



Рис. 1. (А) принципиальная схема карбонизации UiO-66 на поверхности PET. Исследование структуры материала PET@LB-UiO-66: (Б) рентгеновская дифрактограмма; (В) спектр комбинационного рассеивания; (Г) SEM изображение

структур (D, G и 2D в области 1362 см^{-1} , 1577 см^{-1} и 2670 см^{-1} соответственно). Методом SEM показано образование углеродного слоя с относительно гладкой пористой поверхностью (рисунки 1Г).

Таким образом, исследование физико-химических свойств PET@LB-UiO-66 показало, что

лазерная карбонизация привела к образованию композитного материала из расплавленного PET с импрегнированным графеноподобным материалом и частицами ZrC.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2022-244.

Список литературы

1. Semyonov O., Chaemchuen S., Ivanov A., Verpoort F., Kolska Z., Syrtanov M., Svorcik V., Yusubov M. S., Lyutakov O., Guselnikova O., Postnikov P. S. // *Appl. Mater. Today*, 2021. – 22. – 100910.
2. Semyonov O., Kogolev D., Mamontov G., Kolobova E., Trelin A., Yusubov M. S., Guselnikova O., Postnikov P. S. // *Chem. Eng. J.*, 2022. – 431. – 4. – 133450.
3. Kogolev D., Semyonov O., Metalnikova N., Fatkullin M., Rodriguez R. D., Slepicka P., Yamachi Y., Guselnikova O., Boukherroub R., Postnikov P. S. // *J. Mater. Chem. A.*, 2023. – 11. – 3. – 1108–1115.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОКНА ОПТИМАЛЬНЫХ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ПЛАВЛЕНИЯ Ti-42Nb СПЛАВА

М. Козадаева, И. Ю. Грубова, Р. А. Сурменев
 Научный руководитель – к.ф.-м.н., в.н.с. М. А. Сурменова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, mariakoz71@gmail.com

В настоящее время широко изучается применение аддитивных технологий для получения изделий из металлов и сплавов для медицинских применений. Одним из самых перспективных методов является послойное электронно-лучевое плавление (ЭЛП). Титан и титановые спла-

вы обладают отличной коррозионной стойкостью, малым весом, высокой прочностью, а также биосовместимы с тканями тела человека [1]. Однако модуль упругости титановых сплавов, используемых в медицине, намного выше, чем у человеческой кости [2]. Добавление ниоб-

ия позволяет снизить модуль упругости сплава, путем стабилизации β -фазы [3]. Так как ЭЛП – сложный технологический процесс, на данный момент только для ограниченного количества сплавов отработаны режимы получения изделий высокого качества. В настоящей работе проведена отработка режимов печати для титанового сплава с содержанием ниобия 42 вес. % (Ti-42Nb) и подобраны оптимальные параметры.

Исходным материалом был выбран предварительно легированный порошок Ti-42Nb (Taniobis GmbH). Для поиска оптимального окна параметров ЭЛП на установке ARCAM A2 EBM (GE Additive, Швеция) было выбрано 49 режимов для изготовления образцов сплава размером $15 \times 15 \times 15$ мм. Поверхностная энергия пучка менялась в диапазоне 2,40–5,15 Дж/мм², скорость сканирования – 300–2000 мм/с. Исходя из полученных результатов оптических исследований (NT MDT, Россия), было определено окно технологических параметров для послойного ЭЛП сплава Ti-42Nb, а также построена зависимость влияния параметров печати на формирование разных типов дефектов в объёме и на поверхности образцов. Режимы с малым током пучка 3,5 мА и скоростями сканирования 700 и 900 мм/с характеризовались большей долей несплавленных дефектов (крупных пор с несплавленными или не полностью расплавленными частицами порошка [4], разбросанными по направлению печати), а также в виде не проплавленных областей около границы слоёв. Повышение скорости сканирования приводит к образованию неглубоких ванн расплава, оставляя длинные области не полностью расплавленного порошка, что также подтверждается высокой пористостью 17,4 % и 21,7 % образцов, изготовленных при скорости сканирования 700 мм/с и 900 мм/с, соответственно. Сочетание высоких значений скорости сканирования и тока

пучка приводит к образованию аналогичных дефектов. Однако из-за более глубокого проникновения пучка в металл под слоем порошка возможно образование крупных и сферических пор внутри слоя. Образцы с максимальным током и скоростью сканирования – 5 мА, 800 мм/с, 5 мА, 900 мм/с и 7,5 мА, 900 мм/с – имеют пористость 12,0 %, 13,9 % и 8,8 % соответственно. Кроме того, в других исследованиях образцы с высокой мощностью пучка и скоростью сканирования демонстрируют так называемое «комкование» [5]. Наиболее удачными являются образцы, полученные при токе пучка 4 мА. При скоростях сканирования 700 и 800 мм/с они показали наименьшую пористость 5,4 и 5,6 %. Такое сочетание параметров при среднем токе и низкой скорости сканирования привело к практически полному сплавлению металла.

При малой скорости сканирования (700 мм/с) ток пучка 5 и 7,5 мА приводит к выделению избыточной локальной тепловой энергии, что приводит к образованию в образцах пор типа «замочная скважина». Недавние исследования характеристик ванны расплава показывают, что такие поры могут образовываться в результате испарения низкоплавких элементов сплава [5]. Из-за высокой скорости охлаждения и высокой вязкости металла в ванне расплава газ не может выйти со дна ванны расплава. Пористость образцов, изготовленных в режимах 5 и 7,5 мА 700 мм/с, составляет 18,7 % и 5,9 %, а при режиме 7,5 мА, 800 мм/с – 10,4 %.

Анализ РФА (Shimadzu Corp., Япония) показал наличие β -фазы, а также мартенситной α'' -фазы. Особенно образцы полученные в режимах 4 и 7,5 мА 700 мм/с. Согласно авторам [6], небольшое количество данной фазы в β -сплавах приводит к улучшению механических свойств. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 20-73-10223.

Список литературы

1. Niinomi M. // *Tesu-to-Hagane*, 2002. – Vol. 88. – № 9. – P. 567–574.
2. Ryan G., Pandit A. // *Biomaterials*, 2006. – Vol. 27. – P. 2651–2670.
3. Fischer M. // *Mater. Sci. Eng. C.*, 2016. – Vol. 62. – P. 852–859.
4. Motyka M. // *Compr. Mater. Proc.*, 2014. – Vol. 2. – P. 7–36.
5. Cao S. // *Light: Adv. Manuf.*, 2021. – Vol. 2. – № 2. – P. 1.
6. Surmeneva M. A. // *J. Mater. Process. Technol.*, 2020. – Vol. 282.