

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ 3D-НАПЕЧАТАННЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V

Панин А.В.<sup>а</sup>, Казаченок М.С., Первалова О.Б., Мартынов С.А.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

<sup>а</sup> pav@ispms.ru

Среди многообразия аддитивных технологий получения трехмерных металлических изделий, особое место занимает метод, основанный на плавлении подаваемого проволочного материала под действием электронного излучения (англ. Wire-based Electron Beam Additive manufacturing). Достоинством данного метода является практически 100% эффективность использования расходного материала, а также чрезвычайно высокая скорость послойного выращивания, которая достигает  $2500 \text{ см}^3 / \text{час}$ . В тоже время, необходимость плавления титановой проволоки, диаметр которой достигает 1 мм, обуславливает длительное существование ванны расплава и интенсивный нагрев прилегающих областей. Как следствие, полученные титановые изделия характеризуются крупнозернистой структурой в отличие от значительно более мелкозернистой структуры изделий, полученных в процессе плавления металлического порошка лазерным или электронным лучами.

Эффективным способом уменьшения размера наследственного  $\beta$ -зерна 3D-напечатанных титановых изделий является увеличение скорости теплоотвода за счет водяного охлаждения подложки. Очевидно, что изменение скорости охлаждения титанового сплава оказывает существенное влияние на микроструктуру и фазовый состав формирующихся изделий. Последнее подтверждается различной микроструктурой (либо  $\alpha + \beta + \text{остаточная } \alpha'$ , либо  $\alpha'$ , либо  $\alpha + \alpha'$ , либо  $\alpha'' + \alpha + \beta$ ) и, соответственно, различными механическими свойствами изделий из сплава Ti-6Al-4V полученных методами электронно-лучевой плавки и вневакуумных лазерных технологий, характеризующихся различной скоростью охлаждения.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния охлаждения подложки на размер  $\beta$ -зерна, фазовый состав и параметры кристаллической решетки  $\alpha$ -Ti в 3D-напечатанном образце сплава Ti-6Al-4V. 3D-печать образцов титанового сплава Ti-6Al-4V осуществлялась методом электронно-лучевого плавления сварочной титановой проволоки диаметром 1.6 мм на установке 6E400 (ООО «НПК ТЭТа», Томск).

Установлено, что использование водяного охлаждения подложки в процессе 3D печати образцов сплава Ti-6Al-4V приводит к формированию наследственных  $\beta$ -зерен анизотропной формы, поперечный и продольный размеры которых меньше, чем в образцах, полученных без охлаждения, и составляют 500 мкм и 2.5 мм.

Методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа показано, что вторыми фазами в 3D-напечатанных образцах Ti-6Al-4V являются  $\beta$ -Ti и  $\alpha''$ -Ti, объемная доля которых зависит от скорости охлаждения. В образцах без охлаждения водой в процессе печати суммарная объемная доля вторых фаз достигает 14 об.%, при этом объемная доля остаточной  $\beta$ -фазы не превышает 2%. В случае охлаждения объемная доля  $\beta$ -фазы увеличивается до 5%, в то время как объемная доля фазы  $\alpha''$ -Ti мала и не выявляется методом РСА. Использование водяного охлаждения подложки приводит к увеличению упругой макродеформации 3D-напечатанных образцов Ti-6Al-4V. Между величиной упругой макродеформации и объемной долей вторых фаз наблюдается обратно-пропорциональная зависимость.

*Работа выполнена в рамках Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» Министерства науки и высшего образования РФ; Соглашение № 05.583.21.0089, идентификатор проекта RFMEFI58318X0089.*