



IN SITU ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В МЕХАНО-РАДИАЦИОННОАКТИВИРОВАННОЙ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ Ti–Al–C

Александр Андреевич Ситников¹, Алексей Викторович Собачкин²,
Марина Владимировна Логинова³, Владимир Иванович Яковлев⁴,
Валерий Юрьевич Филимонов⁵, Андрей Юрьевич Мясников⁶,
Александр Васильевич Градобоев⁷, Марат Рашидович Шарафутдинов⁸,
Борис Петрович Толочко⁹

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

⁷ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

⁸ ЦКП «СКИФ» Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

^{8, 9} Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, 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 yak1961@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5635-5981>

⁵ vfilimonov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

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

⁷ gava@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2803-5972>

⁸ marat@solid.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6062-6062>

⁹ bptolochko@solid.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5470-4909>

Аннотация. В работе проведены *in situ* синхротронные исследования динамики структурообразования в смеси Ti + Al + C после механо-радиационной активации при высокотемпературном синтезе методом теплового взрыва с использованием индукционного нагрева. Механо-радиационная активация представляет собой последовательные операции по механической активации в активаторе АГО-2 (7 мин. при энергонапряженности 40 г) и облучению у-квантами ^{60}Co на установке «Исследователь» сформированных механокомпозитов (накопленная доза 50 кГр). Основная цель подобного стимулирования – формирование продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза нужного структурно-фазового состава. Исследования по изучению динамики процессов синтеза в режиме реального времени проводились в лаборатории «Методы синхротронного излучения» Института ядерной физики СО РАН им. Г.Н. Будкера. Диапазон углов сканирования составил 33°...66°. Длительность накопления каждого кадра во время реализации эксперимента равнялась 0,5 с. В результате *in situ* экспериментов определена стадийность формирования и температурно-временной интервал образования соединений и MAX-фаз в тройной системе Ti–Al–C. Фазообразование начинается с формирования TiAl₃, затем образуется расплав Al–Ti с выделением зерен TiC, далее титаноалюминиевый расплав насыщается углеродом с кристаллизацией Ti₂AlC, на финальной стадии происходит образование Ti₃AlC₂. При охлаждении до комнатной температуры в продукте синтеза в системе Ti–Al–C преобладает Ti₂AlC (47 %), содержание Ti₃AlC₂ составляет 36 %, а карбida титана TiC – порядка 17 %.

Ключевые слова: MAX-фазы, механо-радиационная активация, высокотемпературный синтез, тепловой взрыв, синхротронное излучение, фазовый состав, фазообразование, структурообразование.

Благодарности: работа выполнялась в рамках государственного Задания FZMM-2023-0003.

Для цитирования: In situ исследование динамики фазообразования в механо-радиационноактивированной порошковой смеси Ti–Al–C / А. А. Ситников [и др.]. // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 254–258. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.043. EDN: <https://elibrary.ru/BTRSIW>.

Original article

IN SITU STUDY OF PHASE FORMATION DYNAMICS IN Ti–Al–C POWDER MIXTURE, ACTIVATED BY MECHANO-RADIATION METHOD

Alexander A. Sitnikov¹, Alexey V. Sobachkin², Marina V. Loginova³,
Vladimir I. Yakovlev⁴, Valery Yu. Filimonov⁵, Andrey Yu. Myasnikov⁶,
Alexander V. Gradoboev⁷, Marat R. Sharafutdinov⁸, Boris P. Tolochko⁹

© Ситников А. А., Собачкин А. В., Логинова М. В., Яковлев В. И., Филимонов В. Ю.,
Мясников А. Ю., Градобоев А. В., Шарафутдинов М. Р., Толочко Б. П., 2025

IN SITU ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В МЕХАНО-РАДИАЦИОННОАКТИВИРОВАННОЙ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ Ti–Al–C

^{1, 2, 3, 3, 4, 5, 6} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

⁷ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

⁸ SRF "SKIF" Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, Russia

^{8, 9} Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk, 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 yak1961@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5635-5981>5 vyfilimonov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>6 myasnickov.andre@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3289-9087>7 gava@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2803-5972>8 marat@solid.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6062-6062>9 bptolochko@solid.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5470-4909>

Abstract. *In situ synchrotron studies of the dynamics of structure formation in a mixture of Ti + Al + C after mechano-radiation activation during high-temperature synthesis by thermal explosion using induction heating were carried out. Mechano-radiation activation is a series of mechanical activation operations in the AGO-2 activator (7 min. at an energy intensity of 40 g) and irradiation with gamma rays of ^{60}Co at the installation «Explorer» of formed mechano-composites (accumulated dose of 50 kGy). The main purpose of such stimulation is the formation of products of self-propagating high-temperature synthesis of the desired structural and phase composition. Research on the dynamics of synthesis processes in real time was conducted in the laboratory "Methods of Synchrotron Radiation" of the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS. The range of scanning angles was 33°...66°. The duration of accumulation of each frame during the experiment was 0.5 seconds. As a result of in situ experiments, the stages of formation and the temperature-time interval of formation of compounds and MAX phases in the Ti–Al–C ternary system were determined. Phase formation begins with the formation of TiAl₃, then an Al–Ti melt is formed with the release of TiC grains, then the titanium-aluminum melt is saturated with carbon with the crystallization of Ti₂AlC, and Ti₃AlC₂ is formed at the final stage. When cooled to room temperature, the synthesis product in the Ti–Al–C system is dominated by Ti₂AlC (47 %), the Ti₃AlC₂ content is 36%, and titanium carbide TiC is fixed at about 17 %.*

Keywords: MAX-phases, mechanical and radiation activation, high-temperature synthesis, thermal explosion, synchrotron radiation, phase composition, phase formation, structure formation.

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

For citation: Sitnikov, A. A., Sobachkin, A. V., Loginova, M. V. Yakovlev, V. I., Filimonov, V. Yu., Myasnikov, A. Yu., Gradoboev, A. V., Sharafutdinov, M. R. & Tolochko, B. P. (2025). In situ study of phase formation dynamics in Ti–Al–C powder mixture, activated by mechano-radiation method. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 254-258. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.043. EDN: <https://elibrary.ru/BTRSIW>.

ВВЕДЕНИЕ

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) является одним из перспективных и быстроразвивающихся направлений современного материаловедения, сущность которого заключается в высокоэкзотермичном взаимодействии порошковых смесей в режиме горения [1]. С целью получения продуктов нужного структурно-фазового состояния СВС-реакция сравнительно легко поддается стимулированию, например, за счет введения дополнительной энергии в исходную смесь или зону горения, механических воздействий на исходные реагенты и/или продукты СВС, путем гравитационных и ударно-волновых воздействий, с помощью магнитных и электрических полей и т.п. [2].

Простым и широко используемым методом стимулирования является механическая обработка реакционной смеси перед СВС. Этому способу посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ зарубежных и российских авторов [3, 4]. В результате механической активации (МА) существенно расширяются возможности СВС, что привело к формированию отдельного направления в СВС [5]. Однако продолжительность МА измеряется минутами, и возможности «тонкого» управления структурой реагентов ограничены.

Многие из стимулирующих факторов влияют на кристаллическую решетку реагентов или продуктов реакции. К примеру, возникающие при МА микронапряжения и зародыши продуктов интенсифицируют

синтез. Однако существуют другие способы придания подвижности атомам и создания дефектов кристаллического строения. Так, в [6] отмечается, что при попадании вещества в поле излучения часть энергии поглощается, при этом образуются точечные дефекты, электроны переходят в возбужденное состояние и т. п. Среди различных видов излучения, гамма- обладает рядом преимуществ, таких как высокая проникающая способность, равномерное распределение дозы, низкое термическое воздействие, отсутствие наведенной активности и др. Кроме того, в других областях гамма-облучение приводит к значительному изменению физико-механических свойств обрабатываемых образцов [7].

В этой связи исследование комбинированного влияния механической и радиационной активации на процессы СВС представляет фундаментально-практический интерес и может сформировать новое направление – механо-радиационную активацию (МРА), где на первом этапе порошковые реагенты подвергаются механической активации, а на втором подготовленные механокомпозиты обрабатываются источниками ионизирующего излучения для изменения их структурного состояния [8].

Получение материалов с заданными свойствами при синтезе в активированных системах подразумевает понимание фундаментальных процессов структурных и фазовых переходов непосредственно в момент реализации СВС. При исследовании динамики фазо- и структурообразования в конденсированных средах экспозиция съемки рентгенограммы

должна быть сопоставима со временем протекания превращений и обеспечивать регистрацию короткоживущих фаз. Решение этих задач возможно с помощью метода *in situ* дифрактометрии синхротронного излучения. Дифракционное поле (последовательная съемка серии дифрактограмм, т.н. «дифракционное кино») позволяет наблюдать структурные превращения вещества в процессах плавления, кристаллизации, синтеза и т.д. [9–12].

Использование разных видов стимулирования СВС должно быть оправдано, в первую очередь, с точки зрения востребованности и необходимости получения тех или иных материалов для различных отраслей промышленности. В современном машиностроении, с одной стороны, постепенно происходит замена традиционных никелевых сплавов на материалы системы Ti-Al, а с другой – ведутся активные исследования по разработке технологий модификации свойств уже алюминидов титана. Одними из актуальных и востребованных материалов являются МАХ-фазы системы Ti-Al-C, благодаря своим уникальным свойствам, таким как стойкость к окислению и коррозии при высоких температурах, хорошей жаростойкостью и т.п. [13]. В этой связи целью работы состоит в исследовании особенностей СВС в порошковой смеси Ti + Al + C после МРА с использованием метода динамической дифрактометрии на пучках синхротронного излучения.

МЕТОДЫ

Для МА порошковой смеси Ti + Al + C использовалась планетарная шаровая мельница АГО-2 при энергонапряженности 40 г, длительность обработки составляла 7 мин. [14]. Источником γ -квантов при МРА служил Co^{60} (установка «Исследователь»), облучение проводили до накопления дозы $5 \cdot 10^4$ Гр.

Исследования по изучению динамики процессов структуро- и фазообразования при реализации МРАСВС в режиме реального времени проводились в лаборатории «Методы синхротронного излучения» Института ядерной физики СО РАН им. Г.Н. Будкера, Новосибирск. Активированная порошковая смесь в графитовом тигле с термопарой в центре помещалась в вакуумируемую камеру СВЧ-индуктора. Далее комплекс монтировался в блок станции 5Б накопителя ВЭПП-3. Термограммы разогрева анализировались с использованиемвольфрам-рениевых термопар. Регистрация «дифракционного кино» включалась синхронно с началом инициирования синтеза. Непрерывная съемка дифрактограмм проводилась на монохроматическом излучении с длиной волны 1,505 Å. При проведении съемки «дифракционного кино» диапазон углов сканирования составил $33^\circ \dots 66^\circ$. Длительность накопления каждого кадра во время реализации эксперимента равнялась 0,5 с. Процентное содержание зафиксированных фаз рассчитывалось полуколичественным методом по соотношению максимальных пиков на дифрактограммах без учета массовых коэффициентов поглощения фаз (погрешность определения 1...3 %) [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлена характерная термограмма МРАСВС в системе Ti-Al-C с выделенными основными участками: разогрев порошковой смеси (1–2); образование расплава Al-Ti (2–3); инициирование реакции и теплового взрыва (3–4); выдержка системы (4–5).

На рисунке 2 представлена 2D-проекция дифрактограмм

дифрактограмм процесса синтеза с выделенными характерными стадиями реакции (в соответствии с термограммой на рисунке 1). Съемка *in situ* проводилась с температурой нагрева 183 °C. До начала реализации теплового взрыва (точка 2 на термограмме при температуре 1050 ± 10 °C) зафиксировано 63 кадров. Продолжительность разогрева смеси до выхода на тепловой взрыв составило порядка 32 с.

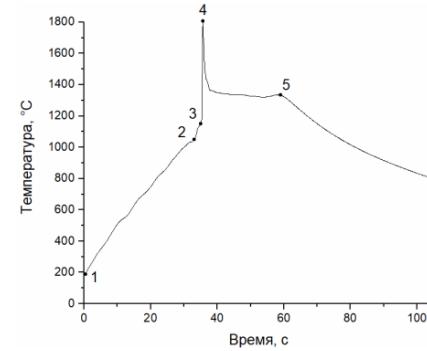


Рисунок 1 – Термограмма синтеза в системе Ti-Al-C

Figure 1 – Thermograms of synthesis in Ti-Al-C system

Температура выхода на тепловой взрыв соответствовала 1050 ± 10 °C, продолжительность инертного разогрева составляет порядка 32 с. Максимальная температура синтеза достигла 1800 °C. Характерная длительность реализации теплового взрыва 3,5 с. Температурный интервал участка химической реакции составил 750 °C.

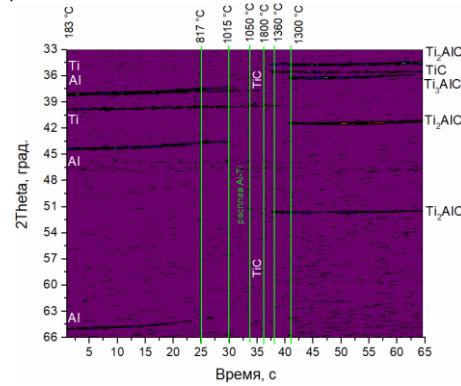


Рисунок 2 – «Дифракционное кино»

Figure 2 – «Diffraction cinema»

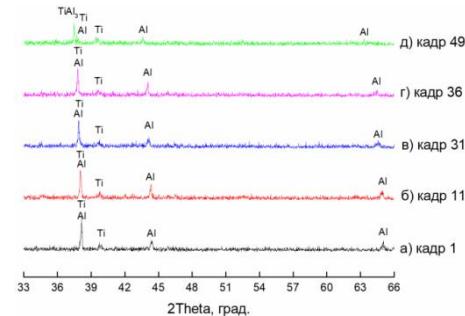


Рисунок 3 – Дифрактограммы участка (1–2)

Figure 3 – Diffractograms of section (1-2)

На 1-ом кадре регистрируются пики исходных компонентов смеси титана и алюминия (рисунок 3). В момент начала съемки на дифрактограмме фиксиру-

IN SITU ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В МЕХАНО-РАДИАЦИОННОАКТИВИРОВАННОЙ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ Ti-Al-C

ются уширенные пики исходных реагентов, свидетельствующие об изменении тонкой структуры после воздействия механоактивации.

При разогреве порошковой смеси до температуры порядка 400 °C (через 12,5 с от начала съемки), из-за теплового воздействия межплоскостные расстояния реагентов увеличиваются, о чем свидетельствует смещение пиков в сторону меньших углов (рисунок 3, кадр 11). При дальнейшем повышении температуры смещение пиков (без изменения фазового состава) продолжается. Характерные дифрактограммы представлены на рисунке 3 (кадр 31, кадр 36).

При достижении температуры порядка 817 °C на 25 секунде дифракционный максимум в районе 38° расщепляется, в нем идентифицируется фаза $TiAl_3$, также фиксируются пики Ti и смещенные с малой интенсивностью пики Al (рисунок 3, кадр 49).

Далее до ~ 1015 °C фазовый состав остается без изменений. При достижении температуры ~ 1015 °C (30 с) происходит резкое падение интенсивностей пиков до уровня фона (рисунок 4, кадр 62). Вероятно, это обусловлено образованием расплава $Al-Ti$. Через 2 с при 1050 °C на дифрактограмме возникают линии, соответствующие карбиду титана (рисунок 4, кадр 64). Углерод вступает во взаимодействие с расплавом, и в результате насыщения расплава углеродом выкристаллизовываются зерна TiC , что и инициирует реакцию СВЧ.

Далее происходит резкий скачок скорости реакции, максимальная зафиксированная температура составила 1800 °C, время с начала съемки 35,5 с. Длительность реакции составила 3,5 с. После завершения реакции теплового взрыва на момент достижения системой максимальной температуры фиксируются только пики TiC (рисунок 4, кадр 71).

Затем проводилась выдержка системы для исследования динамики фазообразования на этапе охлаждения. В течение последующих 2 с после теплового взрыва на дифракционном поле фиксируются только пики TiC . На 38 с от начала съемки (2,5 с после теплового взрыва) при температуре 1360 °C из расплава кристаллизуется MAX-фаза Ti_2AlC . На дифрактограмме возникают отражения от плоскостей (103) и (106) (рисунок 4, кадр 74).

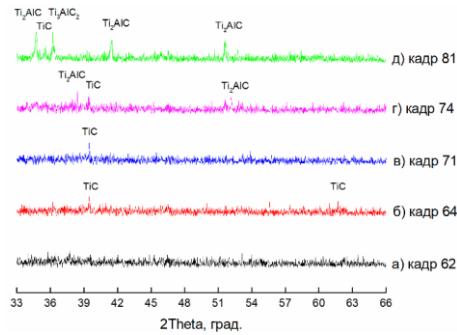


Рисунок 4 – Дифрактограммы участка (2–5)

Figure 4 – Diffractograms of section (2-5)

При 1300 °C содержание Ti_2AlC увеличивается. В районе 35° возникает пик MAX-фазы Ti_3AlC_2 . Сохраняется присутствие TiC (рисунок 4, кадр 81). Стоит отметить, что перераспределение интенсивностей пиков Ti_2AlC может быть обусловлено увеличением количества слоев в отдельном кристаллите MAX-фазы.

На рисунке 5 представлена дифрактограмма охлажденного продукта.

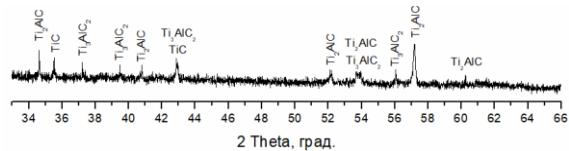


Рисунок 5 – Дифрактограмма охлажденного продукта

Figure 5 – Diffractogram of the cooled product

При охлаждении до комнатной температуры в продукте МРАСВЧ в системе Ti-Al-C преобладает Ti_2AlC (47 %), содержание Ti_3AlC_2 составляет 36 %, а карбida титана TiC около 17 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные *in situ* экспериментальные исследования по МРАСВЧ в порошковой смеси Ti + Al + C позволили установить, что процесс синтеза происходит в несколько стадий, каждая из которых характеризуется трансформацией фазового состава. На этапе выдержки системы, контролируя температуру, можно управлять содержанием MAX-фаз в продукте реакции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика / отв. ред. А.Е. Сычев. Черноголовка : Изд-во «Территория», 2001. 432 с.
2. Syschev A.E., Merzhanov A.G. Self-propagating high-temperature synthesis of nanomaterials // Russian Chemical Reviews. 2004. V. 73, № 2. P. 147–159. doi 10.1070/RC2004v07n02ABEH000837.
3. Rogachev A.S. Mechanical activation of heterogeneous exothermic reactions in powder mixtures // Russian Chemical Reviews. 2019. V. 88, № 9. P. 875–900. doi 10.1070/RCR4884.
4. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling // Progress in Materials Science. 2001. V. 46. P. 1–184.
5. Влияние механоактивации на процессы фазо- и структурообразования при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе / отв. ред. О. И. Ломовский. Новосибирск : Параэль, 2008. 168 с.
6. Шалаев А.М. Радиационно-стимулированная диффузия в металлах. Москва : Атомиздат, 1972. 148 с.
7. Градобоев А.В., Суржиков А.П. Радиационная стойкость СВЧ приборов на основе арсенида галлия. Томск : Изд-во ТПУ, 2005. 277 с.
8. 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.
9. Dynamics of phase transformation during thermal explosion in the Al–Ni system: Influence of mechanical activation / A. S. Mukasyan [et. al.] // Physica B: Condensed Matter. 2010. V. 405, Iss. 2. P. 778–784. doi 10.1016/j.physb.2009.10.001.
10. Ковалев Д.Ю. Динамическая рентгенография материообразующих процессов горения : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Черноголовка, 2020. 249 с.
11. Synchrotron *in situ* studies of mechanical activation treatment and γ -radiation impact on structural-phase transitions and high-temperature synthesis parameters during the formation of γ (TiAl) compound / M. Loginova [et. al.] // Journal of Synchrotron Radiation. 2019. V. 26. P. 1671–1678. doi 10.1107/S1600577519010014.
12. In situ synchrotron X-ray diffraction study of synthesis reactions in mechanically activated Ti + Al powder mixture under linear heating conditions / V.Yu. Filimonov [et. al.] // Solid State Ionics. 2024. V. 412. P. 116599. doi 10.1016/j.ssi.2024.116599.
13. Barsoum M. MAX phases: properties of machinable ternary carbides and nitrides. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. 436 p.
14. Высокотемпературный синтез алюминидов титана в активированных порошковых смесях А.А. Ситников [и др.]. Барнаул : АИПГУ, 2022. 160 с.
15. Кульков С.Н., Буякова С.П. Современные методы

А. А. СИТНИКОВ, А. В. СОБАЧКИН, М. В. ЛОГИНОВА, В. И. ЯКОВЛЕВ, В. Ю. ФИЛИМОНОВ,
А. Ю. МЯСНИКОВ, А. В. ГРАДОБОЕВ, М. Р. ШАРАФУТДИНОВ, Б. П. ТОЛОЧКО

анализа в материаловедении. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 89 с.

Информация об авторах

А. А. Ситников – д-р техн. наук, директор производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок АлтГТУ.

А. В. Собачкин – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза им. В. В. Евстигнеева АлтГТУ.

М. В. Логинова – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза им. В. В. Евстигнеева АлтГТУ.

В. И. Яковлев – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза им. В. В. Евстигнеева АлтГТУ.

В. Ю. Филимонов – д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок АлтГТУ.

А. Ю. Мясников – науч. сотр. производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок АлтГТУ.

А. В. Градобоеев – д-р техн. наук, профессор-консультант отделения экспериментальной физики ТПУ.

М. Р. Шарафутдинов – канд. хим. наук, координатор станции «Микрофокус» ЦКП «СКИФ»; ст. науч. сотр. лаборатории методов синхротронного излучения ИХТТМ СО РАН.

Б. П. Толочко – д-р хим. наук, гл. науч. сотр. лаборатории методов синхротронного излучения ИХТТМ СО РАН.

REFERENCES

1. Ed. by Sychev, A.E. (2001). Self-propagating high-temperature synthesis: theory and practice. Chernogolovka: Territoriya. (In Russ.).
2. Sytschev, A.E. & Merzhanov, A.G. (2004). Self-propagating high-temperature synthesis of nanomaterials. *Russian Chemical Reviews*, (73), 147–159. doi 10.1070/RC2004v07n02ABEH000837.
3. Rogachev, A.S. (2019). Mechanical activation of heterogeneous exothermic reactions in powder mixtures. *Russian Chemical Reviews*, (88), 875–900. doi 10.1070/RCR4884.
4. Suryanarayana C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, (46), 1–184.
5. Ed. by Lomovsky, O. I. (2008). The influence of mechanical activation on the processes of phase and structure formation in self-propagating high-temperature synthesis. Novosibirsk: Parallel. (In Russ.).
6. Shalaev, A.M. (1972). Radiation-stimulated diffusion in metals. Moscow: Atomizdat. (In Russ.).
7. Gradoboev, A.V. & Surzhikov, A.P. (2005). Radiation resistance of microwave devices based on gallium arsenide. Tomsk: TPU Publishing House. (In Russ.).
8. 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.).
9. Mukasyan, A.S., White, J.D.E., Kovalev, D.Y., Kochetov, N.A., Ponomarev, V.I. & Son, S.F. (2010). Dynamics of phase transformation during thermal explosion in the Al–Ni system: Influence of mechanical activation. *Physica B: Condensed Matter*, (405), 778–784. doi 10.1016/j.physb.2009.10.001.
10. Kovalev, D.Yu. (2020). Dynamic radiography of material-forming combustion processes. Doctor's dissertation. Chernogolovka. (In Russ.).
11. Loginova, M., Sobachkin, A., Sitnikov, A., Yakovlev, V., Filimonov, V., Myasnikov, A., Sharafutdinov, M., Tolochko, B., & Gradoboev, A. (2019). Synchrotron in situ studies of mechanical activation treatment and γ -radiation impact on structural-phase transitions and high-temperature synthesis parameters during the formation of γ -TiAl compound. *Journal of synchrotron radiation*, (26), 1671–1678. doi 10.1107/S1600577519010014.
12. Filimonov, V.Yu., Loginova, M.V., Sitnikov, A.A., Yakovlev, V.I., Sobachkin, A.V., Negodyaev, A.Z., Myasnikov, A.Yu. & Sharafutdinov, M.R. (2024). In situ synchrotron X-ray diffraction study of synthesis reactions in mechanically activated Ti + Al powder mixture under linear heating conditions. *Solid State Ionics*, (412), 116599. doi 10.1016/j.ssi.2024.116599.
13. Barsoum, M. (2013). MAX phases: properties of machinable ternary carbides and nitrides. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
14. Sitnikov, A.A., Filimonov, V.Yu., Gradoboev, A.V., Loginova, M.V., Yakovlev, V.I., Sobachkin, A.V., Sharafutdinov, M.R. & Myasnikov, A.Yu. (2022). High-temperature synthesis of titanium aluminides in activated powder mixtures. Barnaul: AltSTU. (In Russ.).
15. Kulkov, S.N. & Buyakova, S.P. (2010). Modern methods of analysis in materials science. Tomsk: TPU Publishing House. (In Russ.).

Information about the authors

А. А. Ситников – Dr. Tech. Sci., Director of the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the AltSTU.

А. В. Собачкин – Cand. Tech. Sci., Sen. Res. at the V. V. Евстигнеев Problematic Scientific Research Laboratory of Self-Propagating High-temperature Synthesis of the AltSTU.

М. В. Логинова – Cand. Tech. Sci., Sen. Res. at the V. V. Евстигнеев Problematic Scientific Research Laboratory of Self-Propagating High-temperature Synthesis of the AltSTU.

В. И. Яковлев – Cand. Tech. Sci., Lead. Res. at the V. V. Евстигнеев Problematic Scientific Research Laboratory of Self-Propagating High-temperature Synthesis of the AltSTU.

В. Ю. Филимонов – Dr. Phys.-Math. Sci., Lead. Res. at the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the AltSTU.

А. Ю. Мясников – Res. at the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the Polzunov Altai State Technical University.

А. В. Градобоеев – Dr. Tech. Sci., Consultant Prof. at the Department of Experimental Physics of the TPU.

М. Р. Шарафутдинов – Cand. Chem. Sci., Coordinator of the Microfocus station at the SRF «СКИФ»; Sen. Res. at the Laboratory of Synchrotron Radiation Methods at the ISSCM SB RAS.

Б. П. Толочко – Dr. Chem. Sci., Chief Res. at the Laboratory of Synchrotron Radiation Methods at the ISSCM SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.