

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Физическая мезомеханика.
Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина

в рамках
**Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ 3D-ПЕЧАТИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ВТ1-0 И ВТ6

Шугуров А.Р., Казаченок М.С.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Высокое соотношение механических свойств к плотности, высокая коррозионная стойкость, низкая теплопроводность, биосовместимость титана и его сплавов делают их одними из наиболее перспективных конструкционных материалов. Однако, несмотря на существенные преимущества титана и его сплавов, их применение на сегодняшний день ограничено, главным образом вследствие высокой стоимости их производства традиционными методами по сравнению с другими конструкционными материалами. Это вызывает необходимость поиска новых технологий, обеспечивающих снижение стоимости производства титановых сплавов и изделий из них. Одним из таких подходов является развитие в последние годы 3D-печати или аддитивных технологий (АТ), которые предполагают изготовление изделия на основе цифровой модели путем послойного добавления материала в виде металлического порошка, проволоки или прутка. АТ позволяют существенно снизить соотношение массы готового изделия и исходного материала, а также уменьшить массу изделий, при сохранении их надежности, прочности и долговечности. Кроме того, АТ обеспечивают существенное сокращение времени и повышение производительности технологических процессов при изготовлении изделий особо сложной геометрической формы.

В то же время при применении аддитивных технологий для изготовления деталей из металлических материалов возникает ряд проблем, обусловленных наличием в них внутренних дефектов, пористости и неоднородности микроструктуры, что связано с использованием порошка или проволоки в качестве исходного материала, слоистой структурой АТ-изделий, а также неравномерностью теплового воздействия на них. Формирование особой микроструктуры в данных материалах обуславливает анизотропию их механических свойств, что оказывает существенное влияние на характер их деформации и разрушения, и способствует локализации деформации на различных масштабных уровнях. При этом микроструктура, а, следовательно, и механические характеристики существенно зависят от параметров 3D-печати, что обуславливает необходимость детального изучения их влияния. В данной работе исследована зависимость микроструктуры и механических свойств сплавов ВТ1-0 и ВТ6, полученных методом электронно-лучевой плавки, от условий их печати.

Образцы для исследований представляли собой пластины из технически чистого титана ВТ1-0 и сплава ВТ6, вырезанные методом электроискровой резки из 3D-напечатанных изделий, полученных методом электронно-лучевой плавки. Использовались следующие параметры 3D печати: ускоряющее напряжение 30 кВ, ток электронного пучка 15-25 мА (что соответствовало плотности энергии пучка 112,5-150 Дж/см²), частота развертки электронного пучка 50-500 Гц, скорость перемещения пучка вдоль поверхности изделия 3,5-12 мм/с, скорость подачи проволоки 8-10 мм/с. Перед проведением исследований образцы подвергали механической шлифовке и полировке. Структуру и фазовый состав 3D-напечатанных изделий изучали методом рентгеновской дифракции. Микроструктуру образцов исследовали методом оптической микроскопии. Измерение твердости и модуля упругости проводили методом наноиндентирования.

Исследовано влияние режимов электронно-лучевой плавки на свойства получаемых изделий из сплавов ВТ1-0 и ВТ6. Установлено, что при сочетании низкого тока пучка (15 мА) и высокой скорости его перемещения (12 мм/с) вдоль поверхности изделия в процессе электронно-лучевого нагрева титановой проволоки не удается создать ванну расплава, а, следовательно, обеспечить полное сплавление формирующихся слоев 3D-напечатанного изделия. Наряду с этим, на начальном этапе роста изделия малая мощность электронного

Секция 10. Аддитивные технологии формирования материалов, изделий и элементов конструкций с иерархически организованной структурой

пучка обуславливает низкую адгезию наплавляемых слоев с подложкой. В результате происходит отрыв изделия от подложки после формирования 3 слоев. Увеличение тока электронного пучка до 20 мА приводит к значительному повышению адгезионной прочности между подложкой и формирующимся изделием, а также когезионной прочности между наплавляемыми слоями. Однако плотность энергии пучка оказывается слишком высокой, так что при нанесении каждого последующего слоя происходит сильный нагрев предыдущих слоев и их растекание. Как следствие не удается напечатать изделие требуемой высоты. Проведенные исследования показали, что оптимальный ток пучка, который позволяет напечатать изделия необходимых размеров, составляет от 18 до 20 мА. Тем не менее, и при таком токе пучка высокая скорость его латерального перемещения (8-12 мм/с) приводит к нерегулярной подаче проволоки в ванну расплава и, как следствие, к формированию 3D-напечатанного изделия, недостаточно однородного как по высоте, так и по толщине. Оптимального качества и однородности изделий удастся добиться при одновременном уменьшении скорости перемещения пучка до 3,5 мм/с, увеличении частоты его развертки до 500 Гц и снижении скорости подачи проволоки до 8 мм/с.

Проведены подробные исследования микроструктуры, фазового состава и механических свойств 3D-напечатанных образцов из сплавов ВТ1-0 и ВТ6, полученных в условиях высокой скорости перемещения электронного пучка (12 мм/с) в сочетании с низкой частотой его развертки (100 Гц) – режим 1, а также низкой скорости перемещения пучка (3,5 мм/с) в сочетании с высокой частотой развертки (500 Гц) – режим 2. Установлено, что в образцах ВТ6, полученных в режиме 1, в процессе печати формируется однородная микроструктура, характеризующаяся столбчатыми зернами, вытянутыми в направлении, противоположном направлению теплоотвода. Продольный размер зерен достигает 20-30 мкм, а их поперечный размер составляет 1-1,2 мкм. Внутри зерен наблюдается игольчатая мартенситная микроструктура. Иглы ориентированы в различных направлениях, а их поперечные размеры составляют ~2 мкм. По данным рентгеноструктурного анализа объемная доля β -фазы в образцах ВТ6, полученных в режиме 1, не превышает 1%. Твердость данных образцов составляет ~3,5 ГПа, а их модуль Юнга – 122 ГПа. В образцах ВТ6, напечатанных в режиме 2, наблюдается аналогичная столбчатая микроструктура. При этом продольные и поперечные размеры столбчатых зерен уменьшаются до 5-7 мкм и 500-800 мкм соответственно. Внутри зерен наблюдаются пластины α -Ti, собранные в пакеты. Поперечные размеры пакетов достигают 15 мкм, а поперечные размеры пластин α -Ti не превышают 1 мкм. Объемная доля β -фазы в данных образцах возрастает до 6%. Изменения микроструктуры и фазового состава образцов сопровождаются ростом их твердости и модуля Юнга до 3,8 ГПа и 131 ГПа соответственно.

В образцах из технического титана ВТ1-0, полученных в режимах 1 и 2, также формируется однородная столбчатая зеренная структура. Внутри зерен наблюдается пластинчатая структура, однако в отличие от сплава ВТ6 продольные и поперечные размеры пластин α -Ti практически не зависят от режима 3D-печати. Также образцы ВТ1-0 характеризуются одинаковыми значениями модуля Юнга (128 ГПа). В то же время твердость образцов, напечатанных в режиме 1 (2,9 ГПа), оказывается ниже, чем в режиме 2 (3,4 ГПа).

Таким образом, проведенные исследования продемонстрировали возможность управления микроструктурой и улучшения механических свойств 3D-напечатанных образцов из сплавов ВТ1-0 и ВТ6 путем изменения параметров электронно-лучевой плавки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-48-700009.