



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 544.3-971.2

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.025

EDN: HSJSAS

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА РЕАКЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ ВОЛЬФРАМ – ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН С ДОБАВКАМИ СВС-СМЕСЕЙ (NI+AL, TI+2B)

Степан Арутюнович Серопян ¹, Иван Владимирович Сайков ²,
Александр Викторович Смирнов ³, Гульназ Рафиковна Сайкова ⁴,
Евгений Владимирович Петров ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН, Черноголовка, Россия

¹ stepan.seropyan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3714-3983>

² revan.84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1473-2854>

³ smirnov_av@ism.ac.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3350-4440>

⁴ gulnaz-84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6542-7123>

⁵ petrov@ism.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7070-0972>

Аннотация. Исследовано влияние механической активации в шаровой мельнице на свойства реакционных материалов на основе системы вольфрам-политетрафторэтилен (W+ПТФЭ) с добавками СВС смесей (Ni+Al) и (Ti+2B). Исследованы параметры воспламенения и горения составов на основе микронного (μW) и наноразмерного (nW) порошков вольфрама. Показано, что механическая активация приводит к значительно повышению реакционной способности всех исследуемых составов. Температура воспламенения активированных составов снижается на 250–500 °C, в то время как скорость воспламенения возрастает на порядки, достигая значений 1300–2200 °C/с. Установлено, что механическая активация сокращает время индукции до начала самоподдерживающейся реакции, что приводит к снижению начальной температуры воспламенения образца на 280 °C. Методами рентгенофазового анализа установлено, что механическая активация существенно влияет на фазовый состав продуктов горения. В составах $76\mu W+19ПТФЭ+5(Ni+Al)$ и $76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al)$ образуется два двойных карбида (Ni_2W_4C , $Ni_{10}W_3C_3$), причем их массовая доля сопоставима с долей карбидов вольфрама (W_2C , WC). В составе $76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B)$ зафиксировано образование кубического WC вместо гексагонального. Исследуемые составы демонстрируют высокую полноту синтеза (43–45 мас. %), скорость и температуру горения, что делает их перспективными в качестве реакционных материалов. Полученные результаты подчеркивают важную роль высокоэнергетических добавок, размера частиц и способа приготовления составов в контроле путей реакции и достижения необходимых энергетических свойств материалов.

Ключевые слова: W+ПТФЭ, нано-вольфрам, реакционные материалы, механическая активация, горение, воспламенение.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00787, <https://rscf.ru/project/24-29-00787/>). Исследование выполнено с использованием оборудования РЦКП ИСМАН.

Для цитирования: Влияние механической активации на реакционную способность системы вольфрам – политетрафторэтилен с добавками СВС-смесей (Ni+Al, Ti+2B) / С. А. Серопян [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 177–185. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.025. EDN: <https://elibrary.ru/HSJSAS>.

Original article

EFFECT OF MECHANICAL ACTIVATION ON REACTIVITY OF TUNGSTEN – POLYTETRAFLUOROETHYLENE SYSTEM WITH ADDITIVES OF SHS MIXTURES (NI+AL, TI+2B)

Stepan A. Seropyan ¹, Ivan V. Saikov ², Alexandr V. Smirnov ³,
Gulnaz R. Saikova ⁴, Evgenii V. Petrov ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences (ISMAN), Chernogolovka, Moscow Region, Russia

¹ stepan.seropyan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3714-3983>

² revan.84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1473-2854>

³ smirnov_av@ism.ac.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3350-4440>

⁴ gulnaz-84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6542-7123>

⁵ petrov@ism.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7070-0972>

© Серопян С. А., Сайков И. В., Смирнов А. В., Сайкова Г. Р., Петров Е. В., 2026

Abstract. The Effect of Mechanical Activation on the Properties of Tungsten-Polytetrafluoroethylene (W+PTFE) Based Reactive Materials with SHS Additives. The influence of mechanical activation (MA) in a ball mill on the properties of reactive materials based on the tungsten-polytetrafluoroethylene (W+PTFE) system with additions of SHS mixtures - nickel and aluminum (Ni+Al) and titanium with boron (Ti+2B) - was investigated. Compositions based on both micron-sized (μ W) and nano-sized (nW) tungsten powders were synthesized and characterized. It was shown that mechanical activation leads to a significant increase in the reactivity of all studied compositions. The ignition temperature of the activated compositions decreases by 250-500 °C, while the ignition rate increases by orders of magnitude, reaching values of 1300-2200 °C/s. It was established that MA reduces the induction time before the onset of the self-sustaining reaction, leading to a decrease in the initial ignition temperature of the sample by 280 °C. X-ray phase analysis methods revealed that mechanical activation significantly affects the phase composition of the combustion products. In the compositions 76 μ W+19PTFE+5(Ni+Al) and 76nW+19PTFE+5(Ni+Al), two double carbides ($\text{Ni}_2\text{W}_4\text{C}$, $\text{Ni}_{10}\text{W}_3\text{C}_3$) are formed, with their mass fraction being comparable to the fraction of tungsten carbides (W:C, WC). In the composition 76nW+19PTFE+5(Ti+2B), the formation of cubic WC instead of the hexagonal phase was recorded. The studied compositions demonstrate high synthesis completeness (43-45 wt. %), as well as high combustion rate and temperature, making them promising as reactive materials. The obtained results underscore the important role of high-energy additives, particle size, and preparation method in controlling reaction pathways and achieving the required energy properties of the materials.

Keywords: W+PTFE, nano-tungsten, reactive materials, mechanical activation, combustion, ignition.

Acknowledgements: This research was performed by using the set of modern scientific instruments available for multiple accesses at the ISMAN Center of Shared Services. This work was supported by Russian Science Foundation No. 24-29-00787, <https://rscf.ru/project/24-29-00787/>.

For citation: Seropyan, S. A., Saikov, I. V., Smirnov, A. V., Saikova, G. R. & Petrov, E. V. (2026). Effect of mechanical activation on the reactivity of the tungsten - polytetrafluoroethylene system with additives of SHS mixtures (Ni+Al, Ti+2B). *Polzunovskiy vestnik*, (2), 177-185. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.025. EDN: <https://elibrary.ru/HSJSAS>.

ВВЕДЕНИЕ

Реакционные материалы (РМ) представляют собой многокомпонентные порошковые составы, способные к интенсивным экзотермическим реакциям при термическом или ударном воздействии [1, 2]. Процесс горения данных составов, в результате которого образуются конденсированные фазы и газы, сопровождается выделением значительной энергии, что открывает широкие возможности для их применения [3, 4]. Помимо специальных областей, РМ перспективны для технологических операций, таких как резка и перфорация конструкционных материалов, где используется сфокусированная струя продуктов горения [5]. РМ включают интерметаллические смеси [6, 7], термиты [8], смеси металла и полимера [9–12]. Наиболее распространенной основой для них служат металло-полимерные смеси [13], в частности, комбинации активных металлов (алюминия [13], титана [14], магния [15]) с политетрафторэтиленом (ПТФЭ). Смесь Al+ПТФЭ является одной из самых изученных и характеризуется высоким энерговыделением (до 8,53 МДж/кг), значительным выходом газообразных продуктов и чувствительностью к высокоскоростному нагружению [13]. Однако ключевым недостатком такой системы остается ее низкая плотность и прочность [16]. Для решения этой проблемы в нее вводят высокоплотные компоненты, такие как вольфрам [17], оксид молибдена (MoO_3) [18], тантал [19] никель [20] и др. [21]. В работах [13, 20, 22] показано, что несмотря на успешное упрочнение структуры, это зачастую приводит к снижению общей энергетики состава и его чувствительности к внешним воздействиям. Повышение чувствительности к ударно-волновому воздействию можно добиться за счет применения высокодисперсных исходных порошков [10, 23].

В работах [24, 25, 26] свою эффективность по получению и исследованию новых реакционных материалов показал подход, при котором в качестве основы для них используется высокоплотная смесь W+ПТФЭ, к которой добавляются активные металлы. Помимо активных металлов [14–16] существует до-

статочное количество компонентов, способных повысить температуру, скорость горения и чувствительность к ударно-волновому нагружению РМ, могут быть использованы: гидриды [27], оксиды металлов [28], а также смеси с высокой реакционной способностью Ni+Al [17], Ti+2B и др. [29]. Помимо выбора компонентного состава такого материала необходимо подобрать их оптимальное соотношение, при котором удастся сохранить высокую реакционную способность и плотность материала. Другим эффективным методом управления свойствами РМ является механическая активация (МА) в шаровых мельницах, которая способствует повышению реакционной способности порошковых смесей за счет увеличения площади контакта между компонентами [30, 31]. Таким образом, поиск оптимальных составов и методов их приготовления, позволяющих совместить высокую плотность, прочность и энерговыделение, остается актуальной задачей.

В данной работе исследуется влияние механической активации на параметры горения, воспламенения и фазообразования в системе W+ПТФЭ на основе микро- и нано- порошков вольфрама с добавками смесей Ti+2B и Ni+Al.

МЕТОДЫ

В качестве основы для реакционного материала выбрана система W+ПТФЭ (с массовым соотношением 80:20) [26]. Выбор оптимального содержания добавок проводился с помощью термодинамических расчетов в программе ISMAN-Thermo [32]. Изготавливалось 4 состава системы W+ПТФЭ на основе микродисперсного μ W и нанодисперсного nW вольфрама. В таблице 1 представлено соотношение компонентов и соответствующие им теоретическая максимальная плотность (ТМП), фактическая плотность. Фактическая плотность образцов измерялась методом гидростатического взвешивания. Относительная плотность рассчитывалась как отношение фактической к теоретической максимальной плотности [24].

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА РЕАКЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ ВОЛЬФРАМ – ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН С ДОБАВКАМИ СВС-СМЕСЕЙ (Ni+Al, Ti+2B)

Таблица 1 – Исследуемые составы / Table 1 – Investigated compositions

№	Массовая доля, (масс. %)				ТМП, (г/см ³)	Фактическая плотность, (г/см ³)	Относительная плотность
	W	ПТФЭ	Ni+Al	Ti+2B			
0	80	20	–	–	7,55	7,25	0,96-0,98
1	76	19	5	–	7,38	7,23	
2	76	19	–	5	7,14	7,00	

В качестве исходных компонентов использовались порошки микродисперсного вольфрама (марки ПВ2, размер частиц < 50 мкм), нанодисперсного вольфрама (размер частиц < 500 нм), политетрафторэтилен (ПТФЭ марки Флуралит, размер частиц < 50 мкм), алюминия (марки АСД-1, размер частиц < 50 мкм), никеля (марки ПНК-УТ-3, размер частиц < 50 мкм), титана (марки ПТС-1 размер частиц < 50 мкм) и бора (марки Б-99А, размер частиц < 30 мкм). Механическая активация (МА) порошков проводилась в планетарной шаровой мельнице АГО-2 в течение 2 минут, со скоростью вращения барабанов 2200 об/мин при соотношении массы порошка к размольным шарам 1:10. Сухое смешивание порошков проводилось в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 180 минут, со скоростью вращения барабана 30 об/мин при соотношении массы порошка к размольным шарам 1:5. Составы, полученные методом сухого смешивания, обозначены как «до МА»; составы, полученные методом механической активации, – как «после МА».

Температуры воспламенения исследуемых составов определялись на образцах диаметром 3 мм и высотой 1,4–1,7 мм путем инициирования в них теплового взрыва. Образцы помещались в тигле из нитрида бора непосредственно на спай термопары ВР5/20 толщиной 50 мкм. Тигель вместе с образцом и термопарой размещались на графитовом нагревателе между молибденовыми токоподводами. Скорость нагрева образцов составляла 60–80 °С/с. Эксперименты проводились в реакторе объемом 1 л с системой поддержания инертной атмосферы, которая формировалась путем откачки воздуха и закачки аргона (чистота ≥ 99,998 %) [26, 33]. Температуры воспламенения образцов устанавливались после обработки термограмм процесса нагрева.

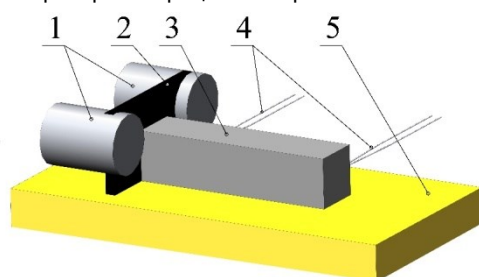


Рисунок 1 – Схема измерения скорости горения:
1) токоподводы; 2) графитовый нагреватель; 3) образец;
4) термопары ВР5/20; 5) огнеупорная подложка

Figure 1 – The scheme of measuring the combustion velocity: 1) current leads, 2) graphite heater, 3) sample, 4) WR5/20 thermocouples, 5) refractory substrate

Для измерения скорости горения изготавливались образцы в форме параллелепипеда с размерами 5×5×20 мм и относительной плотностью 0,96–0,98. На боковой поверхности образцов просверливались два глухих отверстия диаметром 0,3 мм и глубиной 2 мм под термопары ВР5/20 диаметром 100 мкм, рас-

стояние между отверстиями 14–15 мм (рис. 1, а). Образец располагался на огнеупорной подложке вплотную к графитовому нагревателю для его локального нагрева с бокового торца (рис. 1, б). Измерение скорости горения проводилось в реакторе объемом 20 л с системой поддержания инертной атмосферы, описанной выше. Сигналы с термопар через аналого-цифровой преобразователь QMBox (R-Technology, Moscow, Russia) записывались с частотой 250 Гц. Рентгенофазовый анализ (РФА) продуктов синтеза проводился с использованием ДРОН-3М. Образцы сканировались в диапазоне от 20 ° до 80 ° (2θ) с шагом 0,02 °. Количественный анализ продуктов синтеза проводился методом Ритвельда.

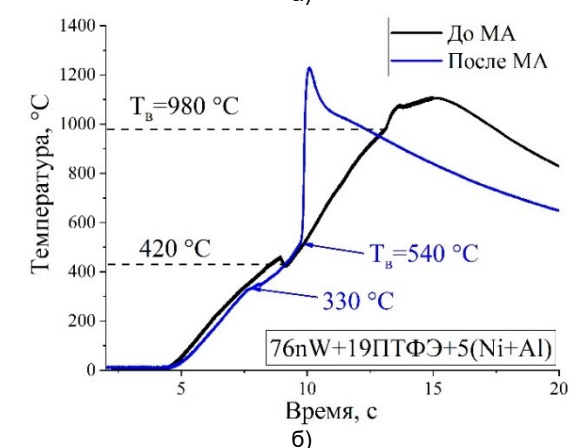
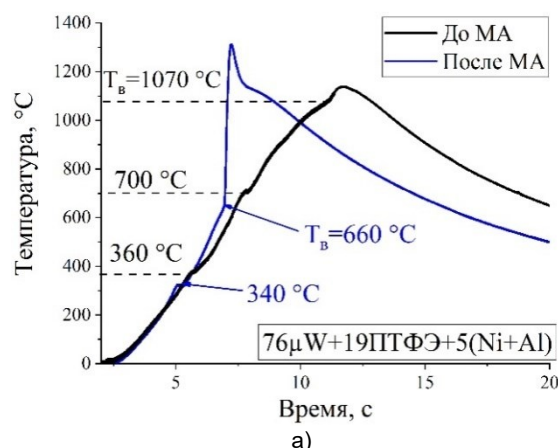


Рисунок 2 – Термограммы нагрева образцов до и после МА: а) 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al); б) 76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al)

Figure 2 – Thermograms of heating samples before and after MA: а) 76μW+19PTFE+5(Ni+Al), б) 76nW+19PTFE+5(Ni+Al)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены термодинамические расчеты в системе (1-x)(80W+20ПТФЭ)+xY, где Y – Ni+Al и Ti+2B. Рас-

четные адиабатические температуры и образующиеся продукты горения выбранных составов представлены в таблице 2 (приведены основные продукты горения). Максимальная адиабатическая температура горения ($T_{ад}$) соответствует составу № 2 и равна 2563 °C при высокой доле конденсированных продуктов.

На рисунке 2 представлены термограммы нагрева составов $76\mu W+19\text{PTFE}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ и $76\text{nW}+19\text{PTFE}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ до и после МА. Механическая активация обоих составов привела к значительному снижению температуры и повышению скорости воспламенения. Для состава $76\mu W+19\text{PTFE}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ температура воспламенения

снизилась с 1070 до 660 °C, а скорость возросла со 100 до 2200 °C/c (рис. 2, а). Для состава $76\text{nW}+19\text{PTFE}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ температура воспламенения снизилась с 980 до 540 °C, а скорость возросла со 180 до 2100 °C/c (рис. 2, б). Данный эффект объясняется тем, что в отличие от сухого смешивания (до МА), механическая активация приводит к формированию композитных частиц с развитой площадью контакта между компонентами. Это, в свою очередь, снижает энергию активации, что и обуславливает снижение температуры и резкое повышение скорости воспламенения.

Таблица 2 – Расчетная адиабатическая температура горения и доля газовых и конденсированных продуктов в системе $(1-x)(80W+20\text{PTFE})+xY$

Table 2 – Calculated adiabatic combustion temperature and the fraction of gaseous and condensed products in the system $(1-x)(80W+20\text{PTFE})+xY$

№	Составы, масс. %	$T_{ад}$, °C	Газовые продукты, (г/см ³)	Конденсированные продукты, масс. %
0	80W+20PTFE	2112	3,9 (CF ₂), 1,0 (CF ₃), 50,1 (CF ₄), 3,0 (C ₂ F ₂), 7,7 (WF ₅), 23,2 (WF ₆)	10,2 (C)
1	76W+19PTFE+5(Ni+Al)	2255	9,1 (WF ₄), 12,2 (WF ₅), 4,3 (WF ₆), 5,5 (NiF ₂), 4,9 (AlF ₃)	60,6 (W ₂ C), 2,5 (C)
2	76W+19PTFE+5(Ti+2B)	2563	4,5 (TiF ₃), 3,6 (TiF ₄), 15,1 (WF ₄), 12,1 (WF ₅), 1,8 (WF ₆), 1,0 (C ₂ F ₂)	58,0 (W ₂ C), 2,0 (C)

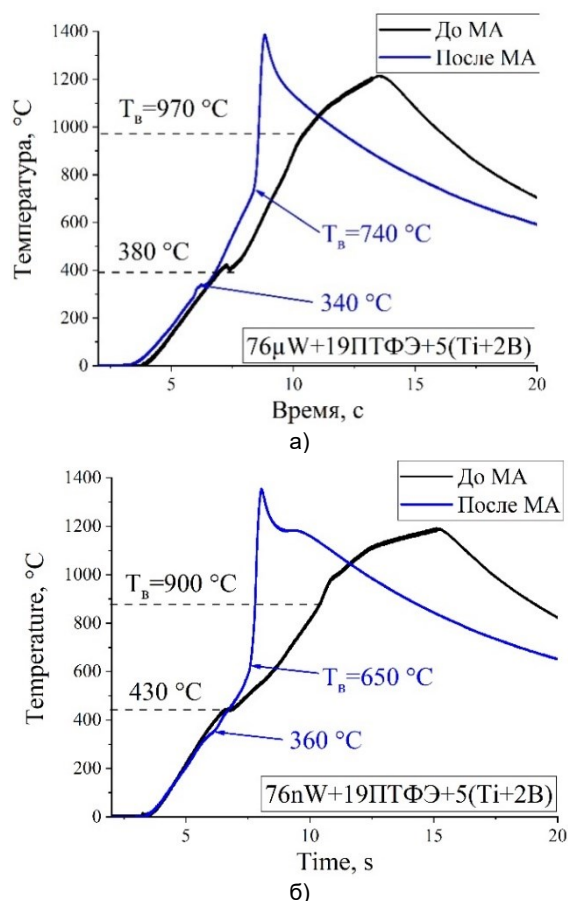


Рисунок 3 – Термограммы нагрева образцов до и после МА: а) $76\mu W+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$; б) $76\text{nW}+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$

Figure 3 – Thermograms of heating samples before and after MA: а) $76\mu W+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$, б) $76\text{nW}+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$

На рисунке 3 представлены термограммы нагрева составов $76\mu W+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ и $76\text{nW}+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ до и после МА. Механическая активация обоих составов привела к значительному снижению температуры и повышению скорости воспламенения. Для состава $76\mu W+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ температура воспламенения снизилась с 970 до 740 °C, а скорость возросла со 100 до 1300 °C/c (рис. 3, а). Для состава $76\text{nW}+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ температура воспламенения снизилась с 900 до 650 °C, а скорость возросла со 210 до 1600 °C/c (рис. 3, б). Снижение энергии активации и повышение скорости воспламенения после механической активации обусловлено факторами, описанными выше для состава $76W+19\text{PTFE}+5(\text{Ni}+\text{Al})$. Рост температуры свыше 1000 °C продолжается за счет нагревательного элемента.

МА состава $76\mu W+19\text{PTFE}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ сократила время нагрева для инициирования горения и, как следствие, снизила начальную температуру образца с 330 до 300 °C. Снижение температуры горения с 1220 до 1030 °C связано с интенсивным газовыделением во фронте волны горения (рис. 4, а). Важно отметить, что из-за сокращения времени прогрева длина синтезированного участка образца после МА осталась на прежнем уровне и составила около 5 мм. Аналогичный эффект МА наблюдался и для состава $76\text{nW}+19\text{PTFE}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ – время нагрева сократилось, а температура горения снизилась с 1340 до 1080 °C (рисунок 4, б). Однако в данном случае интенсивное газовыделение оказало решающее влияние на полноту сгорания. До МА образец сгорал полностью, а после МА газовыделение препятствовало полному сгоранию.

МА состава $76\mu W+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ позволила реализовать синтез в начальной части образца, температура горения составила 1050 °C, тогда как состав до механической активации разогревался от нагревательного элемента до 500 °C (рисунок 5, а). Длина синтезированных частей образцов до и после МА составляла около 5 мм, но до МА обусловлена воздействием нагревательного элемента. МА состава $76\text{nW}+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ сократила время нагрева для инициирования самоподдерживающейся реакции, тем самым снизив начальную

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА РЕАКЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ ВОЛЬФРАМ – ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН С ДОБАВКАМИ СВС-СМЕСЕЙ (Ni+Al, Ti+2B)

температуру образца с 310 до 130 °С, а температура горения возросла с 1240 до 1360 °С (рисунок 5, б). МА позволила реализовать самоподдерживающийся син-

тез во всем образце, тогда как без нее сгорало около 8 мм образца.

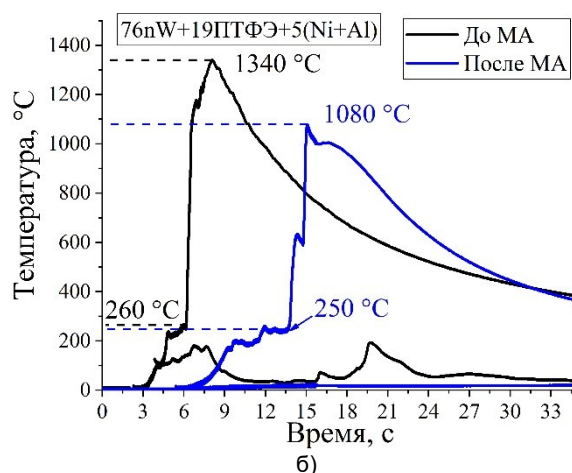
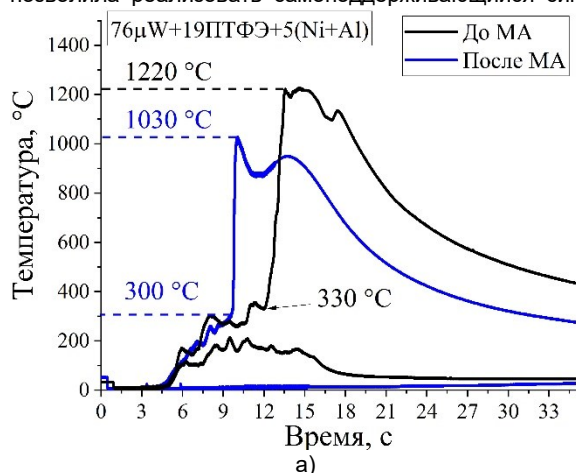


Рисунок 4 – Термограммы горения образцов 76W+19ПТФЭ+5(Ni+Al) до и после МА: а) на основе μW; б) на основе nW

Figure 4 – Thermograms combustion samples 76W+19PTFE+5(Ni+Al) before and after MA: a) based on μW, b) based on nW

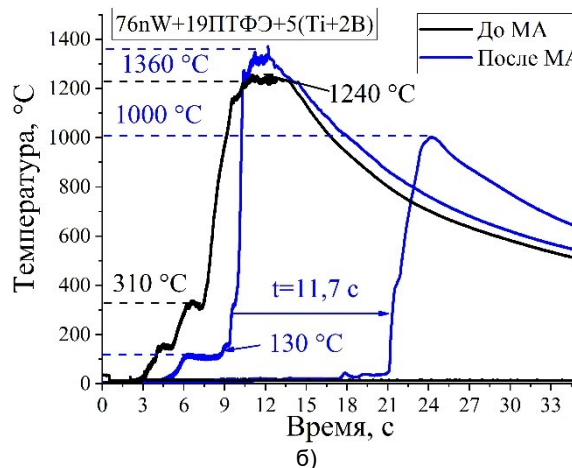
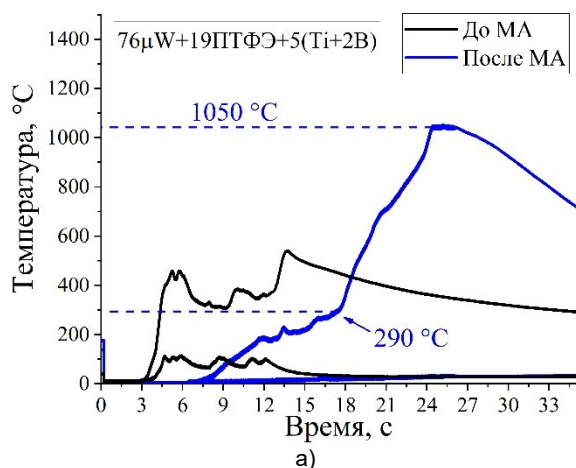


Рисунок 5 – Термограммы горения образцов 76W+19ПТФЭ+5(Ti+2B) до и после МА: а) на основе μW; б) на основе nW

Figure 5 – Thermograms combustion samples 76W+19PTFE+5(Ti+2B) before and after MA: a) based on μW, b) based on nW

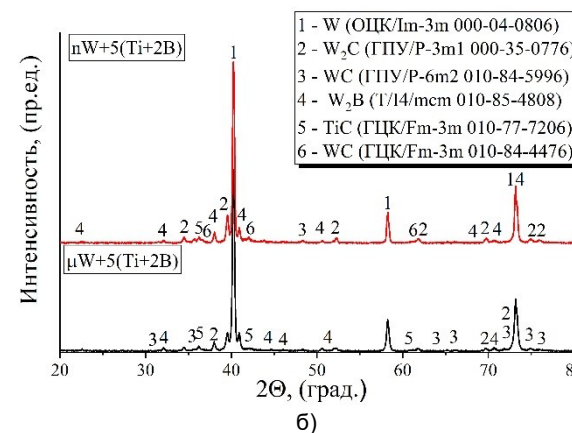
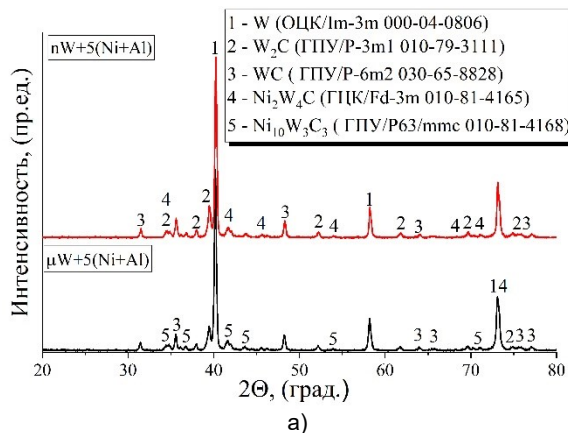


Рисунок 6 – Дифрактограммы продуктов синтеза: а) 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al); б) 76μW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B)

Figure 6 – X-ray diffractograms of the synthesis products: а) 76μW+19PTFE+5(Ni+Al) and 76nW+19PTFE+5(Ni+Al), б) 76μW+19PTFE+5(Ti+2B) and 76nW+19PTFE+5(Ti+2B)

На рисунке 6 представлены дифрактограммы продуктов горения составов $76\mu\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$, $76\text{nW}+\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$, $76\mu\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ и $76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ после МА. В продуктах горения состава $76\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ обнаружены двойные карбиды ($\text{Ni}_2\text{W}_4\text{C}$ и $\text{Ni}_{10}\text{W}_3\text{C}_3$). Интенсивность пиков продуктов синтеза составов на основе μW выше, чем составов на основе nW , что обусловлено большей длительностью нагрева образца до момента инициирования самоподдерживающейся реакции. Отсутствие свободного алюминия на дифрактограммах связано с его малым количеством, которое не обнаруживается прибором.

Таблица 3 – Количественный анализ продуктов синтеза составов $76\mu\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ и $76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ до и после МА

Table 3 – Quantitative analysis of the synthesis products in the $76\mu\text{W}+19\text{PTFE}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ and $76\text{nW}+19\text{PTFE}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ systems before and after mechanical activation

Продукты	Составы			
	До МА	После МА	До МА	После МА
	$76\mu\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$, мас. %	$76\mu\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$, мас. %	$76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$, мас. %	$76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$, мас. %
W	35	65,7	52	57,3
W_2C	11	11,1	20	13,9
WC	41	9,2	17	10,8
$\text{Ni}_2\text{W}_4\text{C}$	–	5,8	11	7,3
$\text{Ni}_{10}\text{W}_3\text{C}_3$	9	8,2	–	10,7
AlF_3	4	–	–	–

В таблице 4 приведен количественный анализ продуктов синтеза составов $76\mu\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ и $76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ до и после МА. Для состава $76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ после МА наблюдается повышение глубины превращения, несмотря на сокращение времени прогрева. До МА составов в продуктах синтеза преобладали W_2C (15–27 мас. %), W_2B (9–12 мас. %) и Ti_2C (2–7 мас. %), а после МА содержание продуктов синтеза становилось равномерным W_2C (8–14 мас. %), WC (0,5–1,5 мас. %) W_2B (7,9–8,3 мас. %) и TiC (12–16 мас. %). После МА составов

В таблице 3 приведен количественный анализ продуктов синтеза составов $76\mu\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ и $76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ до и после МА. Наибольшая глубина превращения, о чем свидетельствует наименьшее количество непрореагировавшего вольфрама, была достигнута в составах до МА. Этот факт обусловлен длительностью прогрева данных состав до реализации синтеза. Проведение МА также оказало значительное влияние на фазовый состав продуктов. До активации в продуктах синтеза преобладали карбиды вольфрама W_2C (11–20 мас. %) и WC (17–41 мас. %). После МА состав продуктов стал более сбалансированным: наблюдалось равномерное содержание фаз W_2C (11–14 мас. %), $\text{Ni}_2\text{W}_4\text{C}$ (6–7 мас. %) и $\text{Ni}_{10}\text{W}_3\text{C}_3$ (8–11 мас. %).

формируются композитные частицы с большей площадью контакта, чем до активации. В процессе нагрева образуется углерод, который взаимодействует с титаном вместо вольфрама из-за их большего сродства [34]. Кроме того, в составе $76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ после МА наблюдается образование метастабильного кубического карбида вольфрама (WC) вместо более устойчивого гексагонального (WC), что обусловлено изменением кинетики реакции [35].

Таблица 4 – Количественный анализ продуктов синтеза составов $76\mu\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ и $76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ до и после МА

Table 4 – Quantitative analysis of the synthesis products in the $76\mu\text{W}+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ and $76\text{nW}+19\text{PTFE}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ systems before and after mechanical activation

Продукты	Составы			
	До МА	После МА	До МА	После МА
	$76\mu\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$, мас. %	$76\mu\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$, мас. %	$76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$, мас. %	$76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$, мас. %
W	45	67,0	67	57,3
W_2C	27	8,1	15	13,7
WC	7	0,5	2	1,5+7,4
W_2B	12	7,9	9	8,3
TiC	–	16,5	–	11,8
Ti_2C	9	–	7	–

ВЫВОДЫ

1. Термодинамические расчеты, а также экспериментальные исследования параметров воспламенения и горения подтвердили принципиальную возможность реализации СВС в реакционных материалах на основе системы W-ПТФЭ с добавками Ni+Al и Ti+2B. Механическая активация является эффективным методом модификации данных систем, позволяющим целенаправленно изменять их свойства.

2. Установлено, что замена μW на nW в системах W+ПТФЭ+(Ni+Al), W+ПТФЭ+(Ti+2B) снижает по-

терю летучих продуктов разложения ПТФЭ благодаря повышенной сорбционной способности наночастиц, что увеличивает продолжительность контакта между реагирующими компонентами и способствует более полному протеканию реакций.

3. Проведение механической активации исследуемых составов приводит к значительному повышению реакционной способности. Температура воспламенения снижается на 250–500 °C, а скорость воспламенения повышается на порядки (со 100–200 °C/с до 1300–2200 °C/с). Данные эффекты обусловлены

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА РЕАКЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ ВОЛЬФРАМ – ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН С ДОБАВКАМИ СВС-СМЕСЕЙ (NI+Al, TI+2B)

формированием композитных частиц с развитой площадью контакта между компонентами и снижением энергии активации процесса.

4. Механическая активация оказывает существенное влияние на фазообразование, повышая полноту синтеза. В составах $76\mu\text{W}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ и $76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ni}+\text{Al})$ образуются двойные карбиды $\text{Ni}_2\text{W}_4\text{C}$ и $\text{Ni}_{10}\text{W}_3\text{C}_3$, содержание которых является соизмеримым с другими основными продуктами реакции (W_2C , WC). В составе $76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$ образуется кубический WC вместо гексагонального.

5. Наиболее перспективным является состав $76\text{nW}+19\text{ПТФЭ}+5(\text{Ti}+2\text{B})$, который после механической активации сочетает высокую скорость горения, значительную температуру и полноту протекания реакции, что делает его предпочтительными для дальнейшей апробации в условиях ударно-волнового нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang H. Characterization of the Dynamic Response and Constitutive Behavior of PTFE/Al/W Reactive Materials // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2020. T. 45, C. 788–797. Doi: 10.1002/prep.201900334.
2. A Study on the Mechanical Properties and Impact-Induced Initiation Characteristics of Brittle PTFE/Al/W Reactive Materials / C. Ge [и др.] // *Materials*. 2017. T. 10, C. 452. Doi: 10.3390/ma10050452.
3. The Effect of Crystallinity on Compressive Properties of Al-PTFE / B. Feng [и др.] // *Polymers*. 2016. T. 8, C. 356. Doi: 10.3390/polym8100356.
4. Sensitivity of Al-PTFE upon Low-Speed Impact / B. Feng [и др.] // *Journal of Materials Design*. 2016. T. 108, C. 411–417. Doi: 10.1016/j.matdes.2016.06.125.
5. Committee on Advanced Energetic Materials and Manufacturing Technologies, National Research Council. *Advanced Energetic Materials*, National Academies Press: Washington, 2004, p. 1–23.
6. Highly Reactive Metastable Intermixed Composites (MICs): Preparation and Characterization / W. He [и др.] // *Advanced Materials*. 2018. T. 30, C. 1706293. Doi: 10.1002/adma.201706293.
7. Study on the Impact-Induced Energy Release Characteristics of $\text{Zr}_{68.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{12}\text{Al}_{7.5}$ Amorphous Alloy / J. Tu [и др.] // *Materials*. 2021. T. 14, C. 1447. Doi: 10.3390/ma14061447.
8. Nanoenergetics as Pressure Generator for Nontoxic Impact Primers: Comparison of $\text{Al}/\text{Bi}_2\text{O}_3$, Al/CuO , Al/MoO_3 Nanothermites and Al/PTFE / L. Glavier [и др.] // *Combustion and Flame*. 2021. T. 162, C. 1813–1820. Doi: 10.3390/ma14061447.
9. Investigation on Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites with Different Al Particle Size / J.X. Wu [и др.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. T. 2018, C. 1–10. Doi: 10.1155/2018/2767563.
10. Mock W.Jr. Impact Initiation of Rods of Pressed Polytetrafluoroethylene (PTFE) and Aluminum Powders // *AIP Conference Proceedings*. 2006. T. 845, C. 1097–1100. Doi: 10.1063/1.2263514.
11. Guo J. Reaction Behavior of Polytetrafluoroethylene/Al Granular Composites Subjected to Planar Shock Wave // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2017. T. 42, C. 300–307. Doi: 10.1002/prep.201600115.
12. Hastings D.L. Reactive Structural Materials: Preparation and Characterization // *Advanced Engineering Materials*. 2017. T. 1, C. 1700631. Doi: 10.1002/adem.201700631.
13. Modified model of Al/PTFE projectile impact reaction energy release considering energy loss / C. Chen [и др.] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2020. T. 116, C. 110132. Doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110132.
14. Compressive Mechanical Properties and Shock-Induced Reaction Behavior of Zr/PTFE and Ti/PTFE Reactive Materials / Z. Zhang [и др.] // *Materials*. 2022. T. 15, C. 6524. Doi: 10.3390/ma15196524.
15. Influence of composition and microstructure on the properties of PTFE/Mg reactive materials / Z. Wu [и др.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. T. 1965, C. 12104. Doi: 10.1088/1742-6596/1965/1/012104.
16. Fabrication and characterization of the Ni–Al energetic structural material with high energy density and mechanical properties / Q. Zhou [и др.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. T. 832, C. 154894, Doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154894.
17. Investigation on reaction energy, mechanical behavior and impact insensitivity of W–PTFE–Al composites with different W percentage / L. Wang [и др.] // *Materials & Design*. 2016. T. 92, C. 397–404. Doi: 10.1016/j.matdes.2015.12.045.
18. Tao J. The effect of PTFE on the physical compatibility and mechanical performance of Al–MoO₃ mechanically activated energetic composites // *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2019. T. 42, C. 653–663. Doi: 10.1080/01932691.2019.1704774.
19. Sintering Reaction and Pyrolysis Process Analysis of Al/Ta/PTFE / J. Zhang [и др.] // *Polymers*. 2019. T. 11, C. 1469. Doi: 10.3390/polym11091469.
20. Investigation on the Thermal Behavior, Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites Enhanced by Ni Particle / J. Wu [и др.] // *Materials*. 2018. T. 11, C. 1741. Doi: 10.3390/ma11091741.
21. Quasi-static and dynamic response of explosively consolidated metal–aluminum powder mixtures / C.T. Wei [и др.] // *Acta Materialia*. 2012. T. 60, C. 1418–1432. Doi: 10.1016/j.actamat.2011.10.027.
22. Compressive Properties of PTFE/Al/Ni Composite Under Uniaxial Loading / H.X. Wang [и др.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017. T. 26, C. 2331–2336. Doi: 10.1007/s11665-017-2666-y.
23. Effects of Al and W Particle Size on Combustion Characteristics and Dynamic Response of W-PTFE-Al Composites / X. Zhang [и др.] // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2018. T. 47, C. 1723–1728. Doi: 10.1016/s1875-5372(18)30156-5.
24. Shock-wave treatment of tungsten/fluoropolymer powder compositions / M.I. Alymov [и др.] // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. T. 8, C. 340–343. Doi: 10.1134/S2075113317020022.
25. Vadchenko S.G., Ignition of Some Powder Mixtures of Metals with Teflon // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. T. 9, C. 517–522. Doi: 10.1134/S2075113318030309.
26. Energetic Materials Based on W/PTFE/Al: Thermal and Shock-Wave Initiation of Exothermic Reactions / I.V. Saikov [и др.] // *Metals*. 2021. T. 11, C. 1355. Doi: 10.3390/met11091355.
27. Effect of multi-metal-hydrides on mechanical response and impact damage characteristics of PTFE/Al/ XH_2 reactive material / J. Wu [и др.] // *Journal of Energetic Materials*. 2023. T. 41, C. 171–191. Doi: 10.1080/07370652.2021.1942330.
28. Impact Energy Release Characteristics of PTFE/Al/CuO Reactive Materials Measured by a New Energy Release Testing Device / L. Ding [и др.] // *Polymers*. 2019. T. 11, C. 149. Doi: 10.3390/polym11010149.
29. Rogachev A.S. Mechanical activation of heterogeneous exothermic reactions in powder mixtures // *Russian Chemical Reviews*. 2019. T. 88, C. 875–900. Doi: 10.1070/RCR4884.
30. Kochetov N.A. Effects of Magnesium on Initial Temperature and Mechanical Activation on Combustion Synthesis in Ti–Al–Mg System // *Materials Chemistry and Physics*. 2021. T. 257, C. 123727. Doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.123727.

31. Gaurav M. Effect of mechanical activation of high specific surface area aluminium with PTFE on composite solid propellant // *Combustion and Flame*. 2016. T. 166, C. 203–215. Doi: 10.1016/j.combustflame.2016.01.019.

32. Shiryayev A.A. Thermodynamics of SHS processes: advanced approach // *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 1995. T. 4, C. 351–362.

33. Reactive Ni–Al–Based Materials: Strength and Combustion Behavior / S.A. Seropyan [и др.] // *Metals*. 2021. T. 11, C. 949. Doi: 10.3390/met11060949.

34. Investigation of SHS Process in W–Ti–C System for Production of Tungsten Carbides WC and W₂C. Application of Carbides Mixture for Cast Iron Modification / V.A. Poluboyarov [и др.] // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2014. T. 7, C. 579–586.

35. Suetin D.V. Structural, electronic properties and stability of tungstenmono- and semi- carbides: a first principles investigation // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2009. T. 70, C. 64–71. Doi: 10.1016/j.jpcs.2008.09.004.

Информация об авторах

С. А. Серопян – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук.

И. В. Сайков – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук.

А. В. Смирнов – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук.

Г. Р. Сайкова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук.

Е. В. Петров – кандидат технических наук, ученый секретарь, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук.

REFERENCES

1. Zhang, H., Wang, H., and Ge, C. (2020). Characterization of the Dynamic Response and Constitutive Behavior of PTFE/Al/W Reactive Materials. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 45, 788–797. Doi: 10.1002/prep.201900334.

2. Ge, C., Maimaitiursun, W., Dong, Y. & Tian, C. (2017). A study on the mechanical properties and impact-induced initiation characteristics of brittle PTFE/Al/W reactive materials. *Materials*, 10(5), 452. Doi: 10.3390/ma10050452.

3. Feng, B., Fang, X., Wang, H.-X., Dong, W. & Li, Y.-C. (2016). The effect of crystallinity on compressive properties of Al-PTFE. *Polymers*, 8(10), 356. Doi: 10.3390/polym8100356.

4. Feng, B., Li, Y. C. & Wu, S.Z. (2016). Sensitivity of Al-PTFE upon low-speed impact. *Journal of Materials Design*, 108, 411–417. Doi: 10.1016/j.matdes.2016.06.125.

5. Committee on Advanced Energetic Materials and Manufacturing Technologies, National Research Council. (2004). *Advanced energetic materials*. National Academies Press.

6. He, W., Liu, P.J., He, G.Q., Gozin, M. & Yan, Q.L. (2018). Highly reactive metastable intermixed composites

(MICs): Preparation and characterization. *Advanced Materials*, 30(41), 1706293. Doi: 10.1002/adma.201706293.

7. Tu, J., Qiao, L., Shan, Y., Xin, C. & Liu, J. (2021). Study on the impact-induced energy release characteristics of Zr_{68.5}Cu₁₂Ni₁₂Al_{7.5} amorphous alloy. *Materials*, 14(6), 1447. Doi: 10.3390/ma14061447.

8. Glavier, L., Taton, G., Ducéré, J., Baijot, V., Pinon, S., Calais, T., Esteve, A., Rouhani, M.D. & Rossi, C. (2015). Nanoenergetics as pressure generator for nontoxic impact primers: Comparison of Al/Bi₂O₃, Al/CuO, Al/MoO₃ nanothermites and Al/PTFE. *Combustion and Flame*, 162(5), 1813–1820. doi 10.1016/j.combustflame.2014.12.002.

9. Wu, J.-X., Fang, X., Gao, Z.-R., Wang, H.-X., Huang, J.-Y., Wu, S.-Z. & Li, Y.-C. (2018). Investigation on mechanical properties and reaction characteristics of Al-PTFE composites with different Al particle size. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1–10. Doi: 10.1155/2018/2767563.

10. Mock, W.Jr. & Holt, W.H. (2006). Impact initiation of rods of pressed polytetrafluoroethylene (PTFE) and aluminum powders. *AIP Conference Proceedings*, 845(1), 1097–1100. Doi: 10.1063/1.2263514.

11. Guo, J., Zhang, Q.M. & Zhang, L.S. (2017). Reaction behavior of polytetrafluoroethylene/Al granular composites subjected to planar shock wave. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 42(3), 300–307. Doi: 10.1002/prep.201600115.

12. Hastings, D.L. & Dreizin, E.L. (2017). Reactive structural materials: Preparation and characterization. *Advanced Engineering Materials*, 1, 1700631. Doi: 10.1002/adem.201700631.

13. Chen, C., Tang, E., Zhu, W., Han, Y. & Gao, Q. (2020). Modified model of Al/PTFE projectile impact reaction energy release considering energy loss. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 116, 110132. Doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110132.

14. Zhang, Z., He, Y., He, Y., Guo, L., Ge, C., Wang, H., Ma, Y., Gao, H., Tian, W. & Wang, C. (2022). Compressive mechanical properties and shock-induced reaction behavior of Zr/PTFE and Ti/PTFE reactive materials. *Materials*, 15(19), 6524. Doi: 10.3390/ma15196524.

15. Wu, Z., Liu, J., Yunshu, G., Feng, X. & He, C. (2021). Influence of composition and microstructure on the properties of PTFE/Mg reactive materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 1965(1), 012104. Doi: 10.1088/1742-6596/1965/1/012104.

16. Zhou, Q., Hu, Q.W., Wang, B., Zhou, B.B., Chen, P.W. & Liu, R. (2020). Fabrication and characterization of the Ni-Al energetic structural material with high energy density and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 832, 154894. Doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154894.

17. Wang, L., Liu, J., Li, S. & Zhang, X. (2016). Investigation on reaction energy, mechanical behavior and impact insensitivity of W-PTFE-Al composites with different W percentage. *Materials & Design*, 92, 397–404. Doi: 10.1016/j.matdes.2015.12.045.

18. Tao, J. & Wang, X. (2019). The effect of PTFE on the physical compatibility and mechanical performance of Al-MoO₃ mechanically activated energetic composites. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42(5), 653–663. Doi: 10.1080/01932691.2019.1704774.

19. Zhang, J., Huang, J., Li, Y., Liu, Q., Yu, Z., Wu, J., Gao, Z., Wu, S., Kui, J. & Song, J. (2019). Sintering reaction and pyrolysis process analysis of Al/Ta/PTFE. *Polymers*, 11(9), 1469. Doi: 10.3390/polym11091469.

20. Wu, J., Wang, H., Fang, X., Li, Y., Mao, Y., Yang, L., Yin, Q., Wu, S., Yao, M. & Song, J. (2018). Investigation on the thermal behavior, mechanical properties and reaction characteristics of Al-PTFE composites enhanced by Ni particle. *Materials*, 11(9), 1741. Doi: 10.3390/ma11091741.

21. Wei, C.T., Vitali, E., Jiang, F., Du, S.W., Benson, D.J., Vecchio, K.S., Thadhani, N.N. & Meyers, M.A.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2026

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА РЕАКЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ ВОЛЬФРАМ – ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН С ДОБАВКАМИ СВС-СМЕСЕЙ (NI+Al, Ti+2B)

(2012). Quasi-static and dynamic response of explosively consolidated metal-aluminum powder mixtures. *Acta Materialia*, 60(3), 1418-1432. Doi: 10.1016/j.actamat.2011.10.027.

22. Wang, H.X., Li, Y.C., Feng, B., Huang, J.Y., Zhang, S. & Fang, X. (2017). Compressive properties of PTFE/Al/Ni composite under uniaxial loading. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(5), 2331-2336. Doi: 10.1007/s11665-017-2666-y.

23. Zhang, X., Liu, J., Wang, L., Li, S., Zhang, S., Lan, J. & Wang, Y. (2018). Effects of Al and W particle size on combustion characteristics and dynamic response of W-PTFE-Al composites. *Rare Metal Materials and Engineering*, 47(6), 1723-1728. Doi: 10.1016/s1875-5372(18)30156-5.

24. Alymov, M.I., Vadchenko, S.G., Saikov, I.V. & Kovalev, I.D. (2017). Shock-wave treatment of tungsten/fluoropolymer powder compositions. *Inorganic Materials: Applied Research*, 8(2), 340-343. Doi: 10.1134/S2075113317020022.

25. Vadchenko, S.G., Alymov, M.I. & Saikov, I.V. (2018). Ignition of some powder mixtures of metals with Teflon. *Inorganic Materials: Applied Research*, 9(3), 517-522. Doi: 10.1134/S2075113318030309.

26. Saikov, I.V., Seropyan, S.A., Malakhov, A.Y., Saikova, G.R., Denisov, I.V. & Petrov, E.V. (2021). Energetic Materials Based on W/PTFE/Al: Thermal and Shock-Wave Initiation of Exothermic Reactions. *Metals*, 11(9), 1355. Doi: 10.3390/met11091355.

27. Wu, J., Huang, J., Zhang, J., Li, Y., Yin, Q., Xiao, L., Liu, Q., Wu, S., and Yao, M. (2023). Effect of multi-metal-hydrides on mechanical response and impact damage characteristics of PTFE/Al/XH₂ reactive material. *Journal of Energetic Materials*. 41, 171-191. Doi: 10.1080/07370652.2021.1942330.

28. Ding, L., Zhou, J., Tang, W., Ran, X. & Hu, Y. (2019). Impact energy release characteristics of PTFE/Al/CuO reactive materials measured by a new energy release testing device. *Polymers*, 11(1), 149. Doi: 10.3390/polym11010149.

29. Rogachev, A.S. (2019). Mechanical activation of heterogeneous exothermic reactions in powder mixtures. *Russian Chemical Reviews*, 88(9), 875-900. Doi: 10.1070/RCR4884.

30. Kochetov, N.A. & Sytshev, A.E. (2021). Effects of magnesium on initial temperature and mechanical activation on combustion synthesis in Ti-Al-Mg system. *Materials Chemistry and Physics*, 257, 123727. Doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.123727.

j.matchemphys.2020.123727.

31. Gaurav, M. & Ramakrishna, P.A. (2016). Effect of mechanical activation of high specific surface area aluminium with PTFE on composite solid propellant. *Combustion and Flame*, 166, 203-215. Doi: 10.1016/j.combustflame.2016.01.019.

32. Shiryayev, A.A. (1995). Thermodynamics of SHS processes: Advanced approach. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 4(4), 351-362.

33. Seropyan, S.A., Saikov, I.V., Andreev, D.E., Saikova, G.R. & Alymov, M.I. (2021). Reactive Ni-Al-based materials: Strength and combustion behavior. *Metals*, 11(6), 949. Doi: 10.3390/met11060949.

34. Poluboyarov, V.A., Zhdanok, A.A., Korotaeva, Z.A. & Kuznetsov, V.A. (2014). Investigation of SHS process in W-Ti-C system for production of tungsten carbides WC and W₂C. Application of carbides mixture for cast iron modification. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 7, 579-586.

35. Suetin, D.V., Shein, I.R. & Ivanovskii, A.L. (2009). Structural, electronic properties and stability of tungsten mono- and semi- carbides: A first principles investigation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 70(1), 64-71. Doi: 10.1016/j.jpcs.2008.09.004.

Information about the authors

S.A. Seropyan - junior research, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences.

I.V. Saikov - Ph.D. in Engineering sciences, Leading Researcher, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences.

A.V. Smirnov - junior research, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences.

G.R. Saikova - Ph.D. in Engineering sciences, Senior Researcher, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences.

E.V. Petrov - Ph.D. in Engineering sciences, Scientific Secretary, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.