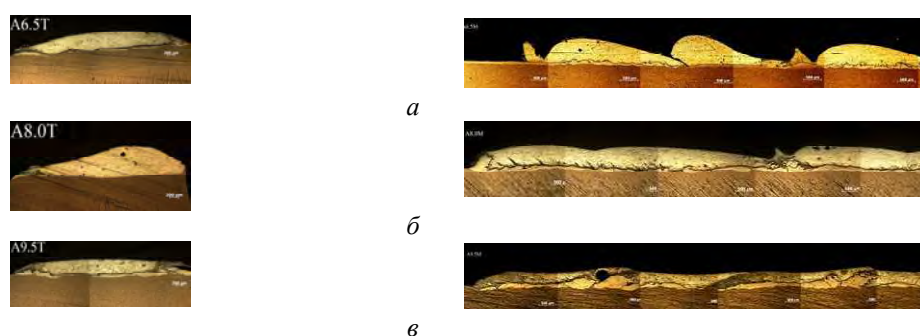


Рис. 1. Оптическое изображения образцов, полученных при токе: 6.5 мА (верх), 8.0 мА (центр), 9.5 мА (низ)

Следующий этап эксперимента заключался в изменении положения точки подачи проволоки до 1.5 мм, 2.0 мм и 3.5 мм при фиксированном уровне тока, где входная энергия электронного пучка оказалась идентичной, за исключением того, что теплопередача от одного участка проволоки к точке подачи проволоки была изменена, что повлияло на гладкость капель. На рисунке 2 показаны изображения образцов, полученных на разных расстояниях. На расстоянии 3.5 мм капли падают более плавно, и образуют однородный монослой, но количество интерметаллического соединения, присутствующего на границе, невелико. При расстоянии 2.0 мм образец имеет большое количество интерметаллических соединений.

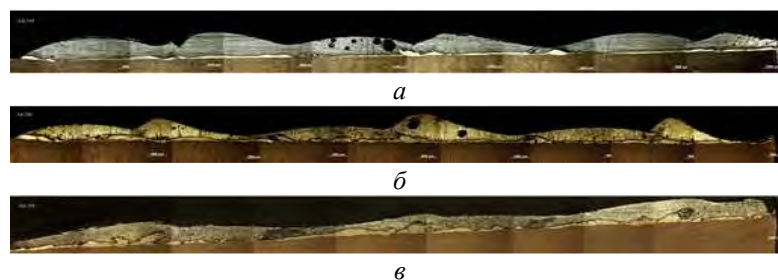


Рис. 2. Оптическое изображения образцов, полученных при подаче проволоки: 3.5 мм (а), 1.5 мм (б), 2.0 мм (в)

Анализируя параметры процесса ЕВМ при формировании монослоев из алюминиевой проволоки на титановой подложке, было определено, что оптимальное значение тока электронного пучка составляет 9.5 мА, а расстояние между точками подачи проволоки – 3.5 мм. Проволока может получить достаточную энергию, когда значение тока находится в диапазоне 6.5-9.5 мА, но по мере увеличения тока больше энергии проникает в жидкий алюминий и взаимодействует с титановой подложкой, образуя больше интерметаллида. Минимальный ток должен быть не менее 8.0 мА. Расстояние между точкой конца проволоки и точкой подачи проволоки должно составлять около 2.0 мм, слишком короткое приведет к образованию капель, а слишком длинное - к недостаточной теплопередаче и слишком малому количеству интерметаллического соединения.

Данная работа выполнена при поддержке Фонда государственных стипендий, организованного Китайским советом по стипендиям (CSC).

Список используемых источников:

1. Yadroitsev I., Bertrand P., Smurov I. Parametric analysis of the selective laser melting process //Applied surface science. – 2007. – Т. 253. – №. 19. – С. 8064-8069.
2. Pushilina N. S. et al. Beam Current Effect on Microstructure and Properties of Electron-Beam-Melted Ti-6Al-4V Alloy //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – Т. 28. – №. 10. – С. 6165-6173.

3. Ackelid U., Svensson M. Additive manufacturing of dense metal parts by electron beam melting //Proceedings of the Materials Science and Technology Conference, Pittsburgh, PA, USA. – 2009. – Т. 2529.
4. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: a review //Journal of Materials Engineering and performance. – 2014. – Т. 23. – №. 6. – С. 1917-1928.
5. Tolochko N. K. et al. Mechanisms of selective laser sintering and heat transfer in Ti powder //Rapid prototyping journal. – 2003.

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОГО СПЛАВЛЕНИЯ

*Ц. Хань^а, аспирант гр. А1-21, Р.И. Юсупов, аспирант гр. А0-21, В.В.Фёдоров,
научный руководитель: Клименов В.А., профессор, д.т.н.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томская обл., г.Томск, пр. Ленина, 30,
E-mail: hanzelizu@gmail.com^а*

Аннотация. В статье описываются особенности разработки оборудования и технологии электронно-лучевого селективного сплавления порошка и послойного сплавления проволоки на основе комплексного применения металлургических подходов, автоматизации и математического моделирования условий формирования материала. Показано, что многоуровневый подход в исследовании физических процессов и структуры имеет большие сложности и не позволяет оценить макродефекты и их влияние на качество изделия. Рассматриваются возможности машинного обучения для оценки качества формируемого изделия.

Abstract. The article describes the features of the development of equipment and technology for electron-beam selective fusion of powder and layer-by-layer fusion of wire based on the integrated application of metallurgical approaches, automation, and mathematical modeling of material formation conditions. It is shown that a multilevel approach to the study of physical processes and structure is very complex and does not allow assessing macrodefects and their impact on product quality. The possibilities of machine learning for assessing the quality of the formed product are considered.

Ключевые слова: Аддитивные технологии, электронно-лучевое оборудование, порошки и проволока титановых сплавов, структура и свойства, математическое моделирование, машинное обучение.

Keywords: Additive manufacturing, electron-beam equipment, powders and wires of titanium alloys, structure and properties, mathematical modeling, machine learning.

Аддитивные технологии – технологии послойного выращивания из различных материалов объектов, с заданными характеристиками и требующих минимальных доработок, а иногда и без них. Они нашли широкое применение в медицине, машиностроении, и других высоко технологичных сферах. При формировании изделия из различных филаментов, необходимо учитывать большое число параметров, включающих мощность и скорость перемещения источника нагрева. Выбор параметров очень важен, так как они определяют форму и размер ванны расплава и результирующие термические циклы, скорость охлаждения, температурные градиенты и скорость затвердевания, которые в свою очередь определяют формирование микроструктуры, дефектов и свойств. Подбор оптимальных параметров процесса сплавления или спекания и их контроль в процессе печати приводят к улучшению качеств получаемых изделий. Предсказание микроструктуры, свойств и дефектов при печатании деталей требуют понимания металлургических процессов протекающих в условиях характерных для АТ [1].

В 2015 году была создана в ТПУ модульная установка электронно-лучевого сплавления порошков и наплавки проволокой [2]. Для автоматизации процесса печати с целью улучшения качество продукции и снижения процента брака была разработана программа управления на основе системы Linux [3]. Для управления установкой было разработано программное обеспечение, которое предназначено для управления режимами электронно-лучевого сплавления (ЭЛС) металлических порошков в условиях вакуума [2]. Программа обеспечивает сбор информации с датчиков вакуума, отклонением пучка посредством G-code, а также осуществляет ввод параметров силы тока, фокусировки и напряжения ускорения. Считываются данные, а затем записываются переменные напряжения, координаты положения манипулятора к которым необходимо двигаться, параметры вакуума, мощность луча, количество порошка и все возвращается в цикле программы в основную часть для вычисления траектории движения. Происходит инициализация драйверов. Затем происходит запуск луча.