



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)

УДК 662.19

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.005



EDN: NFKCYF

МАЛОГАЗОВЫЕ НАНОТЕРМИТЫ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СИЛА ВЗРЫВА СМЕСИ Al/MoO_3 С ФТОРПОЛИМЕРОМ

Виталий Олегович Попов ¹, Виталий Николаевич Комов ²,
Валерий Викторович Малыхин ³

^{1, 2, 3} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Бийск, Россия

¹ popovo@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5079-8303>

²e-mail: witalij-komov@mail.ru

³e-mail: astro-78@mail.ru.

Аннотация. Кратко рассмотрены распространённые и наиболее изученные нанотермитные композиции различного состава и представлены результаты экспериментального сравнения относительной силы взрыва смесей нанопорошков Al/MoO_3 с фторполимером. Представлены системы, основными представителями которых являются нанотермитные композиты для пиравтоматики и микроинициаторов. Рассматривается проблема разработки безгазовых (малогазовых), быстро сгорающих пиротехнических составов на основе нанотермитов. В экспериментальной части обсуждается влияние фторполимера Ф-42Л на относительную силу взрыва пиротехнической композиции, основанной на термитной реакции между нанопорошками алюминия (горючее) и оксидом молибдена (окислитель). Было показано, что фторполимер уменьшает относительную силу взрыва нанокompозита, а определяющей химической реакцией взрывного превращения смеси $Al/MoO_3/Ф-42Л$ является реакция Al с фторполимером.

Ключевые слова: нанокompозит; нанотермит; полимерное связующее; относительная взрывная сила.

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта № 121061500029-7 при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, Бийск, Россия).

Для цитирования: Попов В. О., Комов В. Н., Малыхин В. В. Малогазовые нанотермиты и относительная сила взрыва смеси Al/MoO_3 с фторполимером // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 2. С. 31–38. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.005. EDN: <https://elibrary.ru/NFKCYF>.

Original article

SMALL-PHASE NANOTHERMITES AND THE RELATIVE EXPLOSION FORCE OF AN Al/MoO₃ MIXTURE WITH A FLUOROPOLYMER

Vitaliy O. Popov¹, Valeriy V. Malykhin², Vitaliy N. Komov³

^{1, 2, 3} Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS)

¹ popovo@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5079-8303>

² e-mail: witalij-komov@mail.ru

³ e-mail: astro-78@mail.ru.

Abstract. *The common and most studied nanothermic compositions of various compositions are briefly considered and the results of an experimental comparison of the relative explosion force of mixtures of Al/MoO₃ nanopowders with fluoropolymer are presented. Systems are presented, the main representatives of which are nanothermic composites for PIR automation and microinitiators. The problem of developing gas-free (low-gas), fast-burning pyrotechnic compositions based on nanothermites is considered. In the experimental part, the effect of the fluoropolymer F-42L on the relative explosion force of a pyrotechnic composition based on a thermite reaction between aluminum nanopowders (burning) and molybdenum oxide (oxidizer) is discussed. It was shown that the fluoropolymer reduces the relative explosion force of the nanocomposite, and the determining chemical reaction of the explosive transformation of the Al/MoO₃/F-42L mixture is the reaction of Al with the fluoropolymer.*

Keywords: *nanocomposite; nanothermite; polymeric binder; relative explosive force.*

Acknowledgements: *the work was done under the auspices of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121061500029-7) using instruments provided by the Biysk Regional Center for Shared Use of Scientific Equipment SB RAS (IPCET SB RAS, Biysk).*

For citation: Popov, V. O., Malykhin, V. V. & Komov, V. N. (2022). Small-phase Nanothermites and the Relative Explosion Force of an Al/MoO₃ Mixture with a Fluoropolymer. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 31-38. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.005. EDN: <https://elibrary.ru/NFKCYF>.

ВВЕДЕНИЕ

Высокий интерес к нанокompозитам, разрабатываемым на основе нанотермитных смесей, обусловлен уникальными взрывчатыми свойствами этих систем. Как известно, скорость горения гетерогенных смесей окислитель / топливо имеет тенденцию к увеличению по мере уменьшения размера частиц. С появлением ультрадисперсных порошков широко изучались смеси окислитель / горючее, в которых компоненты усреднены на наноуровне [1–3]: первоначальные исследования показали, что такие смеси могут увеличить скорость их горения на несколько порядков.

Литературные данные показывают, что использование наноразмерных компонентов в качестве окислителя и топлива привело к появлению нового класса энергетических материалов – метастабильных межмолекулярных композитов (metastable inter molecular composites –

MICs) [4]. Нанотермиты также относятся к этому классу [5]. Термиты представляют собой реакционноспособные смеси оксидов металлов с другим металлом [6, 7], но, в свою очередь, нанотермитами являются термитные смеси, частицы которых компонентов имеют размер до 100 нм [8–10]. Наиболее изученными являются нанотермиты на основе металлических горючих Al, B, Hf и окислителей CuO, MoO₃, WO₃, Bi₂O₃, Fe₂O₃, NiO, I₂O₅ и SnO₂ [4–11].

Достоинствами нанотермитов являются: высокая скорость горения взрывного характера, которая изменяется от сотен метров (насыпная плотность) и до метров в секунду (высокая плотность); низкая газопроизводительность (объем газов менее 0,5 л/кг); высокая восприимчивость к начальному инициирующему импульсу [12–14].

Среди ограничивающих применение нанотермитов недостатков принято считать: а) высокую чувствительность к механическим

МАЛОГАЗОВЫЕ НАНОТЕРМИТЫ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СИЛА ВЗРЫВА СМЕСИ
Al/MoO₃ С ФТОРПОЛИМЕРОМ

и электростатическим воздействиям [15–17]; б) плохую уплотняемость и низкую механическую прочность прессовок [18]; в) сильную зависимость скорости горения от дисперсных свойств порошков, количества примесей в металлическом горючем и способа изготовления образцов [19, 20]; г) изменение свойств при хранении (окисление частиц, агломерация и т.д.) [21–23]. Таким образом, переработка этих композиций требует определённых безопасных приёмов, например, смешения компонентов в объёме суспензии с удаляемой жидкостью, которая является химически инертной ко всем компонентам. Однако наиболее потенциальное применение нанотермитов включает микроэлектромеханические системы (microelectromechanical systems – MEMS) [4, 19], в частности, микровоспламенители, -двигатели, -генераторы давления и т. д.

Основные недостатки нанотермитов могут быть устранены путём включения в них связующих веществ. Авторами [12] показано влияние полимерных добавок на скорость

горения нанотермита Al/ CuO. Так, введение 2 % нитроцеллюлозы снизило скорость горения нанотермитной композиции, приблизительно на 30 %, тогда как добавка фенолформальдегидной смолы снизила скорость на 45 %. Добавление небольшого количества связующего не обеспечивает кондуктивного режима горения, что, вероятно, приводит к значительному разбросу экспериментальных скоростей. Вместе с тем в работе показали, что давление мало влияет на скорость горения чистых термитных систем, напротив, органическое связующее оказывает значительное влияние на термодинамические свойства смесей, что, вероятно, связано с изменением механизма горения с кондуктивного на конвективный, при котором влияние газообразных продуктов на распространение фронта или волны горения через поры внутри образца является определяющим. В работе [24] экспериментально исследованы различные системы термитного типа, и термодинамические характеристики некоторых термитов на основе алюминия обобщены в таблице 1.

Таблица 1 – Термодинамические характеристики некоторых термитных составов на основе Al
Table 1 - Thermodynamic characteristics of some thermite compositions based on Al

Стехиометрическая смесь	Давление, МПа	Адиабатическая температура, К	Объём газообразных продуктов, л/кг	Состав газовой фазы	Состав конденсированной фазы
CrO ₃ + 2Al	0,1	3364,28	2120	Cr, Al ₂ O ₃ , CrO	Al ₂ O ₃
	1	3534,70	212		
	10	4331,34	13,4		
	50	4699,96	1,8		
MoO ₃ + 2Al	0,1	3808,21	430	Al ₂ O, MoO, MoO ₂	Al ₂ O ₃ , Mo
	1	4358,76	15		
	10	4558,29	0		
	50	4579,01	0		

По данным таблицы 1 видно, что представленные смеси имеют высокие температуры горения, при которых давления паров металлов и их окислов достаточно высоки. Объём газообразных продуктов снижается при увеличении давления, так как основные компоненты газовой фазы частично конденсируются. При давлении выше 50 МПа объём

газовой фазы имеет незначительную величину, что позволяет говорить о нанотермитах как о малогазовых (почти безгазовых) композициях. Однако экспериментально установлено [24, 25], что при горении термитов выделяются газообразные продукты сгорания различных примесей, содержащихся в порошках исходных компонентов смесей (таблица 2).

Таблица 2 – Состав выделившихся газов при горении некоторых термитных систем

Table 2 - Composition of the gases released during the combustion of some thermite systems gorenje

Состав реакционной смеси	Газовыделение, моль газа/моль продукта	Состав газовой фазы, %				Источник
		H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	
1	2	3	4	5	6	7
Ti+2B	0,331	98,6	0,9	0,3	0,2	[25]
Ti+C	0,180	96,6	0,8	0,5	1,5	
Ta+C	0,062	61,5	37,5	0,1	0,9	

Продолжение таблицы 2 / Table 2 cont.

1	2	3	4	5	6	7
Ti+0,6Si	0,850	97,5	0,8	0,1	0,6	[25]
Zr+0,6Si	0,195	95,4	2,7	0,2	1,7	
Hf+0,6Si	1,785	97,1	1,0	0,1	1,8	
Ti+B	0,127	99,8	0,1*	0,1	–	[26]
Ta+C	–	71,0	17,0	0,7	–	[27]
Ti+C	–	66,2	23,1**	–	10,8	[28]

Примечание: приведено содержание смеси газов для * –CO+N₂, ** –CO+N₂+C₂H₄.

По данным таблицы 2 видно, что газовая фаза рассмотренных смесей состоит, в основном, из водорода и оксида углерода, так как на поверхности исходных компонентов абсорбированы различные примеси, в том числе и воздух. Для смесей углерода и бора с титаном показано наличие значительного количества смеси газов CO, N₂ и CO, N₂, C₂H₄.

Таким образом, разработка малогазовых быстрогорящих пиротехнических составов для замедлительных устройств и линий иницирования для гражданской промышленности возможна путём замены существующих материалов перспективными нанотермитными композициями. Важное значение имеет возможность исключения соединений свинца из замедлительных составов практического применения, что обеспечивает создание малотоксичных экологически чистых энергетических замедлительных композиций и устройств. Однако горение нанотермитов, модифицированных добавками полимерных связующих, отличается значительным разбросом экспериментальных данных.

Целью данной работы является оценка влияния фторполимерного связующего – окислителя на взрывчатые характеристики наноконпозиции Al/MoO₃/Ф-42Л.

МЕТОДЫ

В качестве исходных компонентов были использованы порошки производства ООО «Передовые Порошковые Технологии» (Томск, Россия):

- Al марки Alex с размером частиц 50–70 нм, состава Al/Al₂O₃ – 85/15 %;
- оксида молибдена MoO₃ с размером частиц 30–150 нм, чистотой не менее 99 %.

В качестве полимерного связующего применялся фторполимер – фторопласт марки Ф-42Л по ГОСТ 25428-82. Ф-42Л представляет собой сополимер тетрафторэтилена (TFE) и винилиденфторида (VF), содержащий 29 % TFE и 71 % звеньев VF. Фторопласт Ф-42Л имеет температуру плавления 149 °С. Этот полимер используется для производства изделий методом литья под давлением.

В данной работе он используется в качестве окислителя алюминия и его оксида и связующего для частиц композиции.

Предварительная подготовка компонентов включала вакуумную сушку при температуре не ниже 80 °С до постоянной массы. В качестве жидкой дисперсной среды выбран ацетон – инертная по отношению к смешиваемым порошкам жидкость и растворитель для фторполимера. Концентрация Ф-42Л в растворе была постоянной при изготовлении всех нанотермитных смесей и равной 0,63 %. Изготовление композитов производили способом ультразвуковой обработки по методу, описанному авторами [18]. Ультразвуковая обработка суспензии в стакане, помещённом в наполненную водой ультразвуковую ванну ПСБ 1335-05 (производства ООО «ПСБ-Галс», Россия; выходная мощность генератора колебаний 50 Вт, рабочая частота ультразвуковых преобразователей 35 кГц,) с одновременным перемешиванием фторопластовым шпателем в течение 30 минут.

Взрывчатые свойства оценивались по методу авторов [29], заключающемуся в определении «относительной силы взрыва» *W*, равной отношению максимальной амплитуды сигнала тензометрического датчика, на контактной площадке которого иницировали от 15 до 50 мг исследуемого состава, к амплитуде сигнала, полученного при иницировании контрольной смеси аналогичной массы (среднее значение из 3–8 опытов). В качестве контрольной, относительная сила взрыва которой принята за 100 %, выступала смесь нанопорошков Al и MoO₃ в соотношении 40/60, соответствующей массы навески (от 15 до 50 мг). Следует добавить, что для оценки *W* смесей Al/MoO₃ от массы навески принимается за 100 % минимальная навеска (от 15 мг).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кинетические особенности процесса взрывчатого превращения нанотермитных композитов могут быть представлены в виде высокопористых смесей гетерогенных компонентов [18]. Высокопористые системы характеризуются конвективным механизмом взрывного

МАЛОГАЗОВЫЕ НАНОТЕРМИТЫ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СИЛА ВЗРЫВА СМЕСИ Al/MoO₃ С ФТОРПОЛИМЕРОМ

превращения, фронт которого представляет собой совокупность газовых «струй», прорывающихся в объём образца через поровые каналы. В исследованиях [18, 30] одиночная пора рассматривается как трубка, стенки которой изготовлены из реакционноспособного материала. Для горячей поры различают три области: зону фильтрации, предшествующую фронту горения, за которой следует зона воспламенения, ограниченная, с другой стороны, зоной дожигания [30]. Скорость распространения реакции по конвективному механизму определяется процессами в зоне воспламенения, при этом показана прямая связь между скоростью и образованием газа в этой области [18].

Экспериментальным подтверждением конвективного механизма взрывчатого превращения смеси Al/MoO₃ является значительный разброс экспериментальных данных (рис. 1–1). Увеличение массы образца от 15 до 45 мг повышает W приблизительно в три раза, но воспроизводимость в параллельном эксперименте значительно ухудшилась. Это может быть связано с тем, что плотность неоднородна в объёме образца, что, в свою очередь, определяет неравномерные размеры пор и их распределение. Добавление различных полимерных связующих может стабилизировать процесс взрывчатого превращения и улучшить воспроизводимость экспериментальных данных (рис. 1).

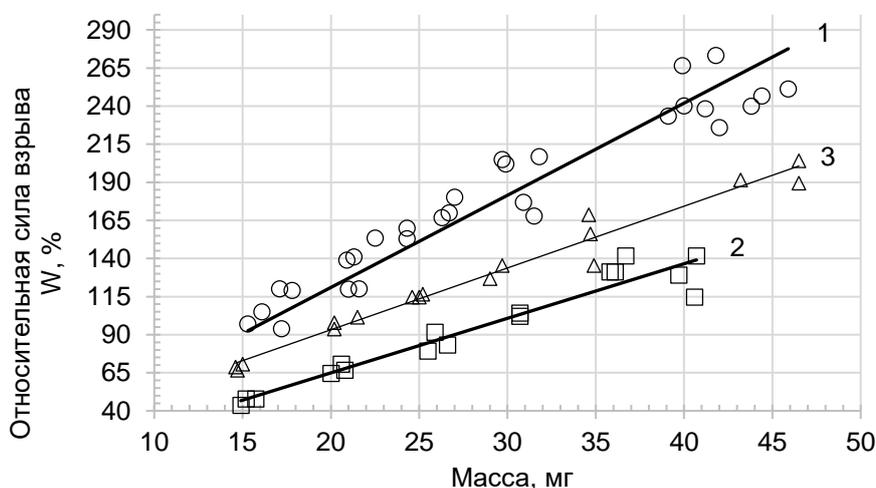


Рисунок 1 – Зависимость относительной силы взрыва Al/MoO₃ от массы образца:
1) нанотермит Al/MoO₃; 2) с добавкой 5% фторполимера Ф-42Л;
3) стехиометрическая смесь Al/MoO₃/Ф-42Л

Добавление 5 % фторполимерного связующего к нанотермиту (2) в стехиометрическом соотношении Al/MoO₃ привело к увеличению массы образца до 30 мг (в два раза), что эквивалентно значению W для чистого нанотермита. Напротив, увеличение объёма газообразных продуктов путём добавления фторполимера не привело к ожидаемому увеличению относительной силы взрыва. Это объясняется тем, что частицы смешанных компонентов покрыты полимерной плёнкой, как показано в [30]. Тем не менее, фторполимер значительно превосходит по газопродуктивности термит (таб. 1), но эффективная фильтрация газа в порах образца не обеспечивается. В связи с этим проведено исследование зависимости W от массы навески наноконкомпозита Al/MoO₃/Ф-42Л, представляющего собой смесь двойных стехиометрических систем Al/MoO₃ и Al/Ф-42Л (3) из

расчёта, что содержание полимерного связующего составляет 5 %.

Из рисунка 1 (3) следует, что W увеличивается на 30–40 %, когда масса образца изменяется от 15 до 40 мг, по сравнению со смесью, содержащей 5% Ф-42Л (2), с одновременным улучшением воспроизводимости экспериментальных данных.

Таким образом, сравнительный анализ соотношений (рис. 1) показывает, что определяющей химической реакцией взрывного превращения наноконкомпозита Al/MoO₃, покрытого фторполимерным связующим Ф-42Л, является экзотермическая реакция между алюминием и фторполимером. При этом скорость химического взаимодействия является также определяющей при взрывном превращении, несмотря на то, что фтор является более эффективным окислителем алюминия и его оксида, в отличие от кислорода. Кроме

того, полученные результаты хорошо коррелируют с работами других авторов [18].

В то же время применяемый экспериментальный подход для определения относительной силы взрыва нанотермитов может быть экспресс-методом сравнения любых добавок к композиции. Эта методология позволяет значительно ускорить исследования и разработку нанотермитных смесей практического применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние фторполимерного связующего Ф-42Л на взрывчатые характеристики нанокompозита Al/MoO₃. Показано, что добавка фторопласта снижает силу взрыва. При этом установлено, что определяющей химической реакцией при конвективном взрывчатом разложении является экзотермическая реакция алюминия с фторопластом. Полученные результаты коррелируются с литературными данными.

Работа выполнена в рамках проекта № 121061500029-7 при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, Бийск, Россия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов, А.А. Горение нанопорошков металлов / А.А. Громов, Т.А. Хабас А.П. Ильин. – Томск : Дельтаплан, 2008. – 382 с.
2. Гусейнов, Ш.Л. Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в высокоэнергетических материалах / Ш.Л. Гусейнов. – Москва : ТОРУСПРЕСС, 2015. – 256 с.
3. Kim, S. [et al.]. Burning structures and propagation mechanisms of nanothermites / S. Kim [et al.] // Proceedings of the Combustion Institute. – 2022.
4. Rossi, C. Nanoenergetic Materials for MEMS: A Review / C. Rossi [et al.] // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2007. – Vol. 16. – № 4. – P. 919–931.
5. Yu, C. Aluminum/lead tetroxide nanothermites for semiconductor bridge applications / C. Yu [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2023. – Vol. 451. – P. 138614.
6. Шидловский, А.А. Основы пиротехники: учеб. пособие ; изд. 2, перераб. / А.А. Шидловский. – Москва : Государственное издательство оборонной промышленности, 1954. – 284 с.
7. Yang, H. Underwater self-sustaining combustion and micro-propulsion properties of Al@FAS-17/PTFE-based direct-writing nanothermite / H. Yang [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2023. – Vol. 451. – P. 138720.
8. Фролов, Ю.В. Наноразмерные компоненты в энергетических материалах: плюсы и минусы / Ю.В. Фролов // Горение и взрыв. – 2009. – № 2. – С. 171–172.
9. Piercey, D.G. Nanoscale Aluminum – Metal Oxide (Thermite) Reactions for Application in Energetic Materials / D.G. Piercey, T.M. Klapoetke // Central European Journal of Energetic Materials. – 2010. – Vol. 7. – № 2. – P. 115–129.
10. Cheng, J. Doping of Al/CuO with microwave absorbing Ti₃C₂ MXene for improved ignition and combustion performance / J. Cheng [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2023. – Vol. 451. – P. 138375.
11. Nicollet, A. Fast circuit breaker based on integration of Al/CuO nanothermites / A. Nicollet // Sens Actuators A Phys. – 2018. – Vol. 273. – P. 249–255.
12. Egorshv, V.Y. Combustion of high-density CuO/Al nanothermites at elevated pressures / V.Y. Egorshv, V.P. Sinditskii, K.K. Yartsev // International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics Chengdu, Sichuan Province. – China, September 24–27. – 2013. – P. 287–290.
13. Dolgoborodov, A.Y. Mechanically activated oxidizer-fuel energetic composites / A.Y. Dolgoborodov. – Combust Explos Shock Waves. – 2015. – № 1. – P. 102–116.
14. Luo, Q. Constant volume combustion properties of Al/Fe₂O₃/RDX nanocomposite: the effects of its particle size and chemical constituents / Q. Luo [et al.] // Combust Flame. – 2022. – Vol. 238. – P. 111938.
15. Kelly, D.G. Formation of Additive-Containing Nanothermites and Modifications to their Friction Sensitivity / D.G. Kelly [et al.] // Journal of Energetic Materials. – 2017. – Vol. 35. – № 3. – P. 331–345.
16. Weir, C. The role of aluminum particle size in electrostatic ignition sensitivity of composite energetic materials / C. Weir, M.L. Pantoya, M.A. Daniels // Combust Flame. – 2013. – Vol. 160. – № 10. – P. 2279–2281.
17. Steelman, R. Desensitizing nano powders to electrostatic discharge ignition / R. Steelman [et al.] // J Electrostat. – 2015. – Vol. 76. – P. 102–107.
18. Гордеев, В.В. Исследование свойств нанотермита Вi₂O₃/Al и композиций на его основе / В.В. Гордеев [и др.] // Южно-Сибирский вестник. – 2018. – № 4. – С. 261–268.
19. Apperson, S.J. Characterization and MEMS applications of nanothermite materials / S.J. Apperson. – University of Missouri, Columbia, 2010.
20. Wang, H. Unzipping polymers significantly enhance energy flux of aluminized composites / H. Wang // Combust Flame. – 2022. – Vol. 244. – P. 112242.
21. Dombroski, D.M.B. Joining and welding with a nanothermite and exothermic bonding using reactive multi-nanolayers – A review / D.M.B. Dombroski [et al.] // J Manuf Process. – 2022. – Vol. 75. – P. 280–300.
22. Sevely, F. Developing a Highly Responsive Miniaturized Security Device Based on a Printed Copper Ammine Energetic Composite / F. Sevely [et al.] // SSRN Electronic Journal. – 2022.
23. Feng, S. Unraveling the adhesive properties, thermal stability, and initial diffusion mechanisms of Al/NiO nanothermites with various dominant surfaces: A first-principles study / S. Feng, W. Zhu // Appl Surf Sci. – 2022. – Vol. 603. – P. 154399.
24. Рогачев, А.С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику /

МАЛОГАЗОВЫЕ НАНОТЕРМИТЫ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СИЛА ВЗРЫВА СМЕСИ Al/MoO₃ С ФТОРПОЛИМЕРОМ

А.С. Рогачев, А.С. Мукасян. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013 – 400 с.

25. Рогачев. А.С. Динамика структурных пре-
вращений в процессах безгазового горения : дисс. ...
докт. / А.С. Рогачев. – Черноголовка : ИСМАН, 1994.

26. Филоненко, А.К. Газовыделения от при-
месей при безгазовом горении смесей переходных
металлов с бором / А.К. Филоненко, В.И. Вершин-
ников // Хим. физика. – 1984. – № 3. – С. 430–434.

27. Широ, В.М. Исследование закономерностей
горения смесей тантала с углеродом / В.М. Широ,
Г.А. Нерсисян, И.П. Боровинская // Физика горения и
взрыва. – 1978. – № 33. – № 4. – С. 58–64.

28. Kecskes, L.J. Impurities in the Combustion
Synthesis of Titanium Carbide / L.J. Kecskes, A. Niiler //
Journal of the American Ceramic Society. – 1989. –
Vol. 72. – № 4. – P. 655–661.

29. Гордеев, В.В. Определение предпочти-
тельных параметров ультразвукового воздействия
при изготовлении нанотермита Al/CuO / В.В. Гор-
деев, М.В. Казутин, Н.В. Козырев // Южно-
Сибирский вестник. – 2017. – № 4. – С. 121–125.

30. Храповский, В.Е. О механизме конвектив-
ного горения пористых систем / В.Е. Храповский,
А.А. Сулимов // Физика горения и взрыва. – 1988. –
№ 2. – С. 39–44.

Информация об авторах

В. О. Попов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории химии азотсодержащих соединений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск.

В. Н. Комов – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем, Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск.

В. В. Малыхин – кандидат химических наук, заведующий лабораторией химии азотсодержащих соединений, Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск.

REFERENCES

1. Apperson, S.J. (2010). Characterization and MEMS applications of nanothermite materials [University of Missouri-Columbia]. <https://doi.org/10.32469/10355/11999>.

2 Cheng, J., Zhang, Z., Wang, Y., Li, F., Cao, J., Gozin, M., Ye, Y. & Shen, R. (2023). Doping of Al/CuO with microwave absorbing Ti₃C₂ MXene for improved ignition and combustion performance.

Chemical Engineering Journal, 451, 138375. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138375>.

3 Dolgoborodov, A.Y. (2015). Mechanically activated oxidizer-fuel energetic composites. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1, 102-116.

4. Dombroski, D.M.B., Wang, A., Wen, J.Z. & Alfano, M. (2022). Joining and welding with a nanothermite and exothermic bonding using reactive multilayers - A review. Journal of Manufacturing Processes, 75, 280-300. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.056>.

5. Egorshv, V.Y., Sinditskii, V.P. & Yartsev, K.K. (2013). Combustion of high-density CuO/Al nanothermites at elevated pressures. International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics Chengdu, Sichuan Province, China, September 24-27, 287-290.

6. Feng, S. & Zhu, W. (2022). Unraveling the adhesive properties, thermal stability, and initial diffusion mechanisms of Al/NiO nanothermites with various dominant surfaces: A first-principles study. Applied Surface Science, 603, 154399. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154399>.

7. Kecskes, L.J. & Niiler, A. (1989). Impurities in the Combustion Synthesis of Titanium Carbide. Journal of the American Ceramic Society, 72(4), 655-661. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1989.tb06190.x>.

8. Kelly, D.G., Beland, P., Brousseau, P. & Petre, C.-F. (2017). Formation of Additive-Containing Nanothermites and Modifications to their Friction Sensitivity. Journal of Energetic Materials, 35(3), 331-345. <https://doi.org/10.1080/07370652.2016.1193072>.

9. Kim, S., Johns, A.A., Wen, J.Z. & Deng, S. (2022). Burning structures and propagation mechanisms of nanothermites. Proceedings of the Combustion Institute. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.113>.

10. Luo, Q., Liu, G., Zhu, M. & Jiang, X. (2022). Constant volume combustion properties of Al/Fe₂O₃/RDX nanocomposite: the effects of its particle size and chemical constituents. Combustion and Flame, 238, 111938. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111938>.

11. Nicolle, A., Salvagnac, L., Baijot, V., Estève, A. & Rossi, C. (2018). Fast circuit breaker based on integration of Al/CuO nanothermites. Sensors and Actuators A: Physical, 273, 249-255. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.02.044>.

12. Piercey, D.G. & Klapoetke, T.M. (2010). Nanoscale Aluminum -Metal Oxide (Thermite) Reactions for Application in Energetic Materials. Central European Journal of Energetic Materials, 7(2), 115-129. https://www.researchgate.net/publication/267997933_Nanoscale_Aluminum_-Metal_Oxide_Thermite_Reactions_for_Application_in_Energetic_Materials.

13. Rossi, C., Zhang, K., Esteve, D., Alphonse, P., Tailhades, P. & Vahlas, C. (2007). Nanoenergetic Materials for MEMS: A Review. Journal of Microelectromechanical Systems, 16(4), 919-931. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2007.893519>.

14. Sevely, F., Wu, T., de Sousa, F.S.F., Segui-
er, L., Brossa, V., Charlot, S., Esteve, A. & Rossi, C. (2022). Developing a Highly Responsive Miniaturized Security Device Based on a Printed Copper Ammine

Energetic Composite. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4123084>.

15. Steelman, R., Clark, B., Pantoya, M.L., Heaps, R.J. & Daniels, M.A. (2015). Desensitizing nano powders to electrostatic discharge ignition. *Journal of Electrostatics*, 76, 102-107. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2015.05.008>.

16. Wang, H., Wang, Y., Garg, M., Moore, J.S. & Zachariah, M.R. (2022). Unzipping polymers significantly enhance energy flux of aluminized composites. *Combustion and Flame*, 244, 112242. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112242>.

17. Weir, C., Pantoya, M.L. & Daniels, M.A. (2013). The role of aluminum particle size in electrostatic ignition sensitivity of composite energetic materials. *Combustion and Flame*, 160(10), 2279-2281. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.05.005>.

18. Yang, H., Xu, C., Wang, W., Tang, P., Li, X., He, S., Bao, H., Man, S., Tang, D., Li, X., Yang, G. & Qiao, Z. (2023). Underwater self-sustaining combustion and micro-propulsion properties of Al@FAS-17/PTFE-based direct-writing nanothermite. *Chemical Engineering Journal*, 451, 138720. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138720>.

19. Yu, C., Zheng, Z., Gu, B., Chen, Y., Xu, J., Zhang, L., Shi, W., Wang, J., Song, C., Chen, J., Ma, K. & Zhang, W. (2023). Aluminum/lead tetroxide nanothermites for semiconductor bridge applications. *Chemical Engineering Journal*, 451, 138614. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138614>.

20. Gordeev, V.V., Kazutin, M.V. & Kozyrev, N.V. (2017). Determination of the preferred parameters of ultrasonic exposure in the manufacture of Al/CuO nanothermite. *South Siberian Bulletin*, 4, 121-125.

21. Gordeev, V.V., Kazutin, M.V., Kozyrev, N.V. & Komov, V.N. (2018). Investigation of the properties of Bi₂O₃/Al nanothermite and compositions based on it. *South Siberian Bulletin*, 4, 261-268.

22. Gromov, A.A., Khabas, T.A. & Ilyin, A.P. (2008). *Combustion nanopowders metals*. Edited by: A.A. Gromov. Hang glider.

23. Huseynov, S.L. (2015). *Nanopowders of aluminum, boron, aluminum and silicon borides in high-energy materials*. TORUS PRESS.

24. Rogachev, A.S. (1994). *Dynamics of structural transformations in the processes of gas-free combustion*. Doct. diss. ISMAN.

25. Rogachev, A.S. & Mukasyan, A.S. (2013). *Gorenje for the synthesis of materials: introduction to structural macrokinetics*. M.: FIZMATLIT, 2013-400 p. (A.S. Mukasyan, Ed.). FIZMATLIT.

26. Filonenko, A.K. & Vershinnikov, V.I. (1984). Gas emissions from impurities during gas-free gorenje mixtures of transition metals with boron. *Chem. Physics*, 3, 430-434.

27. Frolov, Yu.V. (2009). Nanoscale components in energy materials: pros and cons. *Gorenjei Explosion*, 2, 171-172.

28. Khrapovsky, V.E. & Sulimov, A.A. (1988). On the mechanism of convective combustion of porous systems. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2, 39-44.

29. Shidlovskiy, A.A. (1954). *Fundamentals of Pyrotechnics: a textbook* (Ed.: 2nd edition). State Publishing House of the Automotive Industry.

30. Shkiro, V.M., Nersinyan, G.A. & Borovinskaya, I.P. (1978). Investigation of the gorenje-ness of the combustion of mixtures of tantalum with carbon. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 33(4), 58-64.

Information about the authors

V. O. Popov - Candidate of Engineering Sciences, research assistant of the laboratory of chemistry of nitrogen-containing compounds, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS).

V. V. Malykhin - Candidate of Chemical Sciences, head of laboratory of chemistry of nitrogen-containing compounds, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS).

V. N. Komov - postgraduate, junior research assistant of the laboratory of Physicochemical Bases of Energetic Condensed Systems, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS).

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.