

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

К. Д. КАМЕЛИНА

Томский политехнический университет

E-mail: kdk11@tpu.ru

В последние годы большое распространение получили аддитивные технологии, которые имеют ряд существенных преимуществ перед традиционным изготовлением [1]. Аддитивные технологии имеют наибольшую перспективу применения при изготовлении изделий из титановых сплавов, в частности, из титанового сплава Ti-6Al-4V, который широко используется в авиакосмической технике, в медицине, химической промышленности и т.п. Однако образцы, полученные аддитивными технологиями из титановых сплавов, по своей микроструктуре отличаются от образцов, полученных традиционной обработкой металлов. Структура образцов зависит от параметров печати, которые подбираются экспериментально путём исследования 3D-напечатанных образцов. Таким образом, целью данной работы является изучение закономерностей формирования микроструктуры и фазового состава титанового сплава Ti-6Al-4V в процессе 3D-печати.

Прямоугольный брусок из сплава Ti-6Al-4V с размерами 18 мм × 12 мм × 60 мм был получен путем электронно-лучевого плавления проволоки диаметром 1,5 мм в вакууме $1,3 \times 10^3$ Па электронной пушкой с плазменным катодом при ускоряющем напряжении 30 кВ, ток пучка составлял 46 мА. Подача проволоки осуществлялась со скоростью 2 м/мин под углом 35° к поверхности подложки из 16X18H10T. Методом электроискровой резки были вырезаны образцы из продольной и поперечной частей, рисунок 1.

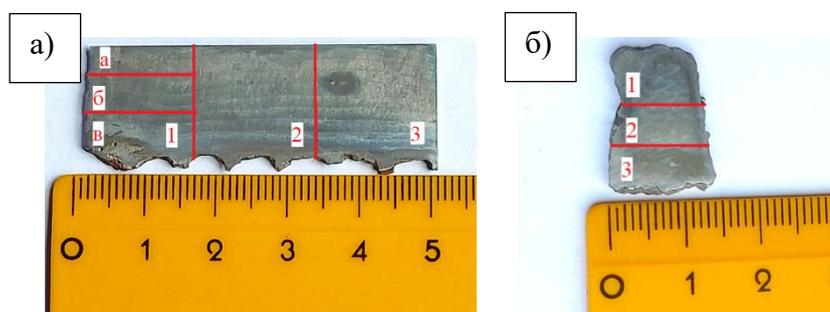


Рисунок 1 – Области исследования срезов аддитивно полученного образца:
а) продольного; б) поперечного

Микроструктура образца Ti-6Al-4V в месте продольного среза состоит из первичных β зёрен неравноосной формы, рисунок 2. Зеренная структура однородна по длине образца. Поперечные размеры зёрен варьируются в пределах 120-175 мкм, продольные – 200-400 мкм.

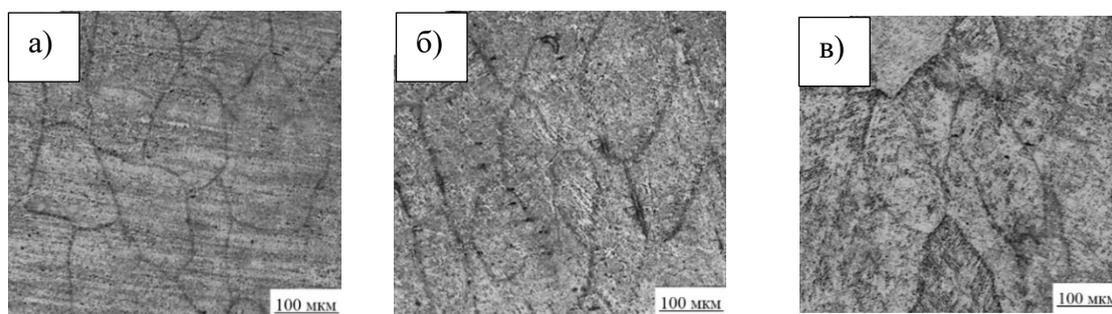


Рисунок 2 - Оптические изображения зеренной структуры областей 1 (а), 2 (б) и 3 (в) продольного среза 3D-напечатанного образца титанового сплава Ti-6Al-4V

Вблизи подложки (зона в) и в центре 3D-напечатанного образца (зона б) наблюдается формирование равноосных первичных β зёрен, рисунок 3 а, 3 б). Однако в верхней части образца (зона а) образуются неравноосные β зёрна с продольными размерами 200-460 мкм и поперечными размерами 160-240 мкм. С увеличением расстояния от подложки размеры зерен увеличиваются.

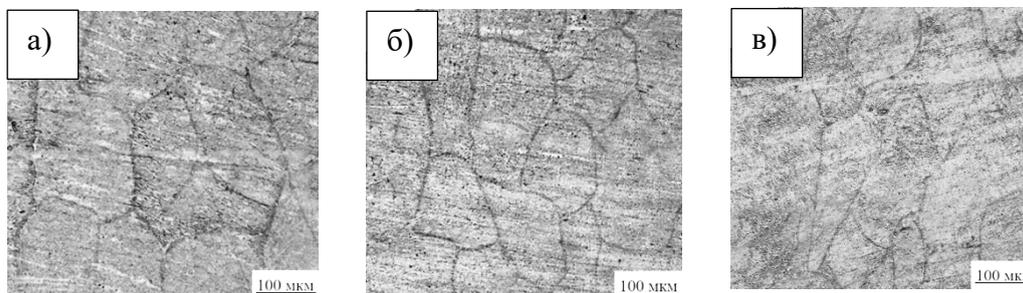


Рисунок 3 – Оптические изображения зеренной структуры областей в (а), б (б) и а (в) продольного среза 3D-напечатанного образца титанового сплава Ti-6Al-4V

Микроструктура поперечного среза состоит из первичных β зерен, форма и размеры которых различны по высоте образца. В средней части образца формируются равноосные зерна с поперечным размером 125-375 мкм, рисунок 4 а. В верхней части образца наблюдаются неравноосные зерна, ориентированные вдоль направления построения, рисунок 4 б, с продольными и поперечными размерами 910 и 350 мкм соответственно.

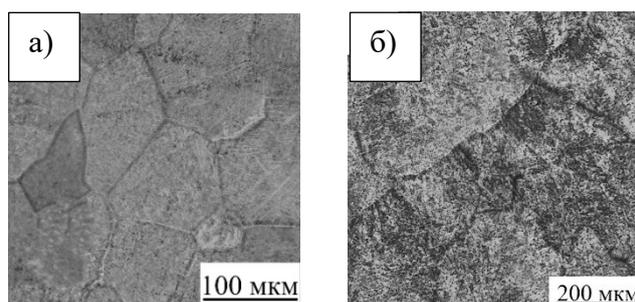


Рисунок 4 – Оптические изображения зеренной структуры областей 2 (а) и 1 (б) поперечного среза 3D-напечатанного образца титанового сплава Ti-6Al-4V

Анализ элементного состава 3D-напечатанного образца из сплава Ti-6Al-4V показал, что в нижней его части (вблизи подложки) выявляются элементы, входящие в состав нержавеющей стали, таблица 1. Необходимо отметить, что присутствие небольшого содержания железа допускается в сплаве Ti-6Al-4V [2].

Таблица 1 – Химический состав (массовая доля в %) срезов 3D-напечатанного образца из сплава Ti-6Al-4V в различных областях

Срез	Область	Al	V	Fe	Cr	Ni	Ti
Продольный	г	6,7	4,7	0,1	-	-	88,5
	д	6,7	4,6	0,1	-	-	88,6
	е	6,5	4,3	6,1	0,9	0,9	81,2
Поперечный	1	5,1	4,3	0,1	-	-	90,3
	2	5,4	4,1	0,9	0,3	0,1	89,2
	3	5,0	3,4	13,1	3,0	1,8	73,5

Методом рентгеноструктурного анализа обнаружено, образец титанового сплава Ti-6Al-4V характеризуется выраженной текстурой в направлении (101). Кроме того, объемная доля остаточной β фазы по высоте образца существенно изменяется. Так, по мере удаления от подложки в поперечном срезе образца уменьшается объемная доля β -фазы титана: у подложки её содержание 60,3%, в средней части – 28,5%, в верхней – 2,6%; наряду с этим происходит увеличение содержания α -фазы. В продольном срезе наблюдается однородность фазового состава (94,5-95,5% α -фазы титана и 4,5-5,5% β -фазы) в области удаления от подложки и увеличение содержания β -фазы вблизи неё до 17,7%. Большое содержание β -фазы титана в нижних частях образцов связано с наличием в них элементов нержавеющей стали (Fe, Ni, Cr), которые являются β -стабилизаторами.

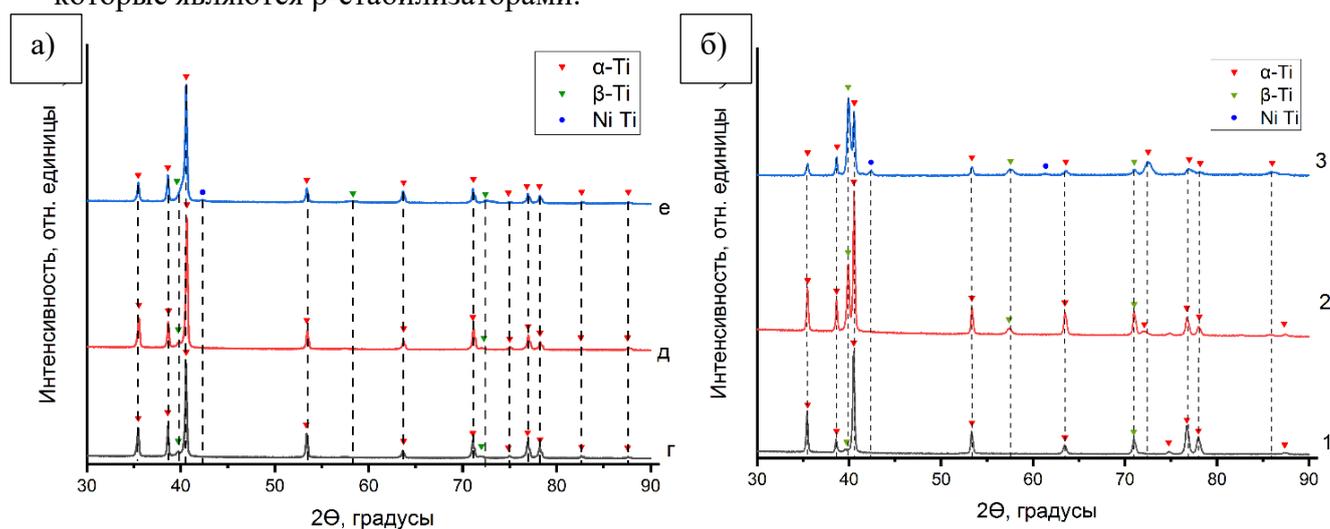


Рисунок 5 – Дифрактограммы 3D-напечатанного образца Ti6Al4V, полученные в продольном (а) и поперечном (б) срезах

На основе проделанной работы сделаны следующие выводы:

1. Выявлено, что зеренная структура 3D-напечатанного образца Ti6Al4V однородна по длине, однако неоднородна по высоте. По мере удаления от подложки в исследованном образце Ti6Al4V наблюдается увеличение зёрен от 120-375 мкм в нижней части до 300-910 мкм в верхней части.
2. Показано, что вблизи подложки содержатся элементы нержавеющей стали, что свидетельствует о проникновении материала подложки в образец. Проникновение нержавеющей стали в изделие обусловлено её испарением и диффузией в титановый сплав.
3. Обнаружено, что по мере удаления от подложки в поперечном срезе образца уменьшается объемная доля остаточной β -фазы. Повышенное содержание β -фазы титана в нижних частях образцов связано с наличием в них некоторых элементов нержавеющей стали (Fe, Ni, Cr).
4. Показано, что выбранная стратегия позволяет достичь однородности микроструктуры и фазового состава в направлении наплавления проволоки, но у стратегии существует и недостаток: проникновение материала подложки в титановый сплав в местах прерывания проволоки вследствие испарения, что негативно отражается на свойствах изделия.

Список литературы

1. Казанцева Н.В., Крахмалев П.В., Ядройцева И.А., Ядройцев И.А. Лазерная аддитивная 3D-печать титановых сплавов: современное состояние, проблемы, тенденции // Физика металлов и металловедение. – 2021. – № 1. – С. 8-30.
2. Цвиккер У. Титан и его сплавы. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.