

## РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО СЕЛЕКТИВНОГО СПЛАВЛЕНИЯ И НАПЛАВКИ ПРОВОЛОКИ

*Федоров В.В.<sup>1</sup>, Черепанов Р.О.<sup>1</sup>, Юркина В.А.<sup>1,a</sup>, Клименов В.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

<sup>a</sup> [yurkinavarvara@yandex.ru](mailto:yurkinavarvara@yandex.ru)

В настоящее время, всё чаще, для решения задач получения металлических изделий сложной формы, гетерогенного композитного строения и сложного фазового состава, применяют широкую гамму аддитивных технологий (или технологии 3D-печати). Наряду с развитием аддитивных технологий, использующих полимерные связующие, развиваются технологии непосредственно сплавления металлических порошков. Оба метода хороши для получения не массивных изделий с хорошей точностью, без толстых несущих стенок и требуют сложной дальнейшей постобработки – двустадийное выжигание/спекание для изделий со связующим и термообработку (желательно с изостатическим прессованием) для деталей, полученных методом селективного сплавления порошка. В случае необходимости печати толстостенных деталей с меньшей точностью (несколько миллиметров) и большей производительностью, перспективным является метод размерной электронно-лучевой наплавки проволокой. В период с 2015 года по настоящее время в НИ ТПУ была создана и постоянно модернизируется модульная установка электронно-лучевого сплавления порошков и наплавки проволокой. В ее основе находится вакуумная камера с электронно-лучевой пушкой с плазменным эмиттером и модульные манипуляторы, обеспечивающие возможность послойного сплавления порошков (EBM) или размерную наплавку проволокой. Изменение характеристик электронного луча в широком диапазоне и возможность управления его перемещением и сканированием позволяют реализовывать обсуждаемые процессы на одной установке. Программное обеспечение обеспечивает возможность модульной замены и синхронизированным управлением всеми органами установки, согласно заданию, по цифровым G – кодам.

Печать была реализована при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча от 15 до 20 мА (в зависимости от удаленности от подложки), таким образом, подводимая мощность изменялась от 450 до 600 Вт. Сфокусированный луч (диаметр 150 мкм) перемещался по круговой развертке диаметром 4 мм. Частота движения луча по развертке 1000 Гц. В область развертки осуществлялась подача проволоки, а формирование геометрии образца достигалось за счет перемещения стола по трем осям. При этом расстояние между треками составляла 4 мм, а высота слоя – 0,8 мм, движение в горизонтальной плоскости зигзагообразное.

Методами математического моделирования исследовались термические условия взаимодействия луча с порошком и проволокой и анализировались условия формирования материала при кристаллизации расплава, оценивались возможные скорости охлаждения расплава.

В ходе работы, на электронно-лучевом 3D-принтере были напечатаны образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V в режиме селективного спекания порошка и послойного сплавления проволоки. Из получаемых образцов на электроэрозионных станках вырезались образцы размерами 5x5x10 мм, которые исследовались методами неразрушающего контроля, так и подвергались разрушению путём сжатия на машине Instron. Особенности структуро- и фазообразования в получаемых сплавах исследовались методами оптической микроскопии, рентгеноструктурным анализом и методами измерения твердости и микротвердости. Методами растровой электронной микроскопии исследовалась фрактография изломов образцов при сжатии. Оценивалось влияние особенностей структуры материала образцов на характер разрушения.

Одной из проблем аддитивных технологий является структурная неоднородность в межслоевых областях, что негативно влияет на механические свойства получаемых изделий.

Устранение межслоевых неоднородностей возможно при проведении дополнительной термообработки, зачастую с приложением давления. В данном случае высокооднородная структура была получена уже в процессе печати. Однако достигнуто это было за счет большой мощности луча, что привело к образованию пор. В дальнейшем будет подобран режим, одновременно гарантирующий как высокую межслоевую однородность, так и низкую пористость.

Сравнительный анализ структурообразования на различных масштабных уровнях исследуемого материала при различных условиях и получаемых при этом свойствах позволяет целенаправленно выбирать ту или иную технологию для получения изделий из титановых сплавов и прогнозировать получаемые характеристики и поведение материала при нагружении.