

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КАРБОАЛЮМИНИДА ТИТАНА

М.П. Рагулина, М.Г. Криницын

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н., Б.С. Зенин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: Alisa.barton112@gmail.com

**THE EFFECT OF LASER PROCESSING ON THE PHASE COMPOSITION
OF TITANIUM CARBOALUMINIDE**

M.P. Ragulina, M.G. Krinitcyn

Scientific Supervisor: Docent, PhD, B.S. Zenin

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

E-mail: Alisa.barton112@gmail.com

***Abstract.** In the present study, we performed the selective laser sintering of the Ti_3AlC_2 powder and investigated the phase composition of the powder after processing at different power. A comprehensive structural-phase study was carried out using optical and electron microscopy techniques, as well as XRD and EDX analysis. This study allowed to describe the elemental and phase composition, the morphologies of both the initial powders and bulk samples. Modes of laser processing are established at which the maximum presence of the MAX phase in the samples after sintering is observed.*

Введение. Тройные карбиды и нитриды, именуемые МАХ-фазами, формируют новый класс материалов, который обладает весьма специфическими свойствами, сочетая в себе свойства, как металлических сплавов, так и керамических материалов [1, 2]. Подобно металлам, эти соединения показывают высокую тепловую и электрическую проводимость, а также достаточно высокую стойкость к тепловым ударам. При этом подобно керамике они обладают высоким модулем упругости, низким тепловым коэффициентом расширения, высокой теплостойкостью и превосходной жаростойкостью. Сопротивление МАХ-фаз циклическим нагрузкам при температурах выше 1000 °С не уступает, а зачастую превосходит сопротивление циклическим нагрузкам большинства известных жаропрочных и жаростойких материалов, в том числе никелевых сплавов и сплавов на основе интерметаллидов. В совокупности с низким удельным весом эти свойства МАХ-фаз открывают широкие перспективы для их применения в различных отраслях промышленности [3].

Одни из наиболее перспективных МАХ-фаз формируются в системе Ti-Al-C. Материалы этой системы могут быть использованы как материалы с высокой прочностью и деформационной устойчивостью, в том числе при циклической нагрузке [4], а при химическом вытравливании алюминия формируются так называемые максены (MXenes), которые, благодаря своей наноламинатной структуре, могут быть использованы, в том числе для запасаения электрической энергии или водорода [5, 6]. Кроме того, МАХ-фазы системы Ti-Al-C имеют стойкость к высокотемпературному окислению и сохраняют высокие значения механических свойств даже при высоких температурах [7].

Существующие на сегодняшний день методы работы с МАХ-фазами либо не подразумевают формирования изделий (СВС [8]), либо предусматривают формирование высокоплотных изделий из МАХ-фаз простой геометрии (ИПС [9], ГИП [10]). При этом процессы ИПС и ГИП являются очень дорогостоящими в связи с технической сложностью оборудования, что при промышленной реализации приводит к сильному удорожанию изделий из МАХ-фаз. Альтернативой указанным методам может стать аддитивная технология селективного лазерного спекания, позволяющая получать изделия свободной формы без существенных экономических затрат, однако, требуется исследование влияния лазерной обработки на порошок МАХ-фаз.

Целью данной работы являлось исследование влияния тепловложения при лазерной обработке порошка Ti_3AlC_2 на изменение фазового состава порошка.

Экспериментальная часть. В качестве исходного материала использовался порошок Ti_3AlC_2 (Wuhan Golden Wing, Китай; чистота не менее 98%, $d_{50} = 10$ мкм). Образцы для исследований были получены аддитивным методом на установке селективного лазерного спекания/сплавания ЛУЧ-500. Данная установка разработана и создана в Томском политехническом университете и приспособлена для создания лабораторных и малогабаритных образцов по технологии СЛС. В качестве исходного материала в установке ЛУЧ-500 используется порошок, при этом бункер установки приспособлен для работы с порошками низкой текучести. Исследования полученных образцов проводились с привлечением растровой электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа.

Результаты. Методом СЛС были получены объемные образцы из порошка. Образцы состоят из 5 слоев толщиной 100 мкм. На поверхности образцов видны треки – следы от прохода лазера. В ходе экспериментов варьировали мощность и скорость сканирования лазера, расстояние между треками было установлено на уровне 400 мкм для всех экспериментов.

Исследование образца с применением растровой электронной микроскопии показало, что треки от лазера видны в связи с разной структурой в разных участках образца. Области порошка, находящиеся в центре лазерного пучка в ходе СЛС, переплавляются, о чем свидетельствует существенно измененная структура порошка в данной области, представляющая собой кристаллизованные капли расплавленного материала. Судя по всему, данные капли – это карбид титана, образовавшийся в ходе разложения МАХ-фазы. Это частично подтверждается наличием только титана и углерода в данных областях при микроанализе.

Структура спеченного порошка в области, удаленной от центра прохода лазера, в целом соответствует структуре исходного порошка, что позволяет предположить о сохранении МАХ-фазы в данных областях.

Исследование полученного образца методом рентгеноструктурного анализа показало, что фаза Ti_3AlC_2 частично сохранилась в образце, также в образце присутствует фаза карбида титана, что подтверждает теорию о формировании карбида в центральной части треков. Также в образце после обработки лазером обнаруживается фаза олова, которая в исходном порошке была зарегистрирована только с применением элементного анализа. После нагрева порошка лазером олово расплавляется, «выпотевает» из порошка МАХ-фазы и кристаллизуется на его поверхности. Также после обработки на большой мощности были обнаружены сферические частицы, состоящие целиком из олова и алюминия,

что также является подтверждением «выпотевания» олова в процессе обработки лазером, а также свидетельствует о выделении алюминия из МАХ-фазы в результате её разложения.

Сохранение МАХ-фазы после СЛС возможно при относительно невысокой мощности. Так, при обработке на мощности 80 Вт порошок практически полностью состоит из кристаллизованных капель карбида титана, тогда как при мощности 60 Вт областей расплава практически не наблюдается. В данном случае использование мощности 60 Вт оптимально как с точки зрения максимизации выхода МАХ-фазы после СЛС, так и получения наиболее плотной структуры.

Заключение. Объемные образцы из порошка МАХ-фазы Ti_3AlC_2 были получены методом селективного лазерного спекания. Проведено комплексное структурно-фазовое исследование, которое позволило описать элементный и фазовый состав, а также морфологию как исходных порошков, так и объемных СЛС-образцов. Установлено, что при мощности лазера 60 Вт наблюдается максимальный выход МАХ-фазы в образцах после СЛС. Кроме этого было установлено, что в центре лазерного пучка наблюдается максимальное разрушение МАХ-фазы с формированием карбида титана.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта № 19-48-703011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weglowski M.St., Błacha S., Phillips A. // *Vacuum*. – 2016. – V.130. – P.72-92.
2. Wang X. H., Zhou Y. C. Layered machinable and electrically conductive Ti_2AlC and Ti_3AlC_2 ceramics: a review // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2010. – Т. 26., №. 5. – С. 385-416.
3. Barsoum, M.W. The MAX phases: unique new carbide and nitride materials / M.W. Barsoum, T. El-Raghy // *Am. Sci.* – 2000. – V. 89. – P. 336-345
4. Barsoum M. W., Radovic M. Elastic and mechanical properties of the MAX phases // *Annual review of materials research*. – 2011. – V. 41. – P. 195-227.
5. Tang Q., Zhou Z., Shen P. Are MXenes promising anode materials for Li ion batteries? Computational studies on electronic properties and Li storage capability of Ti_3C_2 and $Ti_3C_2X_2$ ($X= F, OH$) monolayer // *Journal of the American Chemical Society*. – 2012. – V. 134., №. 40. – P. 16909-16916.
6. Shein I. R., Ivanovskii A. L. Graphene-like titanium carbides and nitrides $Ti_{n+1}C_n$, $Ti_{n+1}N_n$ ($n= 1, 2,$ and 3) from de-intercalated MAX phases: First-principles probing of their structural, electronic properties and relative stability // *Computational Materials Science*. – 2012. – V. 65. – P. 104-114.
7. Wang X. H., Zhou Y. C. Oxidation behavior of Ti_3AlC_2 at 1000–1400 C in air // *Corrosion Science*. – 2003. – V. 45., №. 5. – P. 891-907.
8. Akhlaghi M. et al. Self-propagating high-temperature synthesis of Ti_3AlC_2 MAX phase from mechanically-activated Ti/Al/graphite powder mixture // *Ceramics International*. – 2018.
9. Zhou W. et al. Synthesis of high-purity Ti_3SiC_2 and Ti_3AlC_2 by spark plasma sintering (SPS) technique // *Journal of materials science*. – 2005. – V. 40., №. 8. – P. 2099-2100.
10. Wang X. H., Zhou Y. C. Microstructure and properties of Ti_3AlC_2 prepared by the solid-liquid reaction synthesis and simultaneous in-situ hot pressing process // *Acta Materialia*. – 2002. – V. 50. – №. 12. – P. 3143-3151.