

- [1] Mehrer, H. Diffusion in Solids / H. Mehrer. – Springer Series in Solid-State Sciences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 620 p.
- [2] Ahmed, T. Interdiffusion and thermotransport in Ni–Al liquid alloys / T. Ahmed, W. Yi Wang, R. Kozubski, Zi-Kui Liu, I. V. Belova, G. E. Murch // Philosophical Magazine. – 2018. – P. 2221–2246.
- [3] Xu R.-G. Interdiffusion of Ni-Al multilayers: A continuum and molecular dynamics study / R.-G. Xu, M. L. Falk, T. P. Weihs // Journal of Applied Physics. – 2013. – V.114. – P. 163511.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК СКАНДИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ TiAl СПЛАВА

**Н.И. Каракчиева¹, А.А. Белгибаева², И.А. Курзина¹,
Р.Ш. Еркасов², В.И. Сачков¹, Ю.А. Абзаев³**

*¹Национальный исследовательский Томский государственный
университет, г. Томск*

*²Евразийский Национальный университетим. Л.Н. Гумилева, г. Астана,
Республика Казахстан*

*³Томский Архитектурно-строительный государственный университет,
Томск, Россия*

**kosovanatalia@yandex.ru*

В настоящее время перспективными являются сплавы на основе интерметаллидов, в частности, алюминиды титана, обладающие уникальной комбинацией высоких физико-химических и механических свойств, что делает их весьма привлекательными для различных областей применения [1]. Сплавы на основе интерметаллидов титана используют в авиа- и автомобилестроении, а также для создания защитных покрытий.

Благодаря высокой температуре плавления, низкой плотности (3800-4200 кг/м³), высокой удельной прочности и хорошему сопротивлению ползучести при температурах 600-800 °С, а также хорошему сопротивлению окислению и низкой себестоимости, γ -TiAl сплавы являются альтернативой жаропрочным никелевым сплавам. Кроме того, интерметаллиды титана имеют большую удельную теплопроводность, чем керамика и керамические композиционные материалы, что обуславливает низкие термические напряжения в условиях термоциклирования [1-3].

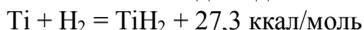
Из γ -TiAl сплавов изготавливаются мишени для ионо-плазменного напыления в вакууме [1, 3] и атмосфере азота, лопатки и лопасти компрессоров высокого давления, крупногабаритные лопатки турбин, выхлопные детали, камеры сгорания [1] и т. д. В настоящее время повышение пластичности таких сплавов имеет решающее значение для таких технологических процессов, как экструзия, прокатка, штамповка, вытяж-

ка, волочение, гибка и др., что возможно путем легирования этих сплавов редкоземельными металлами, а в частности, скандием.

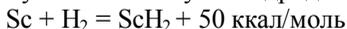
Целью данной работы было изучить влияние добавок скандия на структуру и фазовый состав интерметаллидного титанового сплава, полученного по «гидридной технологии».

Материалы и методика исследования

Содержание компонентов соответствовало стехиометрическому составу по фазовой диаграмме системы Ti:Al=1:1 для получения интерметаллидных фаз γ -TiAl. За основу сплава принята система Ti-Al с 2 % ат. добавками Sc (TiAlSc). Образец получали следующим образом: взвешенное количество титана помещали в кварцевую лодочку и нагревали в печи в непрерывном потоке водорода до 450 °С, затем образец выдерживали в течение 3 ч при 450 °С и охлаждали до комнатной температуры.

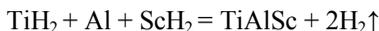


Гидрид скандия получали как в случае гидроксида титана:



Полученные гидриды металлов смешивали с порошком алюминия (средний размер частиц составляют 115 ± 10 нм, удельная поверхность - $19,4 \pm 3$ м²/г, содержание алюминия - $80,8 \pm 0,6$ %). Полученную смесь прессовали при нагрузке 5,3 т/см², насыпная плотность заготовки составляла 3 г/см³. Далее образец заготовки отжигали в вакуумной системе при 1150 °С. Значение вакуума составляло 10^{-4} атм.

Уравнение получения образца TiAlSc можно написать следующим образом:



Электронно-микроскопические исследования микроструктуры TiAlSc методом просвечивающей электронной микроскопии выполнены на приборе «JEM-2100F» при ускоряющем напряжении 200 кВ с приставкой «JEOL» для энергодисперсионного спектрального анализа. Фазовый анализ системы TiAlSc проводили методом рентгенофазового анализа на приборе ДРОН4 – 07, который модифицирован к цифровой обработке сигнала. Съемки производились на медном излучении (K α) по схеме Брегга-Бретано с шагом 0.020, временем экспозиции в точке 1 сек и в угловом диапазоне 10°-86°. Напряжение на рентгеновской трубке составляло 30 кВ, ток пучка 25 мА. Идентификация фаз и количественное содержание фаз осуществлялось методом Ритвельда [4].

Результаты исследований и обсуждение

Рентгенофазовый анализ образца TiAlSc, полученного гидридной технологией, имеет сложное многофазное строение: TiAl, Ti₃Al, Ti₂Al, Ti₂Al₅, Ti₅Al₁₁, Ti_{1,5}Al_{2,5} [1].

Исследована микроструктура сплава TiAlSc (рис. 1). При проведении локального анализа микроструктуры с помощью энергодисперсионного микроанализа установлено, что пластинчатые зерна содержат алюминий и титан и соответственно являются зернами титан-алюминиевого сплава, в котором в малом количестве (менее 1,5 ат. %) содержится скандий. Отдельные частицы неправильной формы соответствуют частицам скандия, непрореагировавшего с сплавом, средний поперечный размер может достигать до 1 мкм.

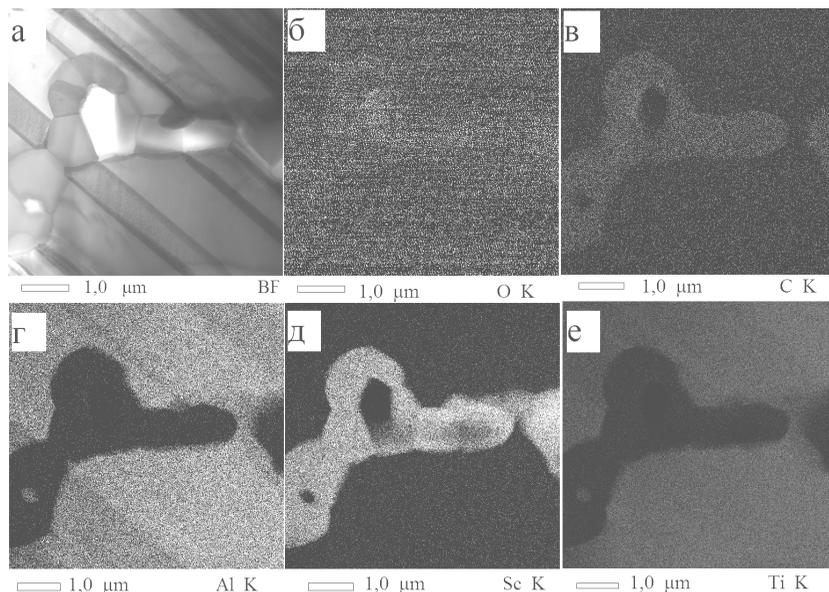


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение: а) светлопольное изображение; б-е) распределение элементов

Пластинчатые серые области – это зерна матрицы на основе Ti-Al с содержанием частицы вторичных фаз O, C и не прореагировавший в условиях спекания Sc, последовательно расположенные соединенные частицы (цепочка) – область, представляющий собой твердый раствор на основе Sc. При проведении элементного анализа в локальных точках также показано, что массовая доля скандиевых включений в цепочке составляет 76-81 %. В цепочке содержание Ti составляет не выше 13,10 % масс., Al – не выше 6,47 % масс. Кроме того, в больших количествах присутствует кислород (около 24 % масс.). В серых пластинчатых областях кроме Ti, объемная доля которого составляет более 60 мас. %, присутствует Al (до 33 % масс.), O (1-2 % масс.) и C, количество которо-

го в отдельных областях может достигать 50 мас. %. Из анализа следует, что серые пластинчатые области обогащены титаном и алюминием, а область цепочки – скандием.

Результаты рентгеноструктурного анализа и растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным анализатором согласуются с результатами просвечивающей электронной микроскопии. На индифицированной схеме обнаружены рефлексы, принадлежащие плоскостям (403), (404), (002), (201) и (220) Ti_3Al ; (413), (301) и (002) $TiAl$; (228) Ti_5Al_{11} ; (330) Ti_3Al_5 ; (117) Ti_2Al_5 ; (440) $TiAl_2$; (114) Ti ; (110) Sc (рис. 2). Таким образом, данные просвечивающей электронной микроскопии подтверждают сложное многофазное структурное строение сплава $TiAlSc$.

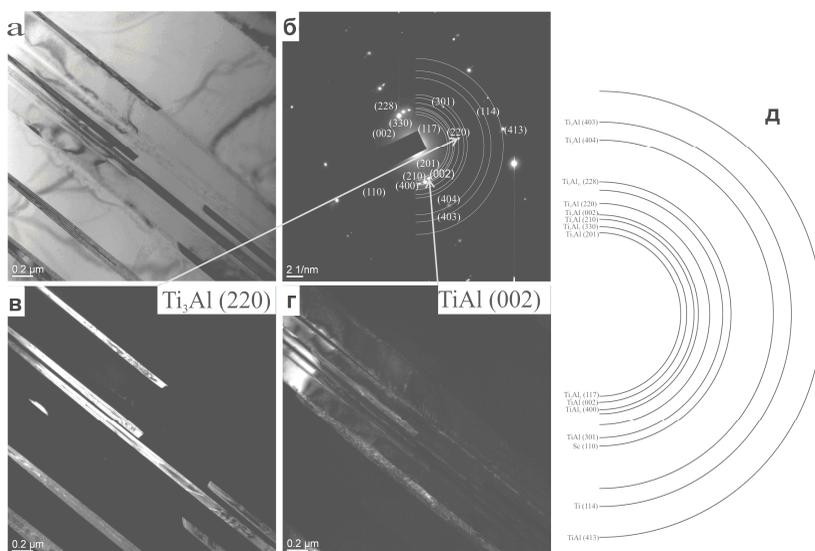


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения $TiAlSc$: а) светлопольное изображение; б) микродифракционная картина; в, г) темнопольные изображения в рефлексах, отмеченных стрелками; д) идентификация микродифракционной картины

Поскольку атомный радиус скандия (2,09 Е) отличается от атомного радиуса титана (2 Е) на 4 %, то Sc может образовать твердый раствор замещения в титане и способствовать формированию видманштетовой микроструктуры с темными и светлыми участками фаз приблизительно одинакового химического состава. Кроме того, скандий присутствует

отдельными частицами нерастворенными в интерметаллидных фазах (рис. 2 е).

Результаты исследования просвечивающей электронной микроскопии согласуются с данными рентгенофазового анализа, из которых следует, что незначительное количество Sc растворяется в кристаллах Ti_3Al и существует в виде $Ti_3(Al, Sc)$. Данный факт свидетельствует о формировании трехкомпонентной системы. Также известно, что после легирования сплавов металлам Sc массовая доля фаз Ti_3Al и $TiAl$ значительно увеличивается ($>52\%$).

Работы выполнены при финансовой поддержке программы конкурентоспособности ТГУ.

- [1] Белгибаева, А. А. Получение высокопрочных сплавов системы Ti-Al по "гидридной технологии" / А. А. Белгибаева, Р. Ш. Еркасов, И. А. Курзина, Н. И. Косова, Ю. А. Абзаев, В. И. Сачков // В сб. научных статей VI Российско-Казахстанской молодежной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии», Барнаул, 13 декабря 2018 г. – 2018. С. 62–68.
- [2] Cordell, T. P4A: An Affordable Composite Process / T. Cordell // The AMPTIAC Newsletter. – 2000. – V.4, No.3. – P. 11–13.
- [3] Clemens, H. Processing and applications of intermetallic γ -TiAl – based alloys / H. Clemens, H. Kestler // Advanced Engineering Materials. – 2000. – V.2, No.9. – P. 551–570.
- [4] Prasad, U. Influence of alloying elements on the kinetics of massive transformation in gamma titanium aluminides / U. Prasad, M. C. Chaturvedi // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2003. – V.34. – P. 2053–2066.
- [5] Abzaev, Yu. A. Simulation of the structural state of amorphous phases in nanoscale SiO_2 synthesized via different methods / Yu. A. Abzaev, V. V. Syzrantsev, S. Bardakhanov // Physics of the Solid State. – 2017. – 59(9). – P. 1874–1878.
- [6] Белгибаева, А. А. Получение высокопрочных сплавов системы Ti-Al используя гидриды металлов (I) / А. А. Белгибаева, Р. Ш. Еркасов, И. А. Курзина, Н. И. Каракчиева, В. И. Сачков Ю. А. Абзаев // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. – 2019. – №1(126). – С. 21–28.