



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 621.762.2

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.036



ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРОФАЗООБРАЗОВАНИЯ В АКТИВИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ Ti-AL ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНОМ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Валерий Юрьевич Филимонов¹, Марина Владимировна Логинова²,
Алексей Викторович Собачкин³, Александр Андреевич Ситников⁴,
Владимир Иванович Яковлев⁵, Андрей Юрьевич Мясников⁶,
Алексей Зеновьевич Негодяев⁷, Александр Андреевич Розный⁸

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

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

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

¹ vyfilimonov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

² logi_m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6518-3598>

³ sobalvi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9159-1122>

⁴ sitalan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4023-0869>

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

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

⁷ anicpt@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7135-263X>

⁸ alex.rozny@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8603-5874>

Аннотация. В представленной работе проведено изучение процессов структурообразования в предварительно механоактивированных порошковых смесях составов Ti + Al, Ti + 3Al в условиях ударно-волнового воздействия. На первой стадии исследования порошковые смеси подвергались механической активации в шаровой мельнице «Активатор-2SL». На второй стадии полученные механокомпози́ты были подвержены термическому воздействию в режимах низкотемпературного спекания и теплового взрыва. На третьем этапе полученные прекурсоры подвергались ударно-волновому воздействию. Установлено, что в результате реализации третьего этапа структурное состояние смеси существенно зависит от режимов термического воздействия на исходные механокомпози́ты. При этом в полученных продуктах можно выделить два предельных структурных состояния – от полной аморфизации до полной кристаллизации. Последнее может определяться степенью стабильности кристаллических решеток в результате механоактивации и термического воздействия. Полученные результаты могут дать возможность управления структурно-фазовым состоянием продуктов детонационно-газового напыления, что может быть важным с точки зрения технологий нанесения защитных покрытий.

Ключевые слова: алюминиды титана, механическая активация, термическое воздействие, структура, фазовый состав, степень кристалличности

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

Для цитирования: Особенности процессов структурофазообразования в активированных порошковых смесях Ti-Al при экстремальном термическом воздействии / В. Ю. Филимонов [и др.]. // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 231–236. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.036. EDN: <https://elibrary.ru/RWNPYV>.

Original article

FEATURES OF STRUCTURE AND PHASE FORMATION PROCESSES IN ACTIVATED Ti-AL POWDER MIXTURES UNDER EXTREME THERMAL CONDITIONS

Valery Yu. Filimonov¹, Marina V. Loginova², Alexey V. Sobachkin³,
Alexander A. Sitnikov⁴, Vladimir I. Yakovlev⁵, Andrey Yu. Myasnikov⁶,
Alexey Z. Negodyaev⁷, Alexander A. Roznyj⁸

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

¹ Institute for Water and Environment Problems SB RAS, Barnaul, Russia

© Филимонов В. Ю., Логинова М. В., Собачкин А. В., Ситников А. А., Яковлев В. И., Мясников А. Ю., Негодяев А. З., Розный А. А., 2025

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

¹ vyfilimonov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

² logj_m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6518-3598>

³ sobalvi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9159-1122>

⁴ sitalan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4023-0869>

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

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

⁷ anicpt@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7135-263X>

⁸ alex.rozny@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8603-5874>

Abstract. In this paper, the processes of structure formation in mechanoactivated powder mixtures of Ti + Al, Ti + 3Al compositions under shock wave conditions are studied. At the first stage of the study, powder mixtures were mechanically activated in an «Activator-2SL» ball mill. At the second stage, the obtained mechanocomposites were subjected to thermal effects in the modes of low-temperature sintering and thermal explosion. At the third stage, the obtained precursors were subjected to shock wave action. It is established that as a result of the implementation of the third stage, the structural state of the mixture significantly depends on the modes of thermal action on the initial mechanocomposites. At the same time, two limiting structural states can be distinguished in the obtained products – from complete amorphization to complete crystallization. The latter may be determined by the degree of stability of the crystal lattices as a result of mechanical activation and thermal effects. The results obtained may make it possible to control the structural and phase state of detonation-gas sputtering products, which may be important from the point of view of protective coating technologies.

Keywords: titanium aluminides, mechanical activation, thermal effect, structure, phase composition, degree of crystallinity.

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

For citation: Filimonov, V. Yu., Loginova, M. V., Sobachkin, A. V., Sitnikov, A. A., Yakovlev, V. I., Myasnikov, A. Yu., Negodyaev, A. Z. & Roznyj, A. A. (2025). Features of structure and phase formation processes in activated Ti-Al powder mixtures under extreme thermal conditions. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 231-236. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.036. EDN: <https://elibrary.ru/RWNPYV>.

ВВЕДЕНИЕ

Получение износостойких защитных покрытий деталей и узлов машин является одной из важных задач современного материаловедения. Одним из способов нанесения покрытий является детонационно-газовое напыление (ДГН), которое отличается от других способов, прежде всего, высокой скоростью частиц напыляемого порошка за счет энергии детонации газовой смеси [1-4]. К преимуществам ДГН следует отнести высокую адгезию покрытия и его низкую пористость [5-7]. Для получения покрытий, обладающих комплексом взаимодополняющих характеристик, как правило, используются многокомпонентные сплавы или частицы, имеющие сложную матричную структуру [8, 9]. С этой точки зрения чрезвычайно важным является вопрос о взаимосвязи структуры, состава и свойств напыляемого материала и нанесенного покрытия [10]. Ударно волновое воздействие на частицы может приводить к изменению как макро- так и микроструктуры материала, т.е. к фазовым переходам, химическим реакциям, формированию растворов и метастабильных фаз и т.д. При этом состояние напыляемых частиц в процессе движения до основы для напыления практически невозможно контролировать. Таким образом, известно состояние материала до напыления и в результате процесса ДГН, однако промежуточное состояние является «черным ящиком».

В последние десятилетия для получения порошковых гетероструктур широко используется метод механической активации (МА) для бинарных и многокомпонентных смесей [11–17]. Результатом механоактивационного воздействия, чаще всего, является формирование сложных гетерогенных образований, имеющих матричную структуру. При этом реакционная способность компонентов повышается за счет целого ряда факторов, в частности, высокой концентрации неравновесных дефектов и большой удельной поверхности контакта реагентов. Для таких систем в

работе [18] предложен метод изучения промежуточных структур при ударно-волновом воздействии на основе установки для ДГН. В приведенном исследовании данную установку было предложено использовать как реактор для проведения синтеза композиционных материалов. При этом наличие основы для напыления не рассматривается, после выхода из ствола установки частицы пролетают значительное расстояние и охлаждаются. Для этих целей использовались специальные порошковые «ловушки». Ударно-волновой нагрев частиц механокомпозигов позволил провести реакции синтеза в механически активированной смеси состава Ti + Al в неравновесных условиях при высоком давлении, сверхбыстрых скоростях нагрева и охлаждения в режиме детонирующих газовых смесей. В работе показано, что продуктами синтеза являются интерметаллидные фазы TiAl, TiAl₃, Ti₃Al. Полученный продукт можно рассматривать как многофазный, с частично упорядоченной структурой, имеющую аморфную и кристаллическую составляющую. Однако можно предположить, что сформировавшиеся в результате экстремального воздействия гетероструктуры будут зависеть от состояния исходных прекурсоров, в частности, от возможного предварительного термического воздействия. Действительно, в зависимости от режимов предварительного нагрева смеси могут получиться материалы с разным содержанием фаз и различной степенью кристалличности. Таким образом, может появиться возможность управления структурой и свойствами покрытий, полученных из различных прекурсоров и в различных режимах их предварительной подготовки. Исходя из изложенного, целью настоящей работы является изучение влияния характеристик исходных прекурсоров, полученных в результате механической активации с последующим отжигом, на состав и структуру соответствующих материалов, полученных в результате ударно-волнового воздействия.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРОФАЗООБРАЗОВАНИЯ В АКТИВИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ Ti-AL ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНОМ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

МЕТОДЫ

Для получения механокомпозитов использовались порошковые смеси составов Ti + Al, Ti + 3Al из порошков титана ПТХ-7-2 со средним размером частиц 80 мкм и порошков алюминия АСД-1 со средним размером 20 мкм. Для получения прекурсоров применялась планетарная шаровая мельница «Активатор-2SL». Отношение массы исходной порошковой смеси к массе мелющих тел составляло 1:20, время механической активации (МА) – 11 мин. при энергонапряженности мельницы 50 г. Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре ДРОН-8 с $\text{CuK}\alpha$ -излучением ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). Для изучения результатов термического воздействия на активированную смесь использовался цилиндрический реактор с нагревателем из нихромовой проволоки. Изменения режимов нагрева производилось с помощью трансформатора, что позволяло плавно менять иницирующую мощность нагрева активированной порошковой смеси, находящейся в объеме цилиндра. Экспериментальный комплекс для реализации ударно-волнового воздействия на прекурсоры подробно описан в [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены дифрактограммы исходной и активированных смесей. Как следует из рисунка, каких-либо соединений на основе алюминия и титана не наблюдается. Рост времени механоактивационной обработки сопровождается снижением интенсивности дифракционных пиков и их уширением, что, как известно, определяется уменьшением размеров зерен и ростом концентрации неравновесных дефектов структуры [19].

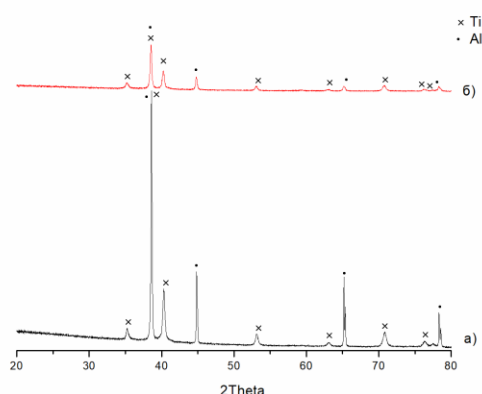


Рисунок 1 – Дифрактограммы порошковых смесей до (а) и после 11 мин. механоактивации (б)

Figure 1 – Diffraction patterns of powder mixtures before (a) and after 11 min. mechanical activation (b)

Далее механически активированные смеси различного состава были подвержены термическому воздействию при различных режимах нагрева (рисунок 2). Вполне очевидно, что синтез в докритических режимах 1 и 2 является твердофазным (температура плавления алюминия составляет 660°C).

На рисунке 3 представлены диаграммы относительного содержания исходных компонентов и продуктов как результат синтеза в различных режимах. Расчет содержания проводился на основе количественного анализа дифрактограмм продуктов синтеза с использованием методики [20].

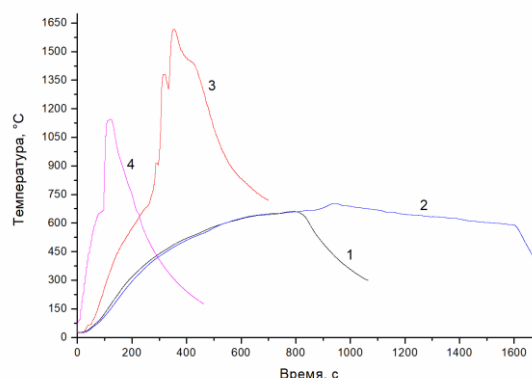


Рисунок 2 – Термограммы разогрева активированных смесей: 1 – состав Ti + Al, докритический режим, время выдержки 5 мин. при 640°C ; 2 – состав Ti + Al, докритический режим, время выдержки 30 мин. при 640°C ; 3 – состав Ti + Al, посткритический режим (тепловой взрыв); 4 – состав Ti + 3Al, тепловой взрыв

Figure 2 – Thermograms of heating of activated mixtures: 1 – Ti + Al, subcritical mode, exposure time 5 min. at 640°C ; 2 – Ti + Al, subcritical mode, exposure time 30 min. at 640°C ; 3 – Ti + Al, post-critical mode (thermal explosion); 4 – Ti + 3Al, thermal explosion

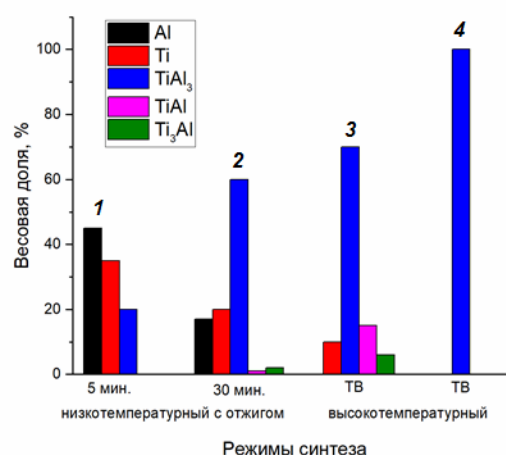


Рисунок 3 – Относительное содержание зафиксированных фаз в продуктах реакции в разных режимах синтеза. Нумерация диаграмм соответствует режимам, представленным на рисунке 2

Figure 3 – The relative content of fixed phases in the reaction products in different synthesis modes. The numbering of the diagrams corresponds to the modes shown in Figure 2

Как следует из полученных результатов, охлажденные образцы содержат разное количество синтезированных фаз и исходных реагентов. Для образца 1 (5 мин. отжига) характерно большое количество непрореагировавших компонентов Ti + Al. При этом наблюдается незначительное количество триалюмида титана. При более продолжительном отжиге (30 мин.) количество исходных реагентов в продукте уменьшается, при этом содержание соединения TiAl₃ значительно увеличивается. В этом же режиме отжига появляются зародыши фаз TiAl и Ti₃Al, что соответствует диаграмме состояния [21]. При переходе в режим теплового взрыва в продуктах синтеза не содержится остаточный алюминий, доминирующей фа-

зой является соединение $TiAl_3$, при этом содержание соединений $TiAl$ и Ti_3Al возрастает. Продукт содержит непрореагировавший титан. При реализации высокотемпературного синтеза в смеси состава $Ti + 3Al$ продукт является строго монофазным составом $TiAl_3$.

На следующем этапе исследования синтезированные прекурсоры были подвержены ударно-волновому воздействию с использованием установки, описанной в [18]. Для реализации воздействия использовалась пропан-бутан кислородная смесь при соотношении газов 1:3. На рисунке 4 приведены дифрактограммы образцов, полученных в результате ударно-волнового воздействия.

Как следует из структуры дифрактограмм, соответствующих режимам синтеза 3 и 4, после экстремального термического воздействия на синтезированный монофазный $TiAl_3$ продукт сохранил свой состав и на всех дифрактограммах идентифицируются узкие пики соединения $TiAl_3$. На малых углах наблюдается небольшое по значениям интенсивности рентгеноаморфное гало, свидетельствующее о незначительной аморфизации, что может быть связано с плавлением порошка мелкой фракции (<50 мкм). Продукт ударно-волнового воздействия на смесь, синтезированной в режиме 1, находится в полностью аморфном состоянии.

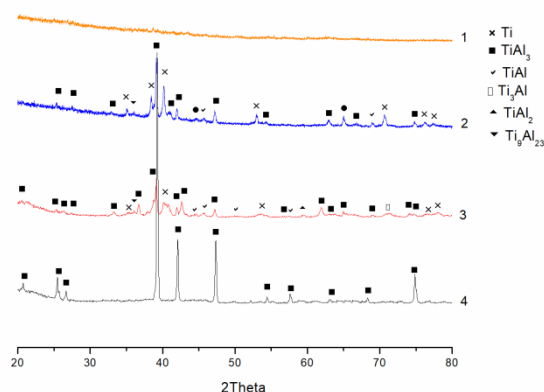
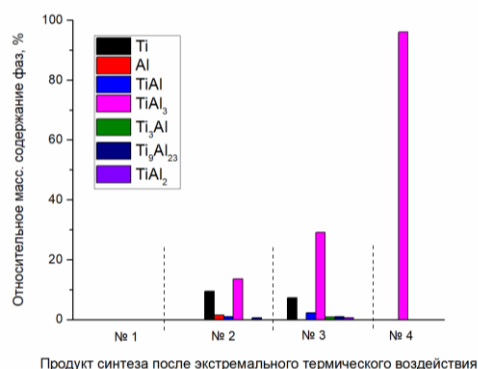


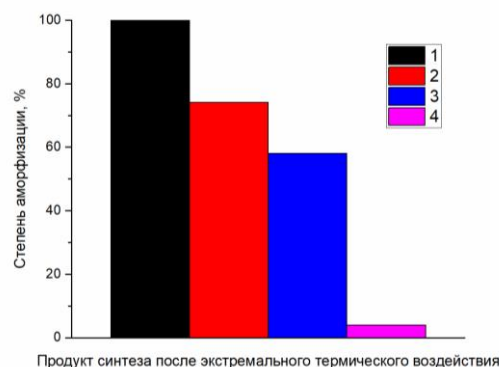
Рисунок 4 – Дифрактограммы продуктов, полученных в проточном реакторе импульсного действия

Figure 4 – Diffractograms of products obtained in a pulsed flow reactor

Как следует из полученных результатов, степень кристалличности продуктов зависит от фазового состава исходных образцов. Наибольшая степень кристалличности после высокоэнергетического воздействия наблюдается в образцах 3 и 4, представляющих собой продукты синтеза, реализованного в высокотемпературном режиме, и имеющих в своем составе доминирующее соединение $TiAl_3$ (рисунок 5). Образец 4 (монофазный $TiAl_3$) после высокоэнергетического воздействия на всех режимах сохранил кристаллическую структуру: степень кристалличности составляет порядка 96 %. Полностью аморфизированный материал был получен из образца-прекурсора № 1 (продукт, синтезированный на низкотемпературном режиме с выдержкой в течение 5 мин. состава $Ti, Al, TiAl_3$) после ударно-волнового воздействия. Можно предположить, что данный результат определяется тем, что при синтезе в режиме 1 формируются метастабильные структуры, которые определяются появлением зародышей интерметаллидных фаз, не находящихся в равновесии с исходными компонентами и с доминирующей фазой $TiAl_3$ (при этом следует иметь в виду, что смесь была подвержена механической активации). Из-за этого возникают значительные деформации кристаллических структур, обуславливающие неравновесное состояние системы. В результате мощного энергетического воздействия система разрушается, переходя в аморфно-кристаллическое состояние. В то же время, образцы, синтезированные в режимах 3 и 4, демонстрируют относительную устойчивость к высокоэнергетическому воздействию, что обусловлено устойчивостью кристаллической структуры, которая определяется формированием стабильной фазы состава $TiAl_3$ на этапе предварительного синтеза. Режим 2 является промежуточным. Таким образом, в полученных продуктах можно выделить два предельных структурных состояния – от полной аморфизации до полной кристаллизации. Между этими состояниями, варьируя условиями ударно-волнового воздействия, могут формироваться разнообразные аморфно-нанокристаллические структуры с разной степенью кристалличности, что определяет возможность управления структурно-фазовым состоянием системы в процессе получения продуктов ДГН.



Продукт синтеза после экстремального термического воздействия



Продукт синтеза после экстремального термического воздействия

Рисунок 5 – Влияние ударно-волнового воздействия на формирование аморфно-кристаллической структуры в образцах, синтезированных в режимах 1-4: а) относительное содержание фаз после воздействия, б) соответствующая степень аморфизации

Figure 5 – The effect of shock wave action on the formation of an amorphous crystal structure in samples synthesized in modes 1-4: а) the relative content of phases after exposure, б) the corresponding degree of amorphization

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях ударно-волнового импульсного воздействия из предварительно синтезированных прекурсоров получены продукты различного фазового состава, имеющие частично упорядоченную структуру, содержащую кристаллическую и аморфную составляющие (с разной степенью аморфизации). Входящие в составы основные интерметаллические соединения $TiAl_3$, Ti_3Al , $TiAl$ находятся в неравновесном состоянии. Содержание аморфной составляющей в полученных продуктах зависит от фазового состава исходных образцов и режимов термического воздействия. Самое высокое содержание аморфной составляющей (от 80 % – до полной аморфизации) зафиксировано в материалах, полученных после высокоэнергетического воздействия на прекурсоры, имеющие в своем исходном составе алюминий и титан, а также зародыши интерметаллидных фаз, находящихся в разупорядоченном состоянии, которые, из-за термодинамической нестабильности, гораздо быстрее претерпевают изменения от кристаллической структуры до аморфной фазы. После ударно-волнового воздействия на прекурсоры, полученные высокотемпературным синтезом и имеющие в своем составе сформировавшиеся хорошо окристаллизованные фазы, наблюдается более низкая степень аморфизации (от 45 до 60 %) в зависимости от режимов воздействия. После высокоэнергетического воздействия на прекурсоры монофазного состава $TiAl_3$ степень аморфизации составляет порядка 3 %. Полученные результаты открывают возможности управления структурно-фазовым состоянием продуктов ДГН, что может быть важным с точки зрения технологий нанесения защитных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для вузов. Москва : Металлургия, 1992. 432 с.
2. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационного газового напыления покрытий. Москва : Наука, 1978. 224 с.
3. Бартев С.С., Федько Ю.П., Григорьев А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Ленинград : Машиностроение, 1982. 215 с.
4. Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А. Детонационное нанесение покрытий. Ленинград : Судостроение, 1979. 178 с.
5. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование) : учеб. пособие для студ. вузов. Москва : Интермет инжиниринг, 2004. 623 с.
6. Computer-Controlled Detonation Spraying: From Process Fundamentals Toward Advanced Applications / V. Ulianitsky [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20. P. 791–801. doi 10.1007/s11666-011-9649-6.
7. Kharlamov Y.A. Detonation spraying of protective coatings // Materials Science and Engineering. 1987. Vol. 93. P. 1-37. doi 10.1016/0025-5416(87)90409-5.
8. Solidification Mechanism of the D-Gun Sprayed Fe-Al Particles / W. Wolczynski [et al.] // Archives of Metallurgy and Materials. 2017. Vol. 62, Iss. 4. P. 2391-2397. doi 10.1515/AMM-2017-0352.
9. Detonation spraying of Ti-Cu mixtures in different atmospheres: Carbon, nitrogen and oxygen uptake by the powders / A.A. Shtertser [et al.] // Surfaces and Interfaces. 2020. Vol. 21. P. 100676. doi 10.1016/j.surf.2020.100676.
10. Obtained of powder coatings by detonation spraying / D.B. Buitkenov [et al.] // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. 2020. Vol. 4, No. 3. Article 6. doi 10.29317/ejpfm.2020040306.

11. Rogachev A.S., Mukasyan A.S. Combustion for material synthesis. London : CRC Press, 2014. 424 p. doi 10.1201/b17842.
12. Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings / E. A. Levashov [et al.] // International Materials Reviews. 2017. Vol. 62, Iss. 4. P. 203-239. doi 10.1080/09506608.2016.1243291.
13. Itin V.I., Nayborodenco Yu.S. High-temperature synthesis of intermetallic compounds. Tomsk : Tomsk State University, 1989. 214 p.
14. Khina B.B., Formanek B. On the physicochemical mechanism of the influence of preliminary mechanical activation on self-propagating high-temperature synthesis // Solid State Phenomena. 2008. Vol. 138. P. 159–164. doi 10.4028/www.scientific.net/SSP.138.159.
15. Aruna S.T., Mukasyan A.S. Combustion synthesis and nanomaterials // Current Opinion in Solid State & Materials Science. 2008. Vol. 12, Iss. 3–4. P. 44–50. doi 10.1016/j.cossms.2008.12.002.
16. Mechanical activation and gasless explosion: Nanostructural aspects / A.S. Mukasyan [et al.] // Chemical Engineering Journal. 2011. Vol. 174, Iss. 2-3. P. 677–686. doi 10.1016/j.cej.2011.09.028.
17. 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.
18. Phase State of Reaction Products of a Mechanically Activated Ti + Al Mixture Synthesized during Gas Mixture Detonation / M.V. Loginova [et al.] // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2024. Vol. 60. P. 641–650. doi 10.1134/S0010508224050095.
19. High temperature synthesis of single-phase Ti_3Al intermetallic compound in mechanically activated powder mixture / V.Yu. Filimonov [et al.] // Powder Technology. 2013. Vol. 235. P. 606-613. doi 10.1016/j.powtec.2012.11.022.
20. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. Москва : Металлургия, 1970. 366 с.
21. Диаграммы состояния двойных металлических систем : Справочник. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. Москва : Машиностроение, 1996. 992 с.

Информация об авторах

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.

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.

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.

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

В. И. Яковлев – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяюще-

гося 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. З. Негодяев – научный сотрудник производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. А. Розный – аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

REFERENCES

1. Kudinov, V.V. & Bobrov, G.V. (1992). Coating by spraying. Theory, technology and equipment. Moscow : Metallurgiya. (In Russ.)
2. Shorshorov, M.X. & Kharlamov, Yu.A. (1978). Physico-chemical bases of detonation gas spraying of coatings. Moscow : Nauka. (In Russ.)
3. Bartenov, S.S., Fed'ko, Yu.P. & Grigoriev, A.I. (1982). Detonation coatings in mechanical engineering. Leningrad : Mashinostroyeniye. (In Russ.)
4. Zverev, A.I., Sharivker, S.Yu. & Astakhov, E.A. (1979). Detonation coating. Leningrad : Sudostroyeniye. (In Russ.)
5. Bobrov, G.V. & Ilyin, A.A. (2004). Application of inorganic coatings (theory, technology, equipment). Moscow : Internet Engineering. (In Russ.)
6. Ulianitsky, V., Shtertser, A., Zlobin, S. & Smurov, I. (2011). Computer-Controlled Detonation Spraying: From Process Fundamentals Toward Advanced Applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 20, 791–801. doi 10.1007/s11666-011-9649-6.
7. Kharlamov, Y.A. (1987). Detonation spraying of protective coatings. *Materials Science and Engineering*, 93, 1–37. doi 10.1016/0025-5416(87)90409-5.
8. Wolczynski, W., Senderowski, C., Fukis, B. & Panas, A.J. (2017). Solidification Mechanism of the D-Gun Sprayed Fe-Al Particles. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62 (4), 2391-2397. doi 10.1515/AMM-2017-0352.
9. Shtertser, A.A., Batraev, I.S., Ulianitsky, V.Yu., Kuchumova, I.D., Bulina, N.V., Ukhina, A.V., Bokhonov, B.B., Dudina, D.V., Trinh, P.V. & Phuong, D.D. (2020). Detonation spraying of Ti-Cu mixtures in different atmospheres: Carbon, nitrogen and oxygen uptake by the powders. *Surfaces and Interfaces*, 21, 100676. doi 10.1016/j.surf.2020.100676.
10. Buitkenov, D.B., Rakhadilov, B.K., Sagdoldina, Zh.B. & Maulet, M. (2020). Obtained of powder coatings by detonation spraying. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 4 (3), 6. doi 10.29317/ejpfm.2020040306.
11. Rogachev, A.S. & Mukasyan, A.S. (2014). Combustion for material synthesis. London : CRC Press. doi 10.1201/b17842.
12. Levashov, E. A., Mukasyan, A. S., Rogachev, A. S., & Shtansky, D. V. (2017). Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings. *International Materials Reviews*, 62 (4), 203-239. doi 10.1080/09506608.2016.1243291.
13. Itin, V.I. & Nayborodenko, Yu.S. (1989). High-temperature synthesis of intermetallic compounds. Tomsk : Tomsk State University.
14. Khina, B.B. & Formanek, B. (2008). On the physi-

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 12 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

cochemical mechanism of the influence of preliminary mechanical activation on self-propagating high-temperature synthesis. *Solid State Phenomena*, 138, 159–164. doi 10.4028/www.scientific.net/SSP.138.159.

15. Aruna, S.T. & Mukasyan A.S. (2008). Combustion synthesis and nanomaterials. *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 12 (3–4), 44–50. doi 10.1016/j.cossms.2008.12.002.

16. Mukasyan, A.S., Khina, B.B., Reeves, R.V. & Son, S.F. (2011). Mechanical activation and gasless explosion: Nanostructural aspects. *Chemical Engineering Journal*, 174 (2-3), 677–686. doi 10.1016/j.cej.2011.09.028.

17. 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 (3), 22–48. doi 10.5923/j.nn.20120203.01.

18. Loginova, M.V., Sobachkin, A.V., Sitnikov, A.A., Yakovlev, V.I., Myasnikov, A.Yu. & Filimonov, V.Yu. (2024). Phase State of Reaction Products of a Mechanically Activated Ti + Al Mixture Synthesized during Gas Mixture Detonation. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 60, 641–650. doi 10.1134/S0010508224050095.

19. Filimonov, V.Yu., Korchagin, M.A., Diitenberg, I.A., Tyumentsev, A.N. & Lyakhov, N.Z. (2013). High temperature synthesis of single-phase Ti₃Al intermetallic compound in mechanically activated powder mixture. *Powder Technology*, 235, 606-613. doi 10.1016/j.powtec.2012.11.022

20. Gorelik, S.S., Rastorguev, L.N. & Skakov, Yu.A. (1970). Radiographic and electron-optical analysis. Moscow : Metallurgiya. (In Russ.)

21. Ed. by Lyakishev, N.P. (1996). Diagrams of the state of double metal systems. Vol. 1. Moscow : Mashinostroyeniye. (In Russ.)

Information about the authors

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

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

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.

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.

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. Z. Negodyaev – Researcher at the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the Polzunov Altai State Technical University.

A. A. Roznyj – postgraduate student at the Polzunov Altai State Technical University.