



Научная статья

2.6.17 – Материаловедение (технические науки).

УДК621.762.2

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.036

EDN: SRYORS

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА В ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ СИСТЕМЫ Ti–Al–C

Александр Андреевич Ситников¹, Алексей Викторович Собачкин²,
Марина Владимировна Логинова³, Валерий Юрьевич Филимонов⁴,
Владимир Иванович Яковлев⁵, Андрей Юрьевич Мясников⁶,
Анастасия Александровна Попова⁷, Юрий Николаевич Камышов⁸,
Александр Викторович Собачкин⁹

^{1, 2, 3, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

⁴ Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

⁶ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

⁸ Барнаульский юридический институт МВД России, Барнаул, Россия

¹ sitalan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4023-0869>

² SobachkinAV@altgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9159-1122>

³ logi_m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6518-3598>

⁴ vyfilimonov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

⁵ yak1961@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5635-5981>

⁶ myasnikov.andre@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3289-9087>

⁷ PopovaAnA@altgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2863-9546>

⁸ kamishovun@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5364-8548>

⁹ samap@list.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4131-4019>

Аннотация. В представленной работе проводили исследования по влиянию механической активации на структурно-фазовое состояние порошковых реагентов системы Ti–Al–C, а также выявили особенности реализации самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в подготовленной смеси. Для проведения исследований использовались составы: 1) 78 % Ti + 14 % Al + 8 % C; 2) 80 % Ti + 12 % Al + 8 % C; 3) 81 % Ti + 10 % Al + 9 % C. Механическая обработка порошковых смесей осуществлялась в планетарной шаровой мельнице АГО-2. Длительность обработки составила 7 минут при энергонапряженности 40 г. Механоактивация этих составов приводит к повышению диффузного фона, уменьшению интенсивностей дифракционных отражений компонентов смеси и уширению пиков, а также появляются микродеформации. В зависимости от соотношения компонентов структурные параметры могут как увеличиваться по сравнению с исходными, так и уменьшаться. После реализации высокотемпературного синтеза в порошковой смеси Ti + Al + C установлено, что продукт реакции содержит МАХ-фазы Ti₂AlC и Ti₃AlC₂, карбид титана TiC, а также непрореагировавший С. Температура воспламенения составила 1235 ± 15 °С, максимальные температуры синтеза достигают 1800 ± 15 °С. При двухминутной высокотемпературной выдержке наблюдается стабилизация продуктов реакции, что выражается в уменьшении уровня диффузного фона на дифрактограммах.

Ключевые слова: МАХ-фазы, Ti–Al–C, механическая активация, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, структурные параметры, фазовый состав.

Благодарности: Работа выполнялась в рамках государственного Задания FZMM-2023-0003, FZMM-2026-0005.

Для цитирования: Особенности механоактивированного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в порошковой смеси системы Ti–Al–C / А. А. Ситников [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 1. С. 230–235. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.036. EDN: <https://elibrary.ru/SRYORS>.

Original article

FEATURES OF MECHANICALLY ACTIVATED SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS IN A POWDER MIXTURE OF Ti–Al–C SYSTEM

Alexander A. Sitnikov¹, Alexey V. Sobachkin², Marina V. Loginova³,
Valery Yu. Filimonov⁴, Vladimir I. Yakovlev⁵, Andrey Yu. Myasnikov⁶,
Anastasia A. Popova⁷, Yuri N. Kamyshev⁸, Alexander V. Sobachkin⁹

© Ситников А. А., Собачкин А. В., Логинова М. В., Филимонов В. Ю., Яковлев В. И., Мясников А. Ю., Попова А. А., Камышов Ю. Н., Собачкин А. В., 2026

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА В ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ СИСТЕМЫ Ti–Al–C

1, 2, 3, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

4 Institute for Water and Environment Problems SB RAS, Barnaul, Russia

6 Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia

8 Barnaul juridical Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Barnaul, Russia

1 sitalan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4023-0869>

2 sobachkinav@altgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9159-1122>

3 logi_m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6518-3598>

4 vyfilimonov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

5 yak1961@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5635-5981>

6 myasnikov.andre@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3289-9087>

7 PopovaAnA@altgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2863-9546>

8 kamishovun@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5364-8548>

9 samap@list.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4131-4019>

Abstract. In the presented work, the effect of mechanical activation on the structural and phase state of powder reagents of the Ti–Al–C system, and also revealed the features of the implementation of self-propagating high-temperature synthesis in the prepared mixture are studied. The following mixtures were used for the research: 1) 78% Ti + 14% Al + 8% C; 2) 80% Ti + 12% Al + 8% C; 3) 81% Ti + 10% Al + 9% C. The mechanical processing of powder mixtures was carried out in a planetary ball mill AGO-2. The treatment duration was 7 minutes at an energy intensity of 40 g. Mechanical activation of these compounds leads to an increase in the diffuse background, a decrease in the intensity of diffraction reflections of the mixture components and a broadening of peaks, as well as micro-deformations. Depending on the ratio of the components, the structural parameters can either increase or decrease in comparison with the initial ones. After the implementation of high-temperature synthesis in a powder mixture of Ti + Al + C, it was found that the reaction product contains MAX phases Ti_2AlC and Ti_3AlC_2 , titanium carbide TiC , as well as unreacted C. The ignition temperature was 1235 ± 15 °C, and the maximum synthesis temperatures reached 1800 ± 15 °C. With a two-minute high-temperature exposure, stabilization of the reaction products is observed, which is expressed in a decrease in the level of diffuse background on diffractograms.

Keywords: MAX phases, Ti–Al–C, mechanical activation, self-propagating high-temperature synthesis, structural parameters, phase composition.

Acknowledgements: this study was supported by Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (FZMM-2023-0003, FZMM-2026-0005).

For citation: Sitnikov, A. A., Sobachkin, A. V., Loginova, M. V., Filimonov, V. Yu., Yakovlev, V. I., Myasnikov, A. Yu., Popova, A. A., Kamyshev, Yu. N. & Sobachkin, A. V. (2026). Features of mechanically activated self-propagating high-temperature synthesis in a powder mixture of the Ti–Al–C system. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 230-235. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.036. EDN: <https://elibrary.ru/SRYORS>.

ВВЕДЕНИЕ

Алюмокерамические композиты все больше используются в качестве конструкционных и функциональных материалов, например, в таких отраслях промышленности, как автомобильная, аэрокосмическая и др.

В современном материаловедении большой интерес вызывает новый вид тугоплавких соединений – так называемые МАХ-фазы. МАХ-фазы стали известны в конце 1990-х годов, представляя собой новый класс тройных карбидов и нитридов, которые устраняют разрыв между свойствами, характерными для металлов и керамики. Они представляют собой тройные соединения, отвечающие формуле $M_{n+1}AX_n$, где М – переходный металл; А – элемент IIIA или IVA группы системы Менделеева; Х – углерод и/или азот [1, 2]. Особенности кристаллической решетки МАХ-фаз определяют уникальную комбинацию свойств этих материалов. Как и керамика, МАХ-фазы обладают низкой плотностью, высоким модулем упругости, а некоторые из них обладают отличной стойкостью к окислению и коррозии при высокой температуре. В то же время, как металлы, они имеют высокую электро- и теплопроводность, имеют хорошую устойчивость к тепловым ударам и повреждениям, а также обладают хорошей обрабатываемостью [3–8].

Среди множества МАХ-фаз, полученных на текущий момент, наибольший интерес по уровню свойств представляют МАХ-фазы на основе титана [9–13]. В частности, Ti_3AlC_2 является единственной керамикой, которая обладает некоторой пластичностью при сжатии при комнатной температуре, поэтому получению МАХ-фаз в системе Ti–Al–C стоит уделить

особое внимание. Одним из способов получения МАХ-фаз является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), позволяющий существенно сократить энергозатраты и упростить получение МАХ-материалов [14, 15]. Одним из способов целенаправленного воздействия на порошковую смесь для СВС является механическая активация, позволяющая реализовать идеальный контакт между реагентами и повысить реакционную способность смеси [16–18].

МЕТОДЫ

В качестве объектов исследований использовались порошок титана ПТК-1 дисперсностью 100...200 мкм, порошок алюминия ПА-3 дисперсностью 63...100 мкм и порошок углерода в виде графита. Из указанных порошков приготавливали механическую смесь, варьируя соотношение компонентов (Al, Ti и C) по массовым процентам. Были приготовлены три состава порошковых смесей (мас. %):

1) 78 % Ti + 14 % Al + 8 % C (система с избытком алюминия);

2) 80 % Ti + 12 % Al + 8 % C;

3) 81 % Ti + 10 % Al + 9 % C (система с избытком титана и углерода).

Для механоактивационной обработки использовали планетарную шаровую мельницу АГО-2. Отношение массы исходной порошковой смеси к массе мелющих тел составляло 1 : 20. Для защиты от окисления из цилиндров откачивался воздух, затем они заполнялись аргоном при давлении 0,3 МПа. Длительность механической обработки составляла 7 мин. при энергонапряженности шаровой мельницы 40 г

(g – ускорение свободного падения). После механоактивации порошки извлекали из цилиндров в специальном боксе в аргоновой атмосфере

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре ДРОН-6 с $\text{CuK}\alpha$ -излучением ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). Дифрактограммы образцов регистрировали в идентичных условиях, что позволяло более корректно сравнивать полученные величины. Шаг сканирования $0,05^\circ$, время экспозиции 3 с. Обработку экспериментальных данных осуществляли с применением пакета программ PDWin. Уточнение параметров элементарной ячейки проводили по стандартному методу наименьших квадратов с помощью пакета программ PDWin. Расчет средних размеров областей когерентного рассеяния и уровня микродеформаций $\langle \epsilon \rangle$ производили по полученным дифракционным данным методом вторых моментов в программной оболочке Size & Strain.

Высокотемпературный синтез реализовывался с помощью экспериментальной установки на базе СВЧ-индуктора 6А. Подготовленная порошковая смесь засыпалась в графитовый тигель, в центре которого размещалась вольфрам-рениевая термопара для контроля и записи температуры процесса СВС. Система находилась под вакуумным колпаком. Для предотвращения взаимодействия с кислородом объем под колпаком непрерывно продувался аргоном. К преимуществам такой методики реализации СВС следует отнести: во-первых, возможность быстрого нагрева смеси до высоких температур, во-вторых, возможность продолжительной выдержки системы при высоких температурах сразу же после реализации синтеза (высокотемпературный отжиг),

в-третьих, возможность быстрого охлаждения смеси до комнатных температур. Таким образом, появляется непосредственная возможность непрерывного перехода от процесса быстрого реагирования к процессу высокотемпературного отжига, с последующим быстрым охлаждением, что обеспечивает управляемое термическое воздействие на порошковую смесь.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 приведены дифрактограммы исходных и механоактивированных в течение 7 минут при энергонапряженности шаровой мельницы 40 g порошковых смесей указанных составов.

Из сравнительного анализа дифрактограмм следует, что фазовый состав порошковой смеси после механоактивационной обработки не отличается от исходного. Механоактивация указанных смесей приводит к повышению диффузного фона, уменьшению интенсивностей дифракционных отражений компонентов смеси, уширению пиков, что свидетельствует о наличии неравновесных дефектов в продуктах размола и уменьшении размеров кристаллитов [19].

На основании анализа дифрактограмм были проведены расчеты структурных параметров элементарных ячеек для компонентов смеси (таблица 1). Эталонные значения брались из базы данных порошковой дифрактометрии PDWin 3.0: для титана по карточке (44-1294) ICDD Grant-in-Aid, Sailer, R., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA, 1993; для алюминия – по (4-787) Natl. Bur. Stand.(U.S.), Circ. 539, Swanson, Tatge., I, 11, 1953; для углерода – по (2-456) The Structure of Crystals, 1 st Ed. соответственно.

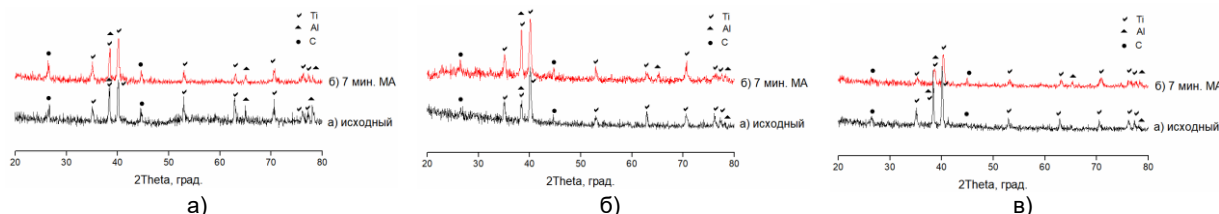


Рисунок 1 – Дифрактограммы исходной и механоактивированной порошковых смесей состава:
а) 78% Ti + 14% Al + 8% C; б) 80% Ti + 12% Al + 8% C; в) 81% Ti + 10% Al + 9% C

Figure 1 – Diffractograms of the initial and mechanoactivated powder mixtures of the composition:
а) 78% Ti + 14% Al + 8% C; б) 80% Ti + 12% Al + 8% C; в) 81% Ti + 10% Al + 9% C

Таблица 1 – Структурные параметры компонентов смеси Ti + Al + C

Table 1 – Structural parameters of the components of the Ti + Al + C mixture

Параметры ячейки	Исходный порошок	После механической активации			Эталон
		78% Ti + 14% Al + 8% C	80% Ti + 12% Al + 8% C	81% Ti + 10% Al + 9% C	
		Титан			
a, нм	29,52	29,5	29,56	29,42	29,51
c, нм	46,90	46,91	46,84	46,78	46,82
V, нм ³	35406	35365	34468	35070	35300
		Алюминий			
a, нм	40,52	40,54	40,47	40,43	40,49
V, нм ³	66561	66646	66299	66090	66600
		Углерод			
a, нм	24,56	24,57	24,5	24,41	24,56
c, нм	67,18	67,29	67,55	67,61	66,96
V, нм ³	35119	35178	35024	34894	34980

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА В ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ СИСТЕМЫ Ti–Al–C

Расчет прецизионных параметров порошковых образцов рассматриваемой системы показал, что в процессе механической обработки происходит изменение структурных состояний компонентов. Различия в изменениях структурных параметров и полной ширины пика на половине высоты дифракционных максимумов компонентов может определяться различной природой возникновения дефектов. Кроме того, на процесс возникновения дефектов, определенных по изменению уширения дифракционных отражений, оказывает влияние и процентное соотношение компонентов в исходной порошковой смеси.

Анализ изменения прецизионных параметров механоактивированных образцов показал, что в зависимости от процентного соотношения компонентов решетки элементов могут незначительно сжиматься (например, алюминий в составе 78% Ti + 14% Al + 8% C), незначительно увеличиваться (например, титан в этом же составе) и существенно увеличиваться (например, алюминий в составе 81% Ti + 10% Al + 9% C или титан в составе 80% Ti + 12% Al + 8% C). Во всех случаях объем ячейки превышает эталонный (за исключением алюминия в составе 80% Ti + 12% Al + 8% C), что свидетельствует о дефектной структуре элементов.

На рисунке 2 представлена характерная термограмма процесса высокотемпературного синтеза в порошковой смеси системы Ti–Al–C. Температура воспламенения составила 1235 ± 15 °C, максимальные температуры синтеза достигают 1800 ± 15 °C.

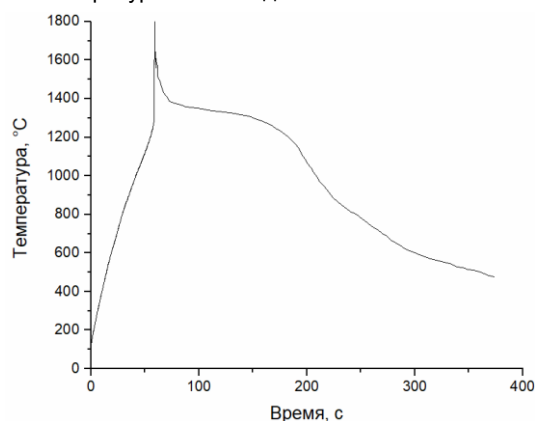


Рисунок 2 – Термограмма процесса CBC в системе Ti–Al–C

Figure 2 – Thermogram of the SHS process in the Ti–Al–C system

На рисунке 3 представлены дифрактограммы продуктов реакции в зависимости от состава порошковой смеси и продолжительности выдержки.

Как следует из анализа дифрактограмм, во всех случаях синтезируются МАХ-фазы Ti_2AlC , Ti_3AlC_2 , а также карбид титана TiC . Продукты реакции находятся в неравновесном состоянии, с наличием рентгеноаморфного гало на малых углах, которое наиболее сильно проявляется при анализе продуктов реакции из состава 81 % Ti + 10 % Al + 9 % C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механоактивация исследованных составов Ti + Al + C приводит к повышению диффузного фона, уменьшению интенсивностей дифракционных отражений компонентов смеси и уширению пиков. В процессе механоактивационного воздействия на порошковые смеси всех составов происходит изменение параметров ячеек компонентов. При этом в зависимости от соотношения компонентов в смеси

структурные параметры могут как увеличиваться по сравнению с исходными, так и уменьшаться. Различия в воздействии механоактивации на параметры ячеек может определяться различной природой возникновения дефектов.

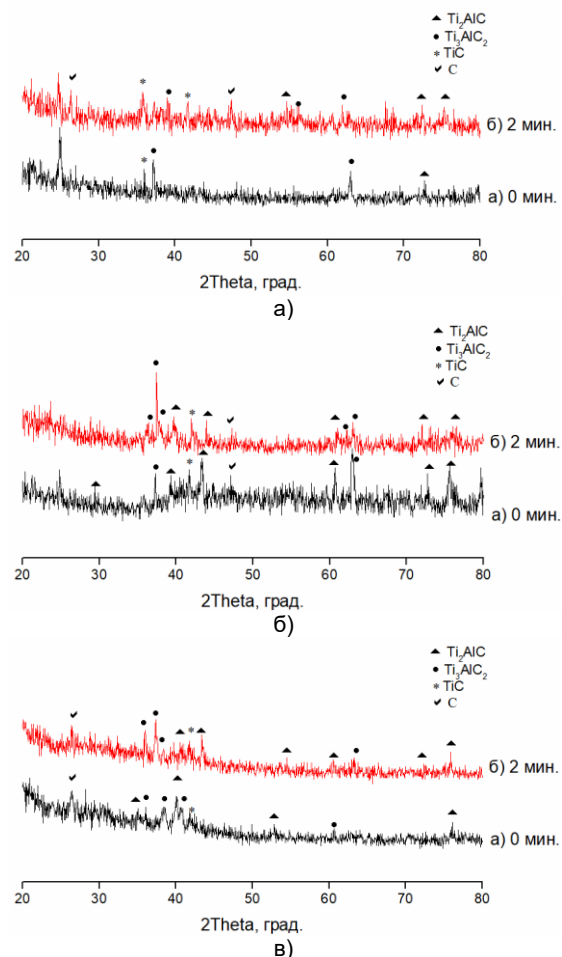


Рисунок 3 – Дифрактограммы CBC продукта из смесей состава: а) 78% Ti + 14% Al + 8% C; б) 80% Ti + 12% Al + 8% C; в) 81% Ti + 10% Al + 9% C

Figure 3 – Diffraction patterns of the SHS product from mixtures of the composition: а) 78% Ti + 14% Al + 8% C; б) 80% Ti + 12% Al + 8% C; в) 81% Ti + 10% Al + 9% C

На фазовый состав продуктов реакции влияет соотношение компонентов смеси. Во всех случаях синтезируются МАХ-фазы Ti_2AlC , Ti_3AlC_2 , а также карбид титана TiC . Уширенные пики, высокий уровень диффузного фона и появление рентгеноаморфного гало на малых углах качественно свидетельствуют о формировании неравновесного состояния фаз, входящих в продукты синтеза. При двухминутной высокотемпературной выдержке наблюдается стабилизация системы, выражающаяся в уменьшении уровня диффузного фона. Особенно ярко это проявляется при двухминутной выдержке состава 78 % Ti + 14 % Al + 8 % C.

Тем не менее, полностью устранить образование примесной фазы карбида титана в ходе реализации стимулированного CBC на рассмотренных режимах не удалось. Однако реализация CBC в составе 78 % Ti + 14 % Al + 8 % C со временем выдержки в течение двух минут привела к формированию продукта, основу которого составляет целевая МАХ-фаза Ti_2AlC .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barsoum M. MAX phases: properties of machinable ternary carbides and nitrides. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. 436 p. DOI: 10.1002/9783527654581.
2. Pang W.K., Low I.M. Understanding and improving the thermal stability of layered ternary carbides in ceramic matrix composites, in: Low I.M. (Eds.), *Advances in Ceramic Matrix Composites*. Woodhead Publishing Limited, Philadelphia, 2014. P. 340–368.
3. Damage accumulation and hysteretic behavior of MAX phase materials / B. Poon [et. al.] // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2011. Vol. 59, Iss. 10. P. 2238–2257. DOI: 10.1016/j.jmps.2011.03.012.
4. Electrical, thermal, and elastic properties of the MAX-phase Ti_2SC / T.H. Scabarozzi [et. al.] // *Journal of Applied Physics*. 2008. Vol. 104, Iss. 3. P. 033502. DOI: 10.1063/1.2959738.
5. Nb_4AlC_3 : A new compound belonging to the MAX phases / C. Hu [et. al.] // *Scripta Materialia*. 2007. Vol. 57, Iss. 10. P. 893–896. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.07.038.
6. Structure of a new bulk $Ti_5Al_2C_3$ MAX phase produced by the topotactic transformation of Ti_2AlC / N.J. Lane [et. al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. 2012. Vol. 32, Iss. 12. P. 3485–3491. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2012.03.035.
7. Mo_2TiAlC_2 : A new ordered layered ternary carbide / B. Anasori [et. al.] // *Scripta Materialia*. 2015. Vol. 101. P. 5–7. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2014.12.024.
8. Synthesis and mechanical properties of TiB_2/Ti_2AlN composites fabricated by hot pressing sintering / S. Lu [et. al.] // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2018. Vol. 126, Iss. 11. P. 900–905.
9. Tzenov N.V., Barsoum M.W. Synthesis and Characterization of Ti_3AlC_2 // *Journal of the American Ceramic Society*. 2000. Vol. 83, Iss. 4. P. 825–832. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01281.x.
10. Влияние элементного порошкового сырья на формирование пористого каркаса МАХ-фазы Ti_3AlC_2 при получении методом СВС / Д.М. Давыдов [и др.] // *Вектор науки ТГУ*. 2021. № 3. С. 37–47. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-3-37-47.
11. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в системе Ti-Al-C-B / Е.А. Амосов [и др.] // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки*. 2017. № 2. С. 161–171.
12. Влияние газифицирующих добавок на фазовый состав продуктов горения при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе МАХ-фаз в системе Ti-C-Al / А.Ф. Федотов [и др.] // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16, № 6. С. 50–55.
13. Получение алюмокерамических каркасных композитов на основе МАХ-фазы Ti_2AlC методом СВС-прессования / А.Ф. Федотов [и др.] // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2015. № 6. С. 53–62. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-6-53-62.
14. Effect of Mechanical Activation on Ti_3AlC_2 Max Phase Formation under Self-Propagating High-Temperature Synthesis // A.Yu. Potanin [et. al.] // *Eurasian Chemical Technological Journal*. 2015. Vol. 17, № 3. P. 233–242. DOI: 10.18321/ectj249.
15. Electronic and structural properties of the layered ternary carbide Ti_3AlC_2 / Y.C. Zhou [et. al.] // *Journal of Materials Chemistry*. 2001. Vol. 11, Iss. 9. P. 2335–2339. DOI: 10.1039/B101520F.
16. Dudina D.V., Bokhonov B.B. Materials Development Using High-Energy Ball Milling: A Review Dedicated to the Memory of M.A. Korchagin // *Journal of Composites Science*. 2022. Vol. 6, Iss. 7. P. 188. DOI: 10.3390/jcs6070188.
17. Собачкин А.В. Стимулированный высокотемпературный синтез в структурно-измененной порошковой смеси на основе системы Ti-Al : дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 2025. 329 с.

18. Yadav T.P., Yadav R.M., Singh D.P. Mechanical milling: A top down approach for the synthesis of nanomaterials and nanocomposites // *Nanoscience and Nanotechnology*. 2012. Vol 2, Iss. 3. P. 22–48. DOI: 10.5923/j.nn.20120203.01.

19. Sobachkin A.V., Sitnikov A.A., Myasnikov A.Y. Effect of mechanical activation and gamma-irradiation on structural-phase state of Ti-Al-C powder reagents // *Defect and Diffusion Forum*. 2021. Vol. 410. P. 674–679. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.674.

Информация об авторах

А. А. Ситников – доктор технических наук, директор производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. В. Собачкин – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза им. В.В. Евстигнеева Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

М. В. Логинова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза им. В.В. Евстигнеева Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

В. Ю. Филимонов – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова; главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики Института водных и экологических проблем СО РАН.

В. И. Яковлев – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза им. В.В. Евстигнеева Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. Ю. Мясников – научный сотрудник производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова; младший научный сотрудник лаборатории радиационной химии высокоэнергетических электронов Института химии твердого тела и механохимии СО РАН.

А. А. Попова – кандидат технических наук, доцент кафедры Малый бизнес в сварочном производстве Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Ю. Н. Камышов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова; доцент кафедры Информатики и специальной техники Барнаульского юридического института МВД России.

А. В. Собачкин – аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

REFERENCES

1. Barsoum, M. (2013). MAX phases: properties of machinable ternary carbides and nitrides. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. DOI: 10.1002/9783527654581.
2. Pang, W.K. & Low, I.M. (2014). Understanding and improving the thermal stability of layered ternary carbides in ceramic matrix composites, in: I.M. Low (Eds.), *Advances in Ceramic Matrix Composites*, Woodhead Publishing Limited, Philadelphia, pp. 340-368.

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА В ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ СИСТЕМЫ Ti–Al–C

3. Poon, B., Ponson, L., Zhao, J. & Ravichandran, G. (2011). Damage accumulation and hysteretic behavior of MAX phase materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, (59), 2238-2257. DOI: 10.1016/j.jmps.2011.03.012.
4. Scabarozzi, T.H., Amini, S., Finkel, P., Leafer, O.D., Spanier, J.E., Barsoum, M.W., Drulis, M., Drulis, H., Tambussi, W.M., Hettinger, J.D. & Lofland, S.E. (2008). Electrical, thermal, and elastic properties of the MAX-phase Ti_2SC . *Journal of Applied Physics*, (104), 033502. DOI: 10.1063/1.2959738.
5. Hu, C., Li, F., Zhang, J., Wang, J., Wang, J. & Zhou, Y. (2007). Nb_4AlC_3 : A new compound belonging to the MAX phases. *Scripta Materialia*, (57), 893-896. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.07.038.
6. Lane, N.J., Naguib, M., Lu, J., Hultman, L. & Barsoum, M.W. (2012). Structure of a new bulk $Ti_5Al_2C_3$ MAX phase produced by the topotactic transformation of Ti_2AlC . *Journal of the European Ceramic Society*, (32), 3485-3491. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2012.03.035.
7. Anasori, B., Halim, J., Lu, J., Voigt, C.A., Hultman, L. & Barsoum, M.W. (2015). Mo_2TiAlC_2 : A new ordered layered ternary carbide. *Scripta Materialia*, (101), 5-7. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2014.12.024.
8. Lu, S., Li, X. Q., Zhou, Y.F., Xu, W.T. & Pan, J.W. (2018). Synthesis and mechanical properties of TiB_2/Ti_2AlN composites fabricated by hot pressing sintering. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, (126), 900-905.
9. Tzenov, N.V. & Barsoum, M.W. (2000). Synthesis and Characterization of Ti_3AlC_2 . *Journal of the American Ceramic Society*, (83), 825-832. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01281.x.
10. Davydov, D.M., Umerov, E.R., Latukhin, E.I. & Amosov, A.P. (2021). The influence of elemental powder raw material on the formation of the porous skeleton of Ti_3AlC_2 MAX-phase when obtaining by the SHS method. *Vektor nauki Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, (3), 37-47. (In Russ.). DOI: 10.18323/2073-5073-2021-3-37-47.
11. Amosov, E.A., Kovalev, D.Yu., Latukhin, E.I., Konovalikhin, S.V. & Sytshev, A.E. (2017). Self-propagating high-temperature synthesis in the Ti–Al–C–B system. *Bulletin of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, (2), 161-171. (In Russ.).
12. Fedotov, A.F., Amosov, A.P., Latukhin, E. I., Ermoshkin, A.A. & Davydov, D.M. (2014). The influence of gasifying additives on phase composition of combustion products at self-propagating high-temperature synthesis of maxphases in Ti–C–Al system. *Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, (16), 50-55. (In Russ.).
13. Fedotov, A.F., Amosov, A.P., Latukhin, E. I. & Novikov, V.A. Fabrication of aluminum-ceramic skeleton composites based on the Ti_2AlC MAX phase by SHS compaction (2015). *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*, (6), 53-62. (In Russ.). DOI: 10.17073/0021-3438-2015-6-53-62.
14. Potanin, A.Yu., Loginov, P.A., Levashov, E.A., Pogozhev, Yu.S., Patsera, E.I. & Kochetov, N.A. (2015). Effect of Mechanical Activation on Ti_3AlC_2 Max Phase Formation under Self-Propagating High-Temperature Synthesis. *Eurasian Chemical-Technological Journal*, (17), 233-242. DOI: 10.18321/ectj249.
15. Zhou, Y.C., Wang, X.H., Sun, Z.M. & Chen, S.Q. (2001). Electronic and structural properties of the layered ternary carbide Ti_3AlC_2 . *Journal of Materials Chemistry*, (11), 2335-2339. DOI: 10.1039/B101520F.
16. Dudina, D.V. & Bokhonov, B.B. (2022). Materials Development Using High-Energy Ball Milling: A Review Dedicated to the Memory of M.A. Korchagin. *Journal of Composites Science*, (6), 188. DOI: 10.3390/jcs6070188.
17. Sobachkin, A.V. (2025). Stimulated high-temperature synthesis in a structurally modified powder mixture based on the Ti–Al system. Doctor's dissertation. Barnaul. (In Russ.).
18. Yadav, T.P., Yadav, R.M. & Singh, D.P. (2012). Mechanical milling: A top down approach for the synthesis of nanomaterials and nanocomposites. *Nanoscience and Nanotechnology*, (2), 22-48. DOI: 10.5923/j.nn.20120203.01.
19. Sobachkin, A.V., Sitnikov, A.A. & Myasnikov, A.Y. (2021). Effect of mechanical activation and gamma-irradiation on structural-phase state of Ti–Al–C powder reagents. *Defect and Diffusion Forum*, (410), 674-679. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.674.

Information about the authors

A.A. Sitnikov - Doctor of Technical Sciences, Director of the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the Polzunov Altai State Technical University.

A.V. Sobachkin - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the V.V. Evstigneev Problematic Scientific Research Laboratory of Self-Propagating High-temperature Synthesis of the Polzunov Altai State Technical University.

M.V. Loginova - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the V.V. Evstigneev Problematic Scientific Research Laboratory of Self-Propagating High-temperature Synthesis of the Polzunov Altai State Technical University.

V.Yu. Filimonov - Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher at the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the Polzunov Altai State Technical University; Chief Researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics of the Institute for Water and Environment Problems SB RAS.

V.I. Yakovlev - Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the V.V. Evstigneev Problematic Scientific Research Laboratory of Self-Propagating High-temperature Synthesis of the Polzunov Altai State Technical University.

A.Yu. Myasnikov - Researcher at the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the Polzunov Altai State Technical University; Junior Researcher at the Laboratory of Radiation Chemistry of High-energy Electrons at the Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS.

A.A. Popova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Small Business in the Assembly Industry of the Polzunov Altai State Technical University.

Yu.N. Kamyshov - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the Polzunov Altai State Technical University; Associate Professor of the Computer Science and Special Technology Barnaul juridical Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation.

A.V. Sobachkin - postgraduate student at the Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mart 2026.