

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ В 3D-НАПЕЧАТАННЫХ
ИЗДЕЛИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ПЛАВЛЕНИЯ
ПРОВОЛОКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V С ДОБАВЛЕНИЕМ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ
Ti+TiC**

A.O. Buyluk

Научный руководитель: д. ф.-м. н. А.В. Панин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: buyluk97@mail.ru

**MICROSTRUCTURE FORMATION CHARACTERISTIC IN 3D-PRINTED PRODUCTS OBTAINED
BY ELECTRON-BEAM MELTING OF TITANIUM ALLOY Ti-6Al-4V WIRE WITH ADDITION
OF Ti+TiC POWDER COMPOSITION**

A.O. Buyluk

Scientific Supervisor: Dr. P.-M. S. A.V. Panin

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: buyluk97@mail.ru

***Abstract.** Currently, 3D printing and additive technologies are receiving a lot of attention in research centers around the world. Since titanium is a chemically active metal, electron beam technologies seem to be the most promising for the development of technology for 3D surfacing of metals from titanium-based alloys. In this work, the microstructure and mechanical properties of samples obtained with simultaneous feeding of the wire of titanium alloy Ti-6Al-4V and powder mixture (Ti + TiC) in the process of 3D printing were investigated.*

Введение. Современные темпы развития промышленности требуют выбора технологий производства, требующих наименьших затрат и выполняемых в кратчайшие сроки [1]. Наряду с новыми и передовыми технологиями можно отметить быстрое развитие аддитивных технологий, позволяющих создавать металлические изделия уникальной формы. Методами аддитивных технологий создаются изделия за счет послойного добавления расходного материала, который сплавляют лазером или электронным лучом в зависимости от метода печати. Одним из наиболее распространенных методов аддитивных технологий является электронно-лучевое плавление проволоки (Electron Beam Freeform Fabrication – EBF₃). Преимуществами данного метода является дешевизна изготовления деталей, так как отходы во время печати практически отсутствуют, также довольно высокая, по сравнению с другими технологиями, скорость создания объекта [2]. Одним из недостатков данного метода является формирование неоднородной структуры со столбчатыми зёрнами, направление роста которых совпадает с направлением построения изделий. Последнее негативно сказывается на механических свойствах 3D-напечатанных изделий. Одним из возможных вариантов предотвратить рост зёрна, а также сформировать однородную микроструктуру в процессе 3D-печати, а, следовательно, повысить механические характеристики изделий, является одновременная подача порошковой смеси в ванну расплава при создании 3D-напечатанных изделий методом электронно-лучевого плавления проволоки (EBF₃) из

титанового сплава Ti-6Al-4V. Целью работы являлось исследование структуры и механических свойств образцов, полученных методом EBF₃ проволоки из титанового сплава Ti-6Al-4V с добавлением порошковой смеси Ti+TiC в процессе 3D-печати.

Материалы и методы. Формирование изделий, из которых в дальнейшем изготавливались образцы для исследования, осуществлялось на установке ЭЛУ-9 (ИФПМ СО РАН, г. Томск). Порошковые смеси состава Ti+TiC смешивали в двух пропорциях, с помощью шаровой мельницы 8000M Mixer/Mill (НИ ТПУ, г. Томск), объемная доля TiC составила (2 и 4% вес.). Микроструктуру образцов изучали на оптическом микроскопе ZEISS AXIOVERT 40 MAT. Микротвердость измеряли на твердомере ПМТ-3 при нагрузке 50 грамм. Испытания на одноосное статическое растяжение проводили на испытательной машине INSTRON 5582 при комнатной температуре.

Результаты. Металлографический анализ образца, полученного методом электронно-лучевого плавления проволоки из титанового сплава Ti-6Al-4V показал, что микроструктура данного образца состоит из столбчатых зерен (рис.1а), поперечный размер которых составляет 1 мм, а их продольный размер ограничивается высотой создаваемого изделия. При электронно-лучевом плавлении проволоки из титанового сплава Ti-6Al-4V с добавлением порошковой смеси Ti+TiC в ванну расплава, формируется структура с равноосными зернами, поперечный размер которых варьируется от 400 до 800 микрон (рис.1 б.). Методом растровой электронной микроскопии, было получено изображение микроструктуры образца, полученного методом EBF₃ проволоки титанового сплава Ti-6Al-4V с добавлением порошковой смеси Ti+TiC, которая напоминает классическую видманштеттовую структуру (рис.1 в), характерную для титановых α+β – сплавов, поперечный размер пластинок составляет 1 микрон.

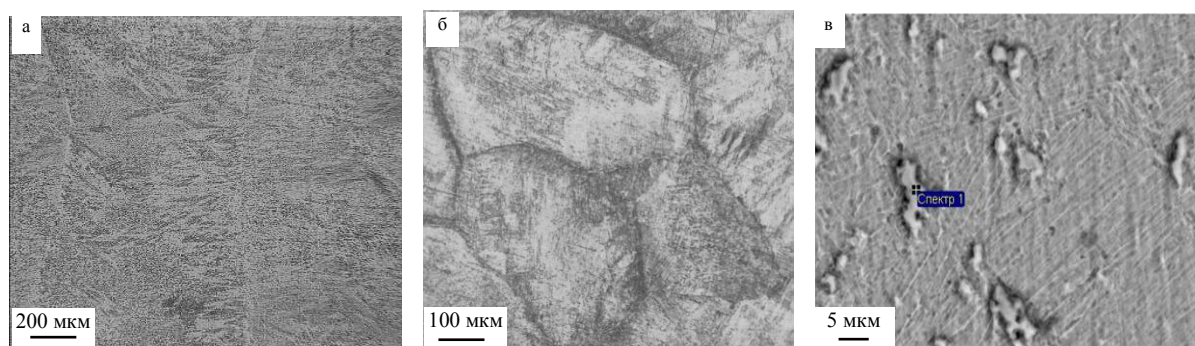


Рис. 1. – Оптические изображения микроструктуры 3D-напечатанных образцов титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом EBF₃ проволоки (а) и методом EBF₃ проволоки с добавлением порошковой смеси Ti+TiC (б), а также РЭМ-изображение образца, полученного методом EBF₃ проволоки с добавлением порошковой смеси Ti+TiC

Испытания на одноосное статическое растяжение показали, что для образца, полученного методом EBF₃ из проволоки титанового сплава Ti-6Al-4V, предел прочности составил 750 МПа, а относительное удлинение 7%. Одновременная подача проволоки титанового сплава Ti-6Al-4V и порошковой смеси (Ti+TiC) в процессе 3D-печати, приводит к увеличению значения предела прочности, но уменьшает пластичность образца. Как видно из рисунка 2, образец в котором объемная доля порошковой смеси (Ti+TiC) составила (2 % вес.), увеличивает предел прочности до 880 МПа и снижает пластичность до 4 %.

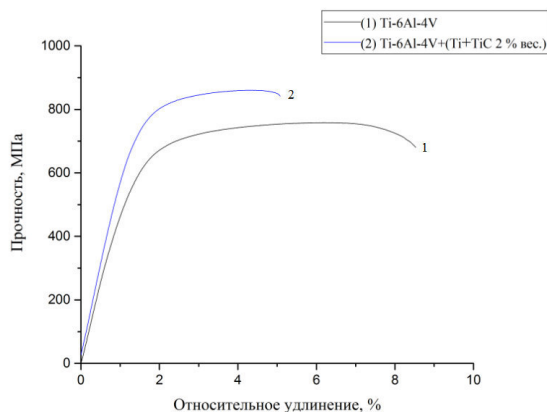


Рис. 2. – Кривые растяжения 3D-напечатанных образцов, полученных методом EBF₃ из проволоки титанового сплава Ti-6Al-4V (1) и титанового сплава Ti-6Al-4V с добавлением порошковой смеси Ti+TiC (2% вес.) (2)

В работе была экспериментально измерена микротвердость исследуемых образцов. Значение микротвердости для образца, полученного методом электронно-лучевого плавления проволоки из титанового сплава Ti-6Al-4V составило $H_{\mu} = 3800$ МПа. Добавление порошковой смеси Ti+TiC (2% вес.) и (4% вес.) при электронно-лучевом плавлении титанового сплава Ti-6Al-4V, приводит к увеличению значения микротвердости до $H_{\mu} = 6000$ МПа.

Заключение. Микроструктура 3D-напечатанного образца, полученного методом электронно-лучевого плавления проволоки из титанового сплава Ti-6Al-4V, характеризуется крупными столбчатыми зёрнами, поперечный размер которых (1 мм), добавление порошковой смеси Ti+TiC в ванну расплава, приводит к подавлению столбчатого роста зерна и формированию в 3D-напечатанных образцах равноосных зёрен, с пластинчатой морфологией внутри. Минимальный размер зёрен (400 мкм) достигается в образце с объёмной долей TiC (2% вес.)

Добавление порошковой смеси состава Ti+TiC, приводит к увеличению механических характеристик 3D-напечатанных образцов. Микротвердость и предел прочности 3D-напечатанного образца, полученного методом EBF₃ проволоки из титанового сплава Ti-6Al-4V составляет 3800 МПа и 750 МПа, соответственно, в то время как после добавления порошковой смеси Ti+TiC (2% вес.) в ванну расплава значение микротвердости и предел прочности увеличиваются, до 6000 МПа и 880 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончарова О.Н., Бережной Ю.М., Бессарабов Е.Н., Кадамов Е.А., Гайнутдинов Т.М., Нагопетьян Е.М., Ковина В.М. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство: Справочник: инженерный вестник № 4.2016.
2. Taminger, K.M.B. and Hafley, R.A., “Characterization of 2219 Aluminum Produced by Electron Beam Freeform Fabrication,” Proceedings of 13th SFF Symposium, 482-489, (2002).