

Материаловедение и технология  
материалов  
Materials science and materials technology

Научная статья  
Статья в открытом доступе  
УДК 620.11 + 620.178  
doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-40-48

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА ФЛЮСА НА СИНТЕЗ ЛИТОГО  
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АМg2-TiC

Юлия Владимировна Шерина<sup>1✉</sup>, Альфия Расимовна Луц<sup>2</sup>, Андрей Дмитриевич Качура<sup>3</sup>, Сергей Владимирович Шигин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

<sup>1</sup>yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5451-7107>

<sup>2</sup>yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7889-9931>

<sup>3</sup>yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9246-5638>

<sup>4</sup>yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2738-5716>

Аннотация

Приводятся результаты исследования, посвященного изучению влияния вида флюса на протекание процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза карбида титана в расплаве алюминия, а также структуру и свойства получаемого композиционного материала АМg2-TiC. В ходе исследований был проведен анализ и осуществлен выбор наиболее перспективных для применения в качестве флюсов галоидных солей: Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>, K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>, K<sub>1-3</sub>AlF<sub>4-6</sub> (Nocolok™, производства ФРГ). В процессе экспериментального синтеза наиболее активные признаки экзотермической реакции между порошками титана и углерода в расплаве были зафиксированы в присутствии добавки флюса Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>. В ходе дальнейших исследований были проведены микроструктурный, микрорентгеноспектральный и количественный рентгенофазовый анализы, по результатам которых было установлено, что наиболее однородное распределение по объему материала, максимальное со-

держание близкой к стехиометрическому составу карбидной фазы высокой дисперсности наблюдается также в образцах, полученных с применением соли Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>. На синтезированных образцах композиционного материала была проведена оценка физико-механических характеристик: твердости, пористости и электропроводности. Выявлено, что образцы композита с оптимальной структурой также характеризуются снижением пористости на 1,33%, повышением твердости на 94 МПа и уменьшением электропроводности на 0,3 МСм/м по сравнению с образцами, полученными с применением других флюсов. По результатам комплекса проведенных исследований для реализации СВС композиционного материала АМg2-TiC к использованию рекомендован флюс Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>.

**Ключевые слова:** материал, алюминий, карбид титана, флюс, самораспространяющийся синтез.

Ссылка для цитирования:

Шерина Ю.В. Исследование влияния вида флюса на синтез литого композиционного материала АМg2-TiC / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц, А.Д. Качура, С.В. Шигин // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 07. – С. 40-48. doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-40-48.

Original article  
Open Access Article

STUDY OF THE INFLUENCE OF FLUX TYPE ON THE SYNTHESIS  
OF CAST COMPOSITE MATERIAL АМg2-TiC

Yulia Vladimirovna Sherina<sup>1✉</sup>, Alfiya Rasimovna Luts<sup>2</sup>, Andrey Dmitrievich Kachura<sup>3</sup>, Sergey Vladimirovich Shigin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Samara State Technical University, Samara, Russia

<sup>1</sup>yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5451-7107>

<sup>2</sup>yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7889-9931>

<sup>3</sup>yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9246-5638>

<sup>4</sup>yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2738-5716>

## Abstract

The results are presented devoted to the study of the influence of flux type on the process of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) of titanium carbide in aluminum flux, as well as on the structure and properties of the resulting composite material AMg2-TiC. During the research, the most promising halide salts for use as fluxes were analyzed and selected: Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>, K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>, K<sub>1-3</sub>AlF<sub>4-6</sub> (Nocolok™ made in Germany). During the experimental synthesis, the most active signs of an exothermic reaction between titanium and carbon powders in the flux were recorded having a flux additive Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>. Then microstructural, micro X-ray spectral analysis and quantitative X-ray phase analyses were carried out, according to their results it was found out that the most homogeneous distribution in terms of material volume, the

maximum content of a high dispersion of carbide phase close to the stoichiometric composition is also observed in samples obtained with the use of Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> salt. The synthesized samples of the composite material were assessed according to physical and mechanical characteristics: hardness, porosity and electrical conductivity. It was found out that composite samples with an optimal structure are also characterized by a decrease in porosity by 1.33%, an increase in hardness by 94 MPa and a reduction of electrical conductivity by 0.3 MSm/m compared with samples obtained using other fluxes. According to the results of the studies carried out, Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> flux is recommended for use to implement SHS composite AMg2-TiC material.

**Keywords:** material, aluminum, titanium carbide, flux, self-propagating synthesis.

## Reference for citing:

Sherina YuV, Lutz AR, Kachura AD, Shigin SV. Study of the influence of flux type on the synthesis of cast composite material AMG2-TiC. *Transport Engineering*. 2023; 7: 40-48. doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-40-48.

## Введение

Алюмоматричные композиционные материалы (АМКМ), дисперсно упрочненные частицами карбида титана, представляют собой уникальный класс материалов, поскольку при небольшой массе обладают повышенными характеристиками удельной прочности, износостойкости и пр. Для их получения наиболее доступными и экономичными являются жидкофазные технологии, из числа которых наиболее перспективными являются т.н. методы in-situ, главными преимуществами которых выступают одностадийность технологического процесса, хорошая адгезия между матрицей и упрочняющей фазой, высокая дисперсность последней. В Самарском государственном техническом университете разработана подобная технология получения композиционных материалов с применением метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), суть которого заключается в проведении экзотермической реакции между исходными порошками титана и углерода или их соединениями, введенными непосредственно в расплав алюминия [1]. Полученные методом СВС АМКМ состава Al-10 масс. % TiC, с размером карбидной фазы от 100 нм, характеризуются повыше-

нием предела прочности более чем в 2,5 раза и твердости более чем в 3 раза по сравнению с исходным алюминием [2].

Вместе с тем, после завершения синтеза в конечном продукте зачастую отмечается присутствие остатков непрореагировавшей шихты, неравномерность распределения частиц по объему композита, их скопление по границам зерен. Указанные дефекты могут возникать по причине окисленности поверхности порошковых компонентов титана и углерода и, как следствие, неполноценного прохождения синтеза. Для устранения окислов наиболее эффективным приемом является применение флюсов, рафинирующее действие которых состоит в адсорбции и растворении загрязнений или в химическом взаимодействии флюса с примесями [1]. Проведенный анализ публикаций показал, что и отечественные, и зарубежные исследователи широко используют флюсы различного состава при реализации СВС-процессов в алюминиевых расплавах. Так, в частности, приводятся примеры получения АМКМ Al-TiC путем добавления в расплав алюминия порошков титана и углерода [1]

или диоксида титана и графита [3], и в обеих публикациях отмечается, что хорошая адгезионная связь и повышение механических свойств возможно только при условии добавления флюса криолит  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ . В исследовании [4] при синтезе композита  $\text{Al}-4,5\%\text{Cu}-5\% \text{TiC}$  путем добавления в расплав титана и древесного угля оптимальные результаты получены при использовании смеси солей  $\text{KF}$  и  $\text{NaF}$ . Интересны публикации, где сообщается о возможности применения соли  $\text{K}_2\text{TiF}_6$  одновременно и в качестве источника титана в сочетании с техническим углеродом, и рафинирующего флюса при получении АМКМ с 2 и 4 масс. %  $\text{TiC}$  на основе алюминиевого сплава 6061 [5] или  $\text{Al}-(5-15)\% \text{TiC}$  [6]. Аналогично может применяться и соль  $\text{Na}_2\text{TiF}_6$  при реализации СВС АМКМ  $\text{Al}-10\%\text{TiC}$  [7]. Таким образом, можно заключить, что наиболее распространенным в качестве флюсов является использование солей, содержащих фториды натрия и калия или их соединений. Проведенный анализ публикаций также показал, что СВС фазы карбида титана широко используется для повышения механических характеристик промышленных алюминиевых сплавов [8]. Особенно это актуально для алюминиево-магниевых сплавов (магналиев), которые, как известно, отличаются хорошей деформируемостью и свариваемостью, но относительно невысокой прочностью и твердостью. В работе [9] показан термодинамический анализ возможности получения композиционного материала на основе сплава  $\text{AMg2}$  путем синтеза в его составе 10 масс. %  $\text{TiC}$ , однако полноценные экспериментальные исследования не проводились. Поэтому целью данной работы было поставлено проведение сравнительного анализа влияния вида флюса на структуру и свойства композиционного материала  $\text{AMg2}-10\% \text{TiC}$ , полученного методом СВС в расплаве. Для проведения исследований использовался промышленный сплав  $\text{AMg2}$  (ГОСТ 4784-97), порошок титана ТПП-7 (ТУ1715-449-05785388), порошок углерода П-701 (ГОСТ 7585-86), а также в качестве флюсов: криолит  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  (ГОСТ 10561-80),  $\text{Na}_2\text{TiF}_6$  (ТУ 6-09-01-425-77),  $\text{K}_2\text{TiF}_6$  (ТУ 20.13.62-023-69886968-2017),

соединение  $\text{K}_{1-3}\text{AlF}_{4-6}$  (Nocolok™, производства фирмы «Solvay», Ганновер, ФРГ). Порошки титана и углерода подвергали предварительной сушке при температуре 100-110 °С в течение 2-3 часов, затем производили смешивание порошков в стехиометрической пропорции и к этому составу добавляли различные флюсы в количестве 5 % от массы шихты. Далее полученную композицию делили на три равные порции, каждую из которых прессовали в таблетку. Одновременно в графитовом тигле плавильной печи ПС-20/12 проводился нагрев сплава  $\text{AMg2}$  до температуры 900 °С. Затем осуществлялся поочередный ввод спрессованных таблеток из расчета приготовления композита состава  $\text{AMg2}-10$  масс. %  $\text{TiC}$ . Во время СВС-реакции расплав тщательно перемешивали. После окончания синтеза расплав выдерживали 5 мин, перемешивали и заливали в стальной кокиль. Полученную отливку путем токарной обработки разрезали на цилиндры размером 20×20 мм. Изготовление металлографических шлифов проводили на шлифовально-полировальной машине ПОЛИЛАБ П12МА с приставкой для работы в автоматическом режиме. Для выявления микроструктуры проводили травление образцов раствором 50 %  $\text{HF} + 50\% \text{HNO}_3$  в течение 10-15 сек. Металлографический анализ осуществляли на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390A. Фазовый состав анализировался методом рентгенофазового анализа (РФА). Съемка рентгеновских спектров – на автоматизированном дифрактометре марки ARL X'tra (Thermo Scientific) с использованием  $\text{Cu}$ -излучения при непрерывном сканировании в интервале углов  $2\theta$  от 20 до 80 град со скоростью 2 град/мин. Анализ дифрактограмм проводился с использованием программы «HighScore Plus». Экспериментальное определение плотности образцов проводилось путем гидростатического взвешивания по ГОСТ 20018-74. Твердость исследовалась на твердомере ТШ-2М (ГОСТ 9012-59). Для анализа электропроводности применялся вихретоковый структуроскоп ВЭ-26НП (ГОСТ 27333-87). В процессе выплавки всех образцов АМКМ наблюдались

признаки протекания СВС-реакции, которая сопровождалась искро- и газовой выделением различной интенсивности. Но наиболее активно, уже при вводе первой навески, синтез происходил в случае использования соли  $\text{Na}_2\text{TiF}_6$  и на этом же образце был

получен «чистый» излом, без каких-либо включений. На рис. 1 представлены микроструктуры образцов АМг2-10 % ТiС, полученных с применением различных флюсов.

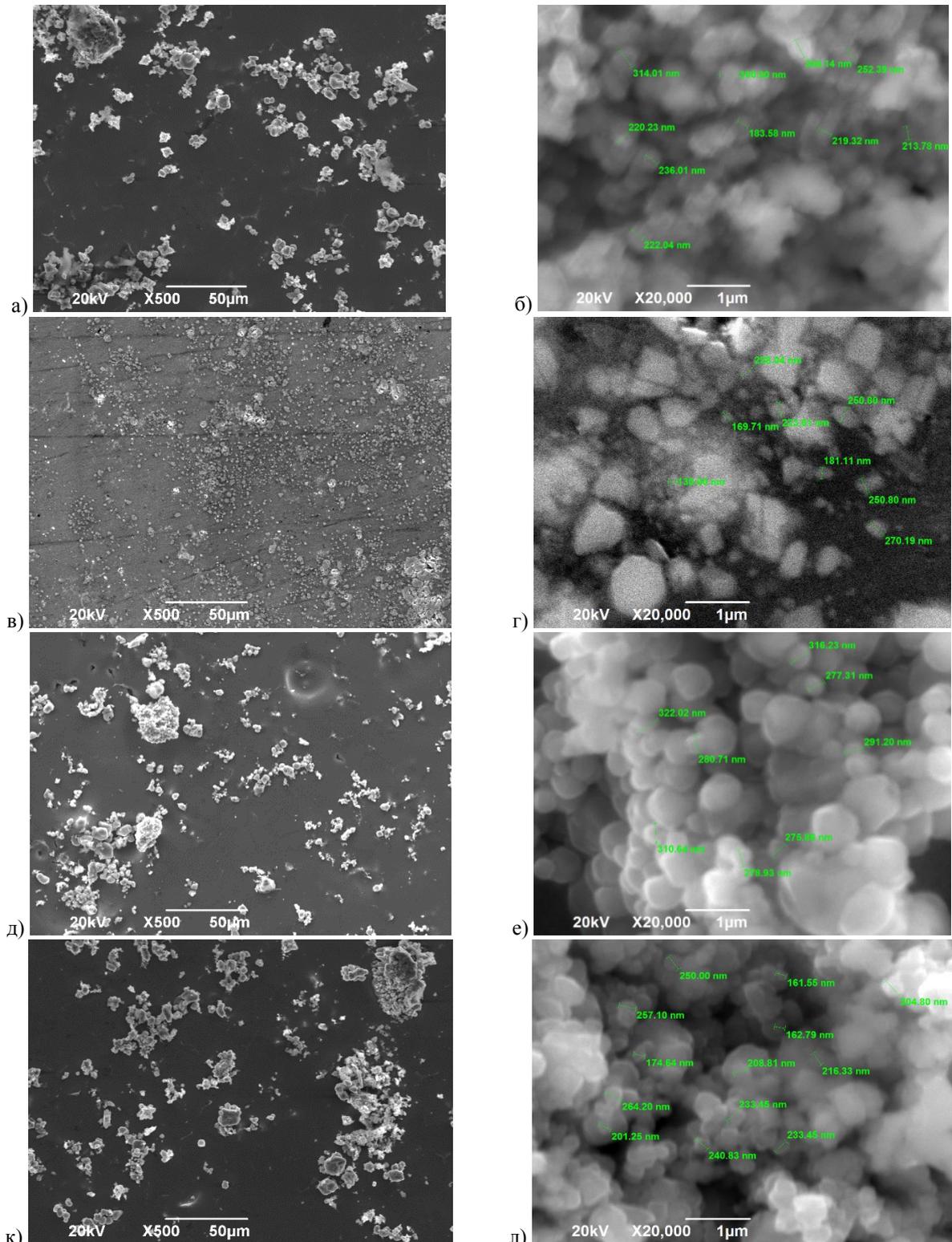
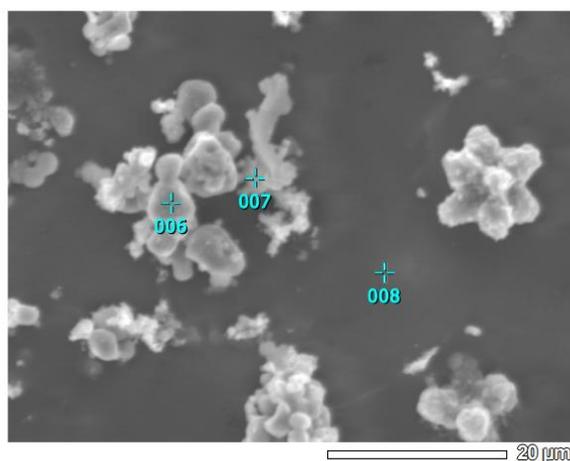


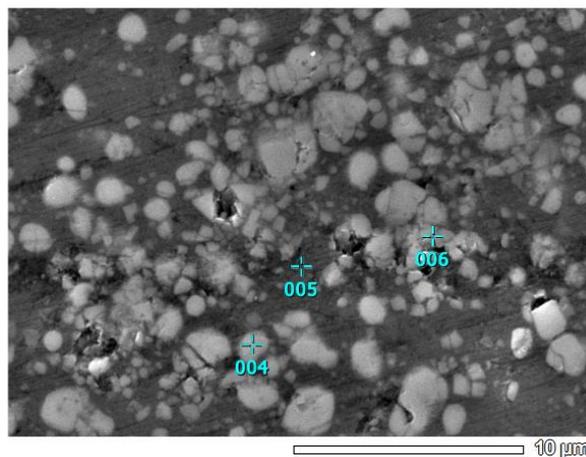
Рис. 1 Микроструктура образцов АМг2-ТiС в присутствии флюса:

а, б –  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ; в, г –  $\text{Na}_2\text{TiF}_6$ ; д, е –  $\text{K}_2\text{TiF}_6$ ; к, л – *Nocolor*<sup>TM</sup>  
 Fig. 1. Microstructure of AMg2-TiC samples in the presence of flux:  
 а, б)  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ; в, г)  $\text{Na}_2\text{TiF}_6$ ; д, е)  $\text{K}_2\text{TiF}_6$ ; к, л) *Nocolor*<sup>TM</sup>



Номер маркера	Элементов не менее, масс. %			
	Al	Ti	C	Mg
006	2,40	96,04	1,56	-
007	20,36	74,56	3,32	1,77
008	93,18	0,39	0,11	6,32

Рис. 2. Микрорентгеноспектральный анализ  $AMg_2-TiC + Na_3AlF_6$   
 Fig. 2. X-ray microanalysis of  $AMg_2-TiC + Na_3AlF_6$



Номер маркера	Элементов не менее, масс. %			
	Al	Ti	C	Mg
004	31,31	42,62	23,67	2,41
005	73,44	4,56	16,83	5,17
006	33,37	42,82	21,19	2,62

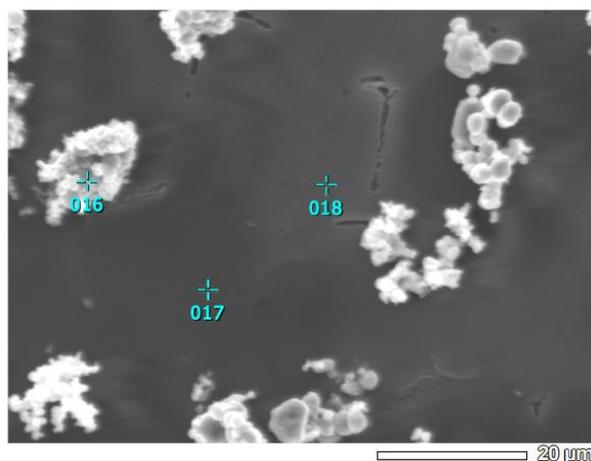
Рис. 3. Микрорентгеноспектральный анализ  $AMg_2-TiC + Na_2TiF_6$   
 Fig. 3. X-ray microanalysis of  $AMg_2-TiC + Na_2TiF_6$

По результатам их анализа можно сделать вывод, что во всех случаях наблюдаются включения синтезированной фазы, но ее наиболее равномерное распределение по объему матрицы наблюдается только при использовании соли  $Na_2TiF_6$  (рис. 1в, г), а наибольшая дисперсность (130-250 нм) отмечается при использовании титансодержащих соединений  $Na_2TiF_6$  и  $K_2TiF_6$  (рис. 1 в-е).

Результаты микрорентгеноспектрального анализа композиционных материалов, представленные на рисунках 2 – 5, подтверждают наличие в составе включе-

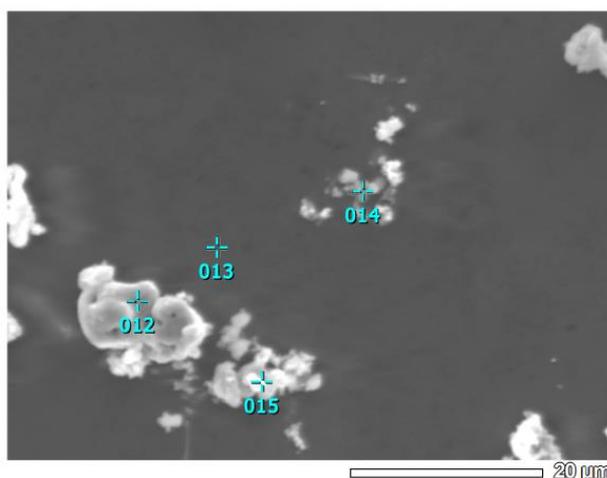
ний титана и углерода, однако наиболее близкий к стехиометрическому составу имеют частицы, синтезированные с применением соли  $Na_2TiF_6$  (рис. 3).

Проведенное далее рентгенофазовое исследование, а также, по его результатам, количественный анализ дифрактограмм показали, что при использовании флюсов  $Na_2TiF_6$  и  $K_2TiF_6$  количество карбидной фазы максимально и составляет 8 масс.%, что, принимая во внимание некоторую неоднородность ее распределения, является вполне приемлемым уровнем (рис. 6).



Номер маркера	Элементов не менее, масс. %			
	Al	Ti	C	Mg
016	9,52	88,93	0,98	0,57
017	94,07	0,49	-	5,44
018	93,54	0,25	-	6,51

Рис. 4. Микрорентгеноспектральный анализ AMg<sub>2</sub>-TiC + K<sub>a</sub>2TiF<sub>6</sub>  
 Fig. 4. X-ray microanalysis of AMg<sub>2</sub>-TiC + K<sub>a</sub>2TiF<sub>6</sub>

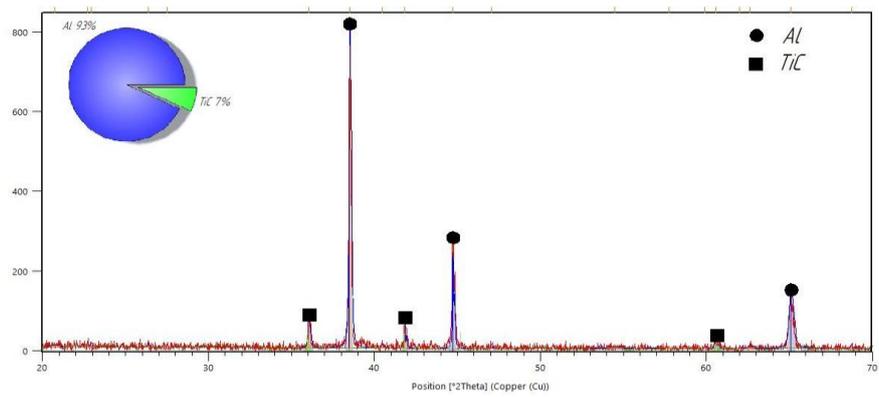


Номер маркера	Элементов не менее, масс. %			
	Al	Ti	C	Mg
012	1,19	93,81	5,00	-
013	93,80	-	-	6,20
014	28,91	67,57	1,68	1,85
015	11,87	80,76	6,16	1,22

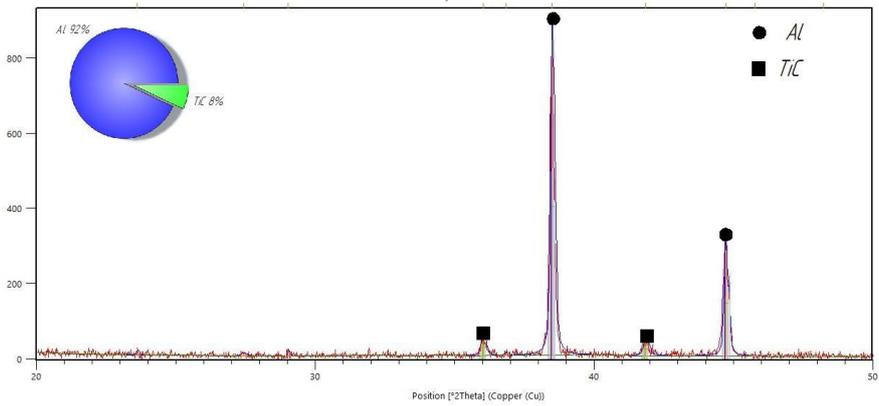
Рис. 5. Микрорентгеноспектральный анализ AMg<sub>2</sub>-TiC + Nocolok™  
 Fig. 5. X-ray microanalysis of AMg<sub>2</sub>-TiC + Nocolok™

В заключение были изучены пористость, твердость и электропроводность синтезированных образцов, результаты представлены в таблице. Принимая во внимание, что для СВС-материалов, вследствие скоротечности синтеза, характерна повышенная пористость, что негативно сказывается на их свойствах, оптимальное значение этой характеристики отмечается

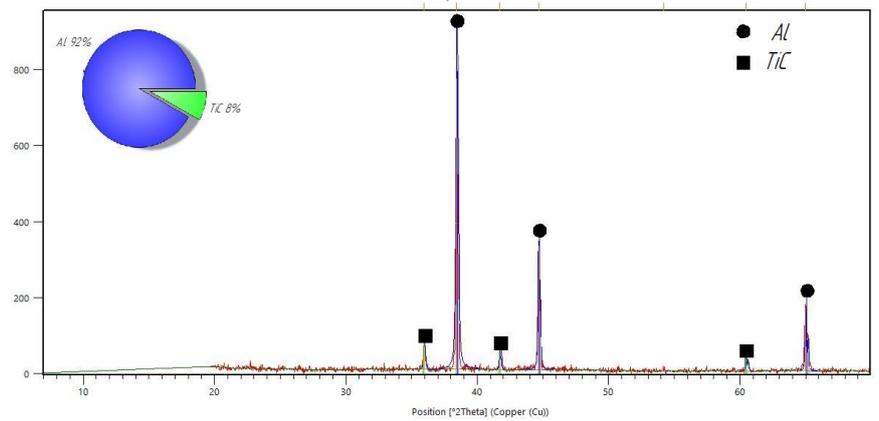
на образце, полученном с добавлением соли Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>, и составляет 1,67%. Для этого же образца, вследствие, как было показано выше, наиболее равномерного распределения высокодисперсной карбидной фазы, отмечается также повышение твердости (644 МПа) и снижение электропроводности (15,2 МСм/м).



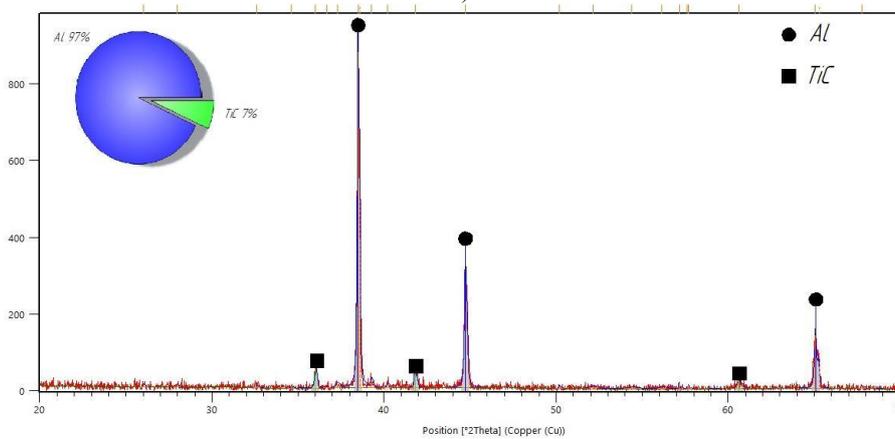
a)



б)



в)



г)

Рис. 6. Рентгенофазовый количественный анализ композиционного материала АМg2-TiC в присутствии флюса: а)  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ; б)  $\text{Na}_2\text{TiF}_6$ ; в)  $\text{K}_2\text{TiF}_6$ ; г) Nocolok<sup>TM</sup>  
 Fig. 6. X-ray phase quantitative analysis of the composite material AMg2-TiC in the presence of flux: a)  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ; b)  $\text{Na}_2\text{TiF}_6$ ; v)  $\text{K}_2\text{TiF}_6$ ; g) Nocolok<sup>TM</sup>

*Physical and mechanical properties*

	Пористость, %	Твердость, НВ, МПа	Электропроводность, МСм/м
АМг2 холоднокатанный	-	594	20,2
АМг2-TiC+Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	3	550	15,5
АМг2-TiC+Na <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub>	1,67	644	15,2
АМг2-TiC+K <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub>	3	550	15,5
АМг2-TiC+ Nocolok™	3	550	15,5

По результатам исследования микро-структуры и изучения физико-механических характеристик полученных образцов, для проведения СВС компози-

ционного материала АМг2-TiC следует рекомендовать к использованию флюс Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Луц А.Р., Макаренко А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез алюминиевых сплавов. Самара: СамГТУ, 2008. 175 с. ISBN 978-5-94275-377-1.
2. Амосов А.П., Луц А.Р., Латухин Е.И., Ермошкин А.А. Применение процессов СВС для получения in situ алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными частицами карбида титана (обзор). *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2016. №1. С.39-49. DOI: 10.17073/0021-2016-1-39-49.
3. Sheibani, S., and M. Fazel Najafabadi. "In situ fabrication of Al-TiC metal matrix composites by reactive slag process." *Materials & design*. 2007;28(8):2373-2378.
4. Das, Biswajit, et al. "Development of an in-situ synthesized multi-component reinforced Al-4.5% Cu-TiC metal matrix composite by FAS technique-Optimization of process parameters." *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2016;19(1):279-291.
5. Kishore, D. Sai Chaitanya, K. Prahlada Rao, and A. Mahamani. "Investigation of cutting force, surface roughness and flank wear in turning of In-situ

Al6061-TiC metal matrix composite." *Procedia Materials Science*. 2014;6:1040-1050.

6. Jerome, S., et al. "Synthesis and evaluation of mechanical and high temperature tribological properties of in-situ Al-TiC composites." *Tribology International*. 2010;43(11):2029-2036.
7. Луц А.Р., Ионов М.К. Исследование возможности применения галоидной соли Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> как источника атомарного титана для синтеза алюмоматричного композиционного материала, армированного карбидом титана. *Высокие технологии в машиностроении: сб. мат. XVI Всерос. науч.-техн. интернет-конф. с междунар. участием*, Самара: СамГТУ, 2017. С. 151-153. ISBN: 978-5-7964-2053-9.
8. Utkarash Pandey, Rajesh Purohit, Pankaj Agarwal, S.K. Dhakad, R.S. Rana. Effect of TiC particles on the mechanical properties of aluminium alloy metal matrix composites (MMCs). *Materials Today: Proceedings*. 2017;4:5452-5460.
9. Шерина Ю.В., Луц А.Р., Амосов А.П. Исследование влияния вида и количества флюса на процесс СВС композиционного материала АМг2-10%TiC. *Информационно-технологический вестник*. 2022. №2(32). С. 131-139. ISSN 2409-1650.

**REFERENCES**

1. Lutz AR, Makarenko AG. Self-propagating high-temperature synthesis of aluminum alloys. Samara: SamSTU; 2008.
2. Amosov AP, Lutz AR, Latukhin EI, Ermoshkin AA. Application of SHS processes for in situ production of aluminum matrix composite materials discretely reinforced with nanoscale titanium carbide particles (review). *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya* 2016;1:39-49. DOI: 10.17073/0021-2016-1-39-49.

3. Sheibani S, Fazel Najafabadi M. In situ fabrication of Al-TiC metal matrix composites by reactive slag process. *Materials & Design*. 2007;28(8):2373-2378.
4. Das Biswajit. Development of an in-situ synthesized multi-component reinforced Al-4.5% Cu-TiC metal matrix composite by FAS technique-Optimization of process parameters. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2016;19(1):279-291.

5. Kishore D, Sai Chaitanya K, Prahlada Rao, Mahamani A. Investigation of cutting force, surface roughness and flank wear in turning of In-situ Al6061-TiC metal matrix composite. *Procedia Materials Science*. 2014;6:1040-1050.
6. Jerome S. Synthesis and evaluation of mechanical and high temperature tribological properties of in-situ Al-TiC composites. *Tribology International*. 2010;43(11):2029-2036.
7. Lutz AR, Ionov MK. Study of the possibility of using Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> halide salt as a source of atomic titanium for the synthesis of aluminum-matrix composite material reinforced with titanium carbide. *Proceedings of the XVI All-Russian Scientific and Technical Internet Conference with International Participation: High Technologies in Mechanical Engineering*; Samara: SamSTU; 2017.
8. Utkarash P, Rajesh P, Pankaj A, Dhakad SK, Rana RS. Effect of TiC particles on the mechanical properties of aluminium alloy metal matrix composites (MMCs). *Materials Today: Proceedings*. 2017;4:5452-5460.
9. Sherina YuV, Lutz AR, Amosov AP. Study of the effect of flux type and amount on SHS process of AMg2-10%TiC composite material. *Information Technology Bulletin*. 2022;2(32):131-139.

#### **Информация об авторах:**

**Шерина Юлия Владимировна** – аспирант кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»; тел. +7-963-913-66-03.

**Луц Альфия Расимовна** – доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», кандидат технических наук; тел. +7-927-601-89-76.

**Sherina Yulia Vladimirovna** – Postgraduate Student of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials; phone: +7-963-913-66-03.

**Luts Alfiya Rasimovna** – Associate Professor of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Candidate of Technical Sciences; phone: +7-927-601-89-76.

**Качура Андрей Дмитриевич** – магистрант кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»; тел. +7-917-165-16-13.

**Шигин Сергей Владимирович** – ведущий инженер кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты».

**Kachura Andrey Dmitrievich** – Master Degree Student of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials; phone: +7-917-165-16-13.

**Shigin Sergey Vladimirovich** – Leading Engineer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Equipment.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**

**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 13.04.2023; одобрена после рецензирования 5.05.2023; принята к публикации 27.06.2023. Рецензент – Трушников Д.Н., доктор технических наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета.**

**The article was submitted to the editorial office on 13.04.2023; approved after review on 5.05.2023; accepted for publication on 27.06.2023. The reviewer is Trushnikov D.N., Doctor of Technical Sciences, Professor of Perm National Research Polytechnic University**