

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АЛЛОТРОПНОЙ ФОРМЫ УГЛЕРОДА НА СИНТЕЗ ФАЗЫ КАРБИДА ТИТАНА ПРИ ГОРЕНИИ В РАСПЛАВЕ АЛЮМИНИЯ

Рыбаков А. Д., Луц А. Р., Закамов Д. В., Амосов А. П.

Самарский государственный технический университет, г. Самара, [antonsamgtu@yandex.ru](mailto:antonsamgtu@yandex.ru)

*Ключевые слова: горение, синтез, карбид титана, расплав алюминия, литой композит*

В настоящее время большое внимание уделяется разработке алюмоматричных композиционных материалов (АМКМ), дисперсно упрочненных частицами карбида титана TiC, который, в отличие от применяемых в настоящее время порошковых армирующих компонентов SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, имеет наиболее высокие значения прочности, твердости, термодинамической стабильности, и может придать композитам системы Al–TiC комплекс свойств, превосходящий все другие дисперсно армированные системы на алюминиевой матрице [1, 2]. Однако до сих пор отсутствуют технологии промышленного производства композитов Al–TiC. Основой такой технологии может стать метод получения литых композитов Al–TiC с применением процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) частиц карбида титана при горении смеси порошков титана и углерода в расплаве алюминия и реализации высокоэкзотермической реакции Ti+C=TiC [2]. При использовании технического углерода (сажи) в качестве источника углерода остались не до конца решенными проблемы надежности инициирования и полноты протекания СВС-реакции, остаточной пористости композита, равномерности распределения частиц по его объему. Анализ литературных данных показывает, что решение этих проблем возможно за счет использования других, химически более активных углеродных форм [3]. В связи с этим, в данной работе была поставлена цель впервые оценить термодинамический потенциал различных углеродных форм и вывести рекомендации по их использованию в процессе синтеза карбида титана в расплаве алюминия.

Ориентируясь на обычное получение в экспериментах образцов композита Al-10%TiC (или точнее 90%Al-10%TiC) массой 200 г, было составлено общее уравнение химического взаимодействия в молях при введении порошковой шихты Ti+C (20 г) с активирующей добавкой соли 2%Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> (0.4 г) от массы порошковой шихты в соответствующее количество расплава алюминия (180 г):



Расчет состава продуктов реакции (1) проводился с применением компьютерной программы термодинамических расчетов THERMO [4]. При этом использовались термодинамические характеристики таких углеродных форм как графит, карбин, алмаз, технический углерод (сажа), фуллерен C<sub>60</sub>, фуллерен C<sub>70</sub>, многослойные углеродные нанотрубки (УНТ).

Результаты термодинамических расчетов зависимости состава продуктов горения от вида углеродной формы и начальной температуры расплава алюминия показывают, что при всех углеродных формах в продуктах реакции (1) возможно образование четырех основных фаз: Al, TiC, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> и Al<sub>3</sub>Ti. При начальных температурах расплава ниже 850К целевая фаза TiC не синтезируется ни при каких формах углерода, а образуются только нежелательные побочные фазы Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> и Al<sub>3</sub>Ti. Синтез карбидной фазы при использовании таких активных форм как графит, C<sub>60</sub>, C<sub>70</sub>, карбин и УНТ начинается при начальных температурах расплава около 850К, а полное превращение Ti+C=TiC с образованием 0.33 моль TiC достигается при 1000 К. При этом нежелательные фазы Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> и Al<sub>3</sub>Ti в конечном составе продуктов отсутствуют. В случае же применения технического углерода и алмаза полное образование карбида титана происходит только при температуре системы 1200 К и выше. При этом в случае алмазной формы нежелательные фазы Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> и Al<sub>3</sub>Ti сохраняются при более высоких температурах до 1500К. Добавка в шихту Ti+C соли Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> в результате взаимодействия с алюминием приводит к образованию небольших примесей легкогазифицирующихся соединений алюминия, натрия и

фтора ( $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$ ,  $\text{AlNaF}_4$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{AlF}_2$ ,  $\text{AlF}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{Na}$ ), способных оказывать рафинирующее воздействие на расплав при образовании АМКМ. Полученные результаты термодинамических расчетов показывают заметно более высокую химическую активность в синтезе карбида титана в расплаве алюминия таких форм углерода как графит,  $\text{C}_{60}$ ,  $\text{C}_{70}$ , карбин, УНТ и позволяют рекомендовать их для применения при получении литых АМКМ методом СВС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90032.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90032.

### Список литературы

1. Metal Matrix Composites: Wetting and Infiltration / A.C. Cuevas, E.B. Becerril, M.S. Martinez, J.L. Ruiz. Cham: Springer, 2018. 325 p.
2. Application of SHS processes for in situ preparation of alumomatrix composite materials discretely reinforced by nanodimensional titanium carbide particles (review) / A.P. Amosov, A.R. Luts, E.I. Latukhin, A.A. Ermoshkin. Russ. J. Non-Ferr. Met. 2016. Vol. 57. No. 2. P. 117—123.
3. Using Different Powdered Carbon Forms for Reinforcing Aluminum Composite Materials with Carbon and Titanium Carbide: A Review / A.P. Amosov, A.R. Luts, A.D. Rybakov, E.I. Latukhin. Russ. J. Non-Ferr. Met. 2020. Vol. 61. No. 5. P. 500—516.
4. Rogachev A.S., Mukasyan A.S. Combustion for material synthesis. New York: CRC Press, 2014. 422 p.

### Сведения об авторах

Рыбаков Антон Дмитриевич, аспирант. Область научных интересов: самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) алюмоматричных композитов.

Луц Альфия Расимовна, канд. техн. наук, доцент. Область научных интересов: СВС алюмоматричных композитов, материаловедение.

Закамов Дмитрий Васильевич, канд. техн. наук, доцент. Область научных интересов: горение, СВС, материаловедение.

Амосов Александр Петрович, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой. Область научных интересов: горение, СВС, порошковая металлургия, композиционные материалы.

## THERMODYNAMIC EVALUATION OF CARBON ALLOTROPIC FORM EFFECT ON TITANIUM CARBIDE PHASE COMBUSTION SYNTHESIS IN ALUMINUM MELT

Rybakov A.D., Lutz A. R., Zakamov D. V., Amosov A. P.

Samara State Technical University, Samara, Russia, [antonsamgtu@yandex.ru](mailto:antonsamgtu@yandex.ru)

*Keywords: combustion, synthesis, titanium carbide, aluminum melt, cast composite*

The thermodynamic calculations show a significantly higher chemical activity in TiC synthesis of such forms of carbon as graphite, fullerenes  $\text{C}_{60}$  and  $\text{C}_{70}$ , carbine, multilayer carbon nanotubes (CNTs) compared to technical carbon and diamond.