

УДК 662.215.5

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-54-60

Воспламенение смеси вольфрама с тефлоном и добавками алюминия

© 2018 г. **М.И. Алымов, С.Г. Вадченко, И.С. Гордополова**

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мерджанова РАН (ИСМАН), г. Черноголовка, Московская обл.

Статья поступила в редакцию 14.07.17 г., доработана 04.10.17 г., подписана в печать 18.10.17 г.

Проведен термодинамический анализ и исследована зависимость процессов воспламенения и формирования структуры продуктов в порошковых смесях вольфрама с тефлоном (Tf) и добавками алюминия. Использование вольфрама в качестве одного из компонентов смеси связано с необходимостью получения конденсированных продуктов с большой плотностью, а алюминий применялся в качестве энергетической добавки, понижающей температуру воспламенения и увеличивающей температуру горения смеси. Для исследования использовали составы с фиксированным соотношением вольфрама и тефлона, концентрацию алюминия варьировали в соответствии с формулой $(1 - x)(0,8W + 0,2Tf) + xAl = \text{const}$. Смеси готовили в планетарной мельнице АГО-2 в среде гексана. Затем из них прессовали образцы массой 0,01–0,02 г, которые нагревали в тигле из нитрида бора в среде аргона при атмосферном давлении. Скорость нагрева тигля варьировалась. При достижении температуры воспламенения на термограмме наблюдался резкий скачок температуры образца. Показано, что увеличение скорости нагрева повышает температуру воспламенения систем, что может быть связано с переходом из режима теплового взрыва в режим зажигания. Составы с небольшими добавками алюминия в ходе воспламенения и горения образуют большой объем газообразных продуктов, которые либо полностью разлетаются, либо формируют высокопористую структуру. Для систем с высоким содержанием алюминия анализ полученных продуктов показал, что основным является WAl_4 . При большой концентрации алюминия результаты экспериментов и термодинамических расчетов существенно различаются, что объясняется отсутствием в программе Thermo сведений для алюминидов вольфрама и тем, что реальные условия протекания реакции далеки от равновесных и адиабатических условий. Полученные расчетные и экспериментальные данные показывают, что для образования расплавленных продуктов с высокой плотностью ($\rho_{W_2C} = 17,2 \text{ г/см}^3$) оптимальная концентрация алюминия должна составлять около 10 мас.%. При превышении этого значения образующийся основной продукт WAl_4 имеет плотность значительно ниже ($\rho_{WAl_4} = 6,6 \text{ г/см}^3$), что недостаточно для практического применения.

Ключевые слова: высокоэнергетические смеси металлов с тефлоном, воспламенение, горение, структурообразование.

Алымов М.И. – докт. техн. наук, чл.-корр. РАН, директор ИСМАН (142432, г. Черноголовка, ул. Акад. Осипяна, 8).
E-mail: alymov@ism.ac.ru.

Вадченко С.Г. – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник лаборатории динамики микрогетерогенных процессов ИСМАН.
E-mail: vadchenko@ism.ac.ru.

Гордополова И.С. – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории ударно-волновых процессов ИСМАН.
E-mail: gis@ism.ac.ru.

Для цитирования: Алымов М.И., Вадченко С.Г., Гордополова И.С. Воспламенение смеси вольфрама с тефлоном и добавками алюминия // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2018. № 2. С. 54–60.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-54-60.

Alymov M.I., Vadchenko S.G., Gordoplova I.S.

Ignition and combustion of W–Teflon–Al mixtures

Relationships between ignition and product structure formation in W–Teflon (Tf)–Al powder mixtures was explored by thermodynamic and structural analyses. The use of tungsten as one of mixture components was dictated by the need to obtain high-density condensation products. Aluminum was used as a heat-generating agent to reduce ignition temperature and increase mixture combustion temperature. Combustion experiments used compositions with a fixed tungsten-to-Teflon ratio, while aluminum content varied according to the formula: $(1 - x)(0,8W + 0,2Tf) + xAl = \text{const}$. After intermixing in the AGO-2 planetary mill in hexane environment, the powders were compressed into 0,01–0,02 g samples and then heated in a BN crucible in argon environment under atmospheric pressure at a variable crucible heating rate. The sample temperature increased sharply on the thermogram once the ignition temperature was reached. It is shown that as the heating rate increases, the ignition temperature of systems grows, and this may be due to transfer from thermal explosion mode to ignition mode. Low-aluminum mixtures yielded large amounts of gaseous products during ignition and combustion, and this results either in defragmentation of combustion product or in formation of porous cakes. The analysis of products obtained with high-aluminum systems indicated WAl_4 as a main product. For higher

aluminum content results of thermodynamic calculations strongly differed from experimental ones owing to the lack of thermodynamic data for tungsten aluminides in the Thermo software and to the strong mismatch between the actual reaction conditions and adiabatic equilibrium ones. Calculated and experimental results suggest that the formation of fused high-density products ($\rho_{W_2C} = 17,2 \text{ g/cm}^3$) is possible at an optimal aluminum content $\approx 10 \text{ wt.}\%$. When this value is exceeded, the main product, WAl_4 , has a much lower density ($\rho_{WAl_4} = 6,6 \text{ g/cm}^3$), which is inadequate for practical implementation.

Keywords: high-energy mixtures of metals with Teflon, ignition, burning, structure formation.

Alymov M.I. – Dr. Sci. (Tech.), Corr. member of the RAS, Director of Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS (ISMAN) (143432, Russia, Moscow Region, Chernogolovka, Academician Osipyan str., 8). E-mail: alymov@ism.ac.ru.

Vadchenko S.G. – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading researcher, Laboratory of dynamics of microheterogeneous processes, ISMAN. E-mail: vadchenko@ism.ac.ru.

Gordopolova I.S. – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior researcher, Laboratory of shock-wave processes, ISMAN. E-mail: gis@ism.ac.ru.

Citation: Alymov M.I., Vadchenko S.G., Gordopolova I.S. Vosplamenenie smesi vol'frama s teflonom i dobavkami alyuminiya. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2018. No. 2. P. 54–60.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-54-60.

Введение

Композиты на основе порошков металлов и полимеров широко используются при изготовлении материалов и изделий различного назначения. К их числу можно отнести конструкционные и функциональные композиционные материалы. В качестве полимерных ингредиентов находят применение фторполимеры, как наиболее термически и химически устойчивые компоненты. Кроме того, существует множество энергоемких композиций, содержащих активное металлическое горючее и фторполимеры, выступающие в роли основного или дополнительного окислителя. Одним из наиболее эффективных методов подготовки смесей из таких компонентов является механоактивация (МА), которая является распространенным способом увеличения их реакционной способности [1–7].

При МА смесей порошков металлов с фторполимерами получают материалы с высокой степенью однородности за счет образования на поверхности металлических частиц полимерных покрытий. Одной из причин их формирования, по-видимому, является то, что МА металлов протекает в условиях повышенной концентрации активных частиц макрорадикалов фторполимера [4, 5]. В то же время МА смесей металлов и фторполимеров может способствовать изменению горючих свойств таких композитов. Это наиболее актуальная проблема при использовании химически активных металлических порошков, например таких, как алюминий и магний. Благодаря высоким температурам, развиваемым при горении, смеси металлов с тефлоном (Tf) широко используются в пиротехнике [8–11]. Также хорошо изучены вос-

пламенительные составы на основе смесей тефлона с магнием и алюминием [12–18].

В ряде случаев необходима высокая плотность изделия, содержащего энергоемкий состав, которую может обеспечить включение в состав материала компонентов с высокой плотностью, таких, как тяжелые металлы (U, W, Th, Ta, Hf, Nb и др.) или их оксиды (WO_2 , WO_3 , CuO , PbO_2 , Pb_3O_4 и др.). Одним из наиболее привлекательных в этом отношении компонентов является вольфрам, так как он относительно дешев, малотоксичен, не повышает чувствительность смеси и при этом является одним из наиболее высокоплотных материалов [19].

Сведений о кинетике реакции взаимодействия тефлона с вольфрамом, воспламенении, горении и детонации таких смесей в литературе немного. В работе [20] начаты исследования процессов воспламенения смесей порошков вольфрама, тефлона и алюминия. Цель данной работы — определить влияние соотношения компонентов (вольфрама, тефлона и алюминия) на параметры воспламенения и состав образующихся продуктов в смесях, подвергшихся механоактивации.

Термодинамический анализ реакций в системе W—Tf—Al

Для термодинамических расчетов выбраны составы на основе вольфрама и тефлона с добавками алюминия, который должен инициировать реакцию горения. Это задача многопараметрическая, так как композит должен иметь высокую плотность, тефлон — обеспечивать, с одной стороны, хорошую прессуемость и прочность образцов, с

Результаты термодинамических расчетов

№ смеси	Состав, мас. %			ρ , г/см ³	T_{ad} , К	Объем газ. фазы, дм ³	Содержание продуктов, мас. %	
	Al	W	Tf				В твердой фазе	В жидкой фазе
1	5	76	19	6,93	3050	75	53 (C, W ₂ C)	24 (W ₂ C)
2	10	72	18	6,40	3130	99	2 (C)	74 (W ₂ C)
3	20	64	16	5,56	1985	106	71 (C, W ₂ C, Al ₄ C ₃)	0
4	30	56	14	4,91	1660	75	64 (Al ₄ C ₃ , W ₂ C)	11 (Al)
5	40	48	12	4,34	1520	45	55 (Al ₄ C ₃ , W ₂ C)	26 (Al)
6	50	40	10	3,98	1460	22	51 (Al ₄ C ₃ , AlF ₃ , W ₂ C)	41 (Al)
7	60	32	8	3,63	1450	0	45,5 (Al ₄ C ₃ , AlF ₃ , W ₂ C)	54,5 (Al)
8	80	16	4	3,10	930	0	100 (Al, Al ₄ C ₃ , AlF ₃ , W ₂ C)	0

другой, его количества должно быть достаточно для протекания реакции с выделением большого количества тепла. Так как плотность тефлона составляет 2,1–2,2 г/см³, его содержание ограничили 20 мас. % по отношению к массе вольфрама. При таком фиксированном соотношении содержаний тефлона и вольфрама добавки алюминия варьировали по формуле

$$(1 - x)(0,8W + 0,2Tf) + xAl = \text{const.}$$

Результаты термодинамических расчетов по программе Thermo представлены в таблице.

Расчетная адиабатическая температура горения смеси вольфрама с тефлоном достаточно высока ($T_{ad} = 2383,5$ К), конденсированные продукты горения составляют около 56 мас. %, но реакция трудноинициируемая. Небольшая добавка (5–10 мас. %) алюминия значительно понижает температуру воспламенения и повышает температуру горения. Так, согласно расчетам в продуктах горения состава 2 может содержаться до 74 мас. % расплава. Последующее увеличение доли алюминия в смеси до 20 мас. % приводит к резкому падению температуры горения и уменьшению количества продуктов расплава. Следует отметить, что с дальнейшим повышением содержания алюминия и понижением температуры горения возрастает суммарная масса конденсированных продуктов, в том числе и концентрация расплава, но при этом

уменьшается плотность как исходной смеси, так и продуктов горения.

Методика исследований

Исходные компоненты — порошки вольфрама (с размером частиц $d < 10$ мкм), тефлона Ф-4НТД-2 (низкомолекулярный тонкодисперсный политетрафторэтилен) дисперсностью менее 5 мкм и алюминия АСД-1 ($d < 20$ мкм) — смешивали в соотношениях согласно таблице. Смеси готовили в планетарной шаровой мельнице АГО-2 в среде гексана. Соотношение масс смеси и шаров составляло 1 : 20, частота переносного вращения барабанов — 2220 об/мин, время активации — 5 мин. Из смеси порошков прессовали цилиндрические образцы диаметром 3 мм, высотой 0,5–1,0 мм и массой 0,01–0,02 г. Давление прессования составляло 145 МПа. Воспламенение и горение смесей исследовали в среде аргона при атмосферном давлении.

Температуру воспламенения составов (T_c) определяли в устройстве, схема которого показана на рис. 1. Микропланетки подвешивали в тигле из нитрида бора на термопару ВР5/ВР20, сваренную из проволоки, прокатанных до толщины 10–15 мкм. Нагрев планетки осуществлялся тепловым излучением от тигля, который, в свою очередь, нагревался от графитовой фольги, через которую пропусклся электрический ток.

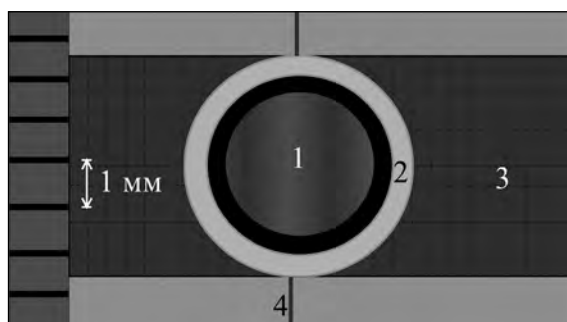


Рис. 1. Схема устройства для определения температуры воспламенения смесей

1 – таблетка ($d = 3$ мм), 2 – тигель из нитрида бора, 3 – графитовая фольга, 4 – термопара

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментов установлено, что при медленном нагреве образец прогревается равномерно и воспламеняется одновременно по всему объему. На термограммах (рис. 2) при этом присутствует один пик температуры. При увеличении скорости нагрева наблюдается несколько всплесков, обусловленных неоднородностью температурного поля в образце.

В предвоспламенительный период при нагреве смесей происходят аморфизация и плавление тефлона, которые наблюдаются в виде концентрической волны, распространяющейся от боковой поверхности образца к его центру. При фазовом переходе образец не меняет геометрических размеров. Дальнейший нагрев выше температуры термодеструкции тефлона (около 873 К) вызывает вспенивание образца, обусловленное испарением легколетучих полимеров и продуктов разложения (при температурах выше температуры деструкции). Реакция $\text{Al} + \text{Tf}$ начинается при температурах ниже температуры плавления алюминия, что вызвано высокой активностью газообразных продуктов деструкции тефлона и приводит к инициированию горения вольфрама с фторопластом. Дополнительной возможной причиной воспламенения смеси при $T \sim 873$ К может быть экзотермический эффект, наблюдаемый вблизи этой температуры при ДТА тефлона, одним из объяснений которого является окислительная термодеструкция [21–23]. В нашем случае эксперименты проводили в аргоне и образцы не окислялись.

На рис. 3 показаны зависимости критической температуры воспламенения от скорости нагрева, построенные по методу наименьших квадратов.

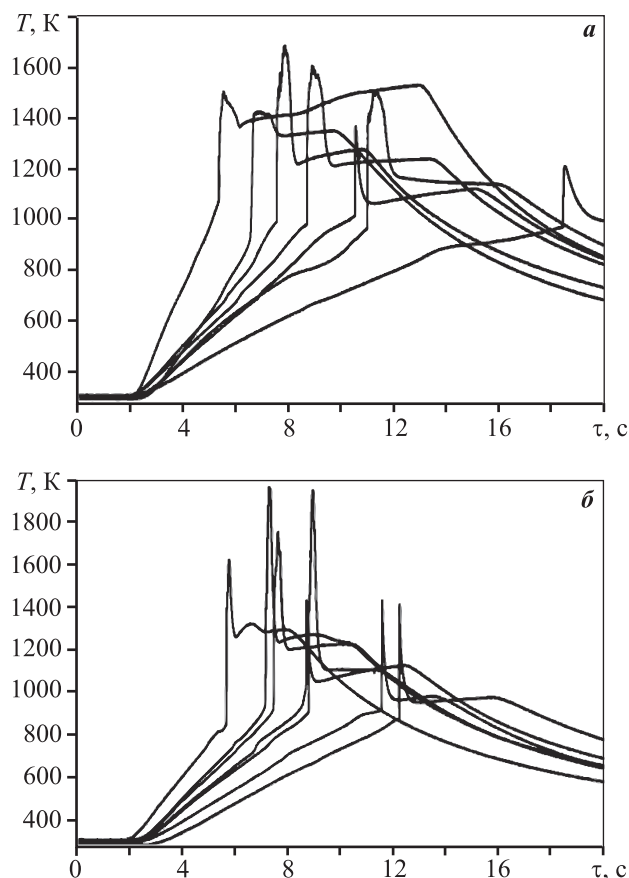


Рис. 2. Термограммы нагрева смесей $0,95(0,8\text{W} + 0,2\text{Tf}) + 0,05\text{Al}$ (а) и $0,90(0,8\text{W} + 0,2\text{Tf}) + 0,1\text{Al}$ (б) при различных скоростях нагрева

Несмотря на большой разброс экспериментальных данных, наблюдается тенденция повышения температуры воспламенения для составов с минимальной и максимальной концентрациями алюминия. Это может быть обусловлено как теплофизическими факторами — увеличением теплопроводности образцов с высокой концентрацией алюминия, так и образованием твердых продуктов и затруднением переноса компонентов в образцах с малым содержанием алюминия. Для всех составов повышение скорости нагрева приводит к росту температуры воспламенения образцов. Возможно, что при этом происходит переход из режима теплового взрыва в режим зажигания.

Ранее [20] было установлено, что в процессе реакции формируется в основном W_2C . Составы с небольшими добавками алюминия образуют в ходе воспламенения и горения большой объем газообразных продуктов, что подтверждает результаты термодинамических расчетов, и они либо

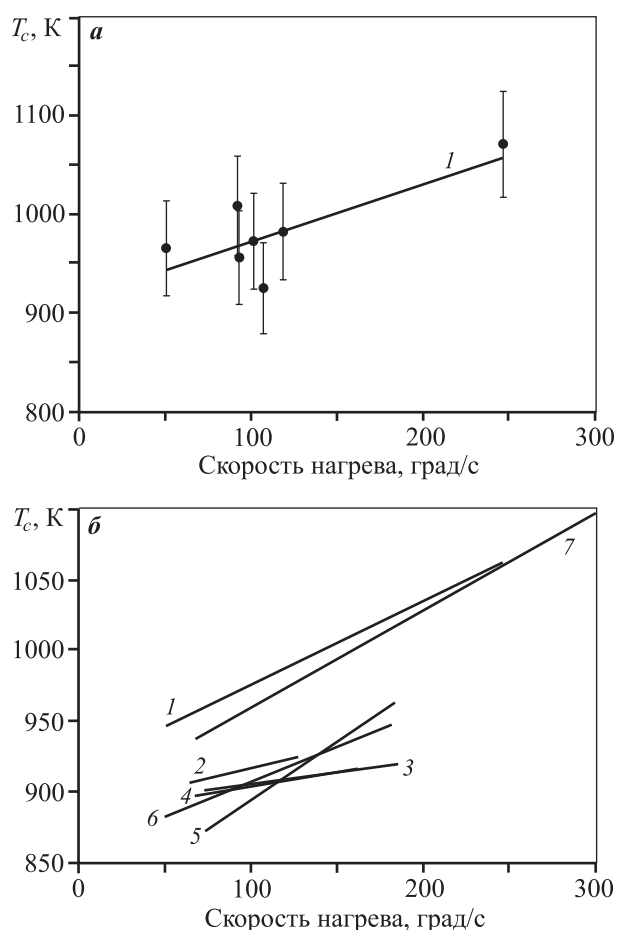


Рис. 3. Зависимость критической температуры воспламенения от скорости нагрева
Цифры у прямых (1–7) соответствуют номерам составов в таблице

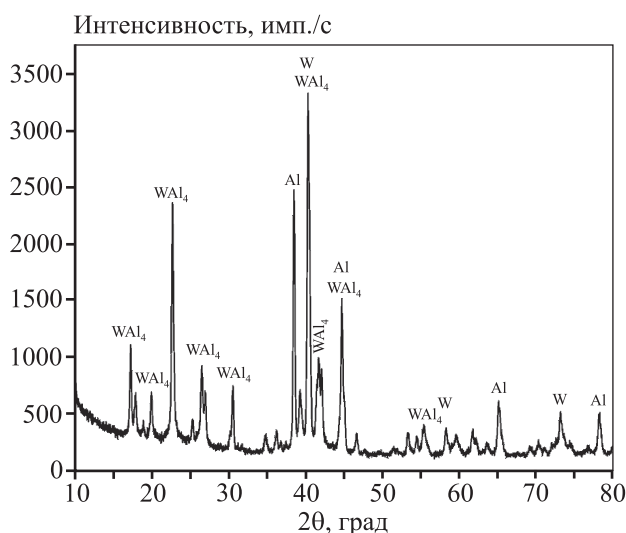


Рис. 4. Рентгенограмма продуктов реакции в системе $0,4 \pm 0,8W + 0,2Tf + 0,6Al$

разлетаются (5 мас.% Al), либо формируют высокопористую структуру (10–20 мас.% Al). Когда доля алюминия превышает 70 мас.% образцы не воспламеняются, а лишь немного нагреваются. Они не меняются в размерах и сохраняют свою форму, так как продукты остаются конденсированными, что находится в соответствии с результатами термодинамических расчетов. Это связано с тем, что концентрация тефлона слишком мала для полного протекания реакции, поэтому часть порошков металлов остается не прореагировавшей, а основным продуктом, по результатам рентгенофазового анализа, является WAl_4 (рис. 4).

При большой концентрации алюминия результаты экспериментов и термодинамических расчетов существенно различаются, что объясняется отсутствием в программе Thermo сведений для алюминидов вольфрама. По данным термодинамического расчета этой смеси одним из продуктов горения должен быть карбид вольфрама (W_2C), но в образцах он не обнаружен. Результаты сравнения говорят о том, что реальные условия протекания реакции далеки от равновесных и адиабатических условий. Тем не менее термодинамический анализ оказался полезным для оценки температур горения и параметров газовыделения.

Заключение

Полученные расчетные и экспериментальные данные показывают, что для образования расплавленных продуктов с высокой плотностью ($\rho_{W_2C} = 17,2 \text{ г/см}^3$) оптимальная концентрация алюминия должна составлять около 10 мас.%. При превышении этого значения образующийся основной продукт — алюминид вольфрама — имеет плотность значительно ниже ($\rho_{WAl_4} = 6,6 \text{ г/см}^3$), что недостаточно для практического применения.

Литература

1. Денисаев А.А., Штейнберг А.С., Берлин А.А. Влияние температуры на чувствительность к удару слоистых композиций алюминий—тефлон // Докл. АН. 2009. Т. 428. No. 1. С. 44–47.
2. Thadhani N.N. Shock-induced chemical reactions and synthesis of materials // Progr. Mater. Sci. 1993. Vol. 37. No. 2. P. 117–226.
3. Зелепугин С.А., Долгобородов А.Ю., Иванова О.В., Зелепугин А.С. Ударно-волновой синтез в твердых смесях. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012.

4. *Барамбойм Н.К.* Механохимия полимеров. М.: Ростехиздат, 1961.
5. *Гороховский Г.А.* Поверхностное диспергирование динамически контактирующих полимеров и металлов. Киев: Наук. думка, 1972.
6. *Малкин А.И., Киселев М.Р., Ключев В.А., Лознецова Н.Н., Топоров Ю.П.* Влияние механоактивации на термические свойства порошковых смесей алюминия с политетрафторэтиленом // *Материаловедение*. 2012. No. 3. С. 10—14.
7. *Болдырев В.В., Аввакумов Е.Г., Болдырева Е.В.* и др. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий / Под ред. Аввакумова Е.Г. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009.
8. *Демьяненко Д.Б., Дудырев А.С., Страхов И.Г., Цынбал М.Н.* Комплекс новых пиротехнических замедлительных составов для временных устройств пировавтоматики и средств инициирования // *Изв. СПбГТИ*. 2012. Т. 42. No. 16. С. 3—7.
9. *Демьяненко Д.Б., Дудырев А.С., Ефанов В.В., Страхов И.Г., Цынбал М.Н.* Пиротехнические временные устройства для объектов космической техники // *Науч.-техн. журн. НПО им. С.А. Лавочкина*. 2012. Т. 14. No. 3. С. 35—40.
10. *Демьяненко Д.Б., Дудырев А.С., Ефанов В.В.* Комплекс новых пиротехнических средств, для обеспечения функционирования малых космических аппаратов // *Изв. СПбГТИ*. 2007. Т. 27. No. 1. С. 5—9.
11. *Мадякин Ф.П., Тихонова Н.А.* Компоненты и продукты сгорания пиротехнических составов. Полимеры и олигомеры: Учеб. пос. Казань: Изд-во КГТУ, 2008.
12. *Полард Ф.Б., Арнольд Дж.Б.* Вспомогательные системы ракетно-космической техники. М.: Мир, 1970.
13. *Hightower J.O., Hamner J.W., Matthews R.L.* Solid propellant with alumina burning rate catalyst: Pat. 4084992 (USA). 1978.
14. *Shoshin Y.L., Mudryy R.S., Dreizin E.L.* Preparation and characterization of energetic Al—Mg mechanical alloy powders // *Combust. and Flame*. 2002. Vol. 128. No. 3. P. 259—269.
15. *Streletskii A., Kolbanev I.V., Borunova A.B., Butyagin P.Yu.* Mechanochemically activated Al: Preparation, structure and chemical properties: Abstr. INCOME 2003. Braunschweig, Germany (7—11 Sept. 2003). P. 44.
16. *Streletskii A.N., Pivkina A., Kolbanev I., Leipunsky I., Pshechenkov P., Lomaeva S., Polunina I., Frolov Yu., Butyagin P.* Mechanochemically activated nano-aluminium: Structure and morphology: Abstr. INCOME 2003. Braunschweig, Germany (7—11 Sept. 2003). P. 137.
17. *Levitas V.* The effects of fuel particle size on the reaction of Al/teflon mixtures. New-York: John Borrelli Dean of the Graduate School, 2006.
18. *Денисаев А.А., Штейнберг А.С., Берлин А.А.* Иницирование реакции в тонкопленочных многослойных образцах алюминий—фторопласт при ударе на копоре // *Хим. физика*. 2008. Т. 27. No. 6. С. 83—90.
19. *Липтенков В.Н., Салтанов Л.С., Свидинский А.В., Белов В.Ю., Баранов Г.В., Крылов В.П.* Композиционный материал для осуществления взрывопроницающего действия: Пат. 2579586 (РФ). 2016.
20. *Vadchenko S.G., Alymov M.I.* Ignition of W—Teflon—Al powder mixtures // *Int. J. Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2017. Vol. 26. No. 2. P. 137—139.
21. *Селиванов В.В., Имховик Н.А., Лашков В.Н., Селезнев А.А.* Исследование процесса физико-химической деструкции ПТФЭ и композиций ПТФЭ—металл при термических и ударно-волновых воздействиях // *Хим. физика*. 2001. Т. 20. No. 8. С. 80—85.
22. *Бузник В.М., Курявый В.Г.* Морфология и строение микронных и наноразмерных порошков политетрафторэтилена, полученных газофазным методом // *Журн. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева*. 2008. Т. LII. No. 3. С. 131—139.
23. *Тарасов А.В., Алиханян А.С., Архангельский И.В.* Взаимодействие фторполимеров с переходными металлами // *Неорганич. матер.* 2009. Т. 45. No. 7. С. 1—6.

References

1. *Denisaev A.A., Steinberg A.S., Berlin A.A.* Vliyanie temperatury na chyvstvitelnost k udaru sloevykh kompozitsii aluminii—teflon [Influence of temperature on shock sensitivity of the layered compositions of aluminium-teflon]. *Doklady Akademii Nauk*. 2009. Vol. 428. No. 1. P. 44—47.
2. *Thadhani N.N.* Shock-induced chemical reactions and synthesis of materials. *Progr. Mater. Sci.* 1993. Vol. 37. No. 2. P. 117—226.
3. *Zelepugin S.A., Dolgoborodov A.Yu., Ivanova O., Zelepugin A.S.* Udarno-volnovoi sintez v tverdykh smesyakh [Shock-wave synthesis in solid mixtures]. Tomsk: IOA SB RAS, 2012.
4. *Baramboym N.K.* Mechanochemiya polymerov [Mechanochemistry of polymers]. Moscow: Rostehizdat, 1961.
5. *Gorokhovskiy G.A.* Poverhnostnoye dispergirovaniye dinamicheskii kontaktiruyucshikh polymerov i metallov [Surface dispersion dynamically contacting polymers and metals]. Kiev: Naukova dumka, 1972.
6. *Malkin A.I., Kiselev M.R., Kliuev V.A., Loznecova N.N., Toporov Yu.P.* Vliyanie mechanoaktivacii na termich-

- eskie svoistva poroshkovykh smesei aluminiya s polytetraforetilenom [Influence mechanical activation on the thermal properties of powder mixtures of aluminium with polytetrafluorethylene]. *Materialovedenie*. 2012. No. 3. P. 10—14.
7. Boldyrev V.V., Avvakumov E.G., Boldyreva E.V. et al. Fundamentalnye osnovy mechanicheskoi aktivatsii, mekhanosinteza i mekhanochimicheskikh tekhnologii [Fundamentals of mechanical activation, and mechanosynthesis are considered chemical technologies]. (Ed. Avvakumov E.G.). Novosibirsk: SO RAN, 2009.
8. Demyanenko D.B., Dudyrev A.S., Strahov I.G., Cynbal M.N. Kompleks novykh pirotehnicheskikh zamedlitelnykh sostavov dlya vremennykh ustroystv piroavtomatiki i sredstviniirovaniya [Complex new pyrotechnic compositions for temporary piroautomatic devices and means of initiation]. *Izv. Sankt-Peterburgskogo Gos. Tekhnol. Inst. (Tekh. Univ.)*. 2012. Vol. 42. No. 16. P. 3—7.
9. Demyanenko D.B., Dudyrev A.S., Ephanov V.V., Strahov I.G., Cynbal M.N. Pirotehnicheskie vremennye ustroystva dlya ob'ektov kosmicheskoi tekhniki [Pyrotechnic devices for temporary objects of space technology]. *Nauchno-tekhnicheskii journal NPO im. S.A. Lavochkina*. 2012. Vol. 14. No. 3. P. 35—40.
10. Demyanenko D.B., Dudyrev A.S., Ephanov V.V. Complex novykh pirotehnicheskikh sredstv dlya obespecheniya funkcionirovaniya mal'nykh kosmicheskikh apparatov [Complex new fireworks, to ensure the functioning of small spacecraft]. *Izv. Sankt-Peterburgskogo Gos. Tekhnol. Inst. (Tekh. Univ.)*. 2007. Vol. 27. No. 1. P. 5—9.
11. Madjakin F.P., Tikhonov N.A. Komponenty i produkty sgoraniya pirotehnicheskikh sostavov [A components and products of combustion of pyrotechnic compositions: Polymers and oligomers]. Kazan: Izd-vo Kazanskogo Gos. Tech. Un-ta, 2008.
12. Polard F.B., Arnold J.B. Vspomogatelnye sistemy raketno-kosmicheskoi tekhniki [Support systems of rocket and space technology]. Moscow: Mir, 1970.
13. James O. Hightower, James W. Hamner, Richard L. Matthews. Solid propellant with alumina burning rate catalyst. Pat. 4084992 (USA). 1978.
14. Shoshin Y.L., Mudryy R.S., Dreizin E.L. Preparation and characterization of energetic Al—Mg mechanical alloy powders. *Combust. and Flame*. 2002. Vol. 128. No. 3. P. 259—269.
15. Streletskii A., Kolbanev I.V., Borunova A.B., Butyagin P.Yu. Mechanochemically activated Al: Preparation, structure and chemical properties: Abstr. INCOME 2003. Braunschweig, Germany (7—11 Sept. 2003). P. 44.
16. Streletskii A.N., Pivkina A., Kolbanev I., Leipunsky I., Pshechenkov P., Lomaeva S., Polunina I., Frolov Yu., Butyagin P. Mechanochemically activated nano-aluminium: Structure and morphology: Abstr. INCOME 2003. Braunschweig, Germany (7—11 Sept. 2003). P. 137.
17. Levitas V. The effects of fuel particle size on the reaction of Al/teflon mixtures. New-York: John Borrelli Dean of the Graduate School, 2006.
18. Denisaev A.A., Steinberg A.S., Berlin A.A. Initsirovanie reaktsii v toncoplechnykh mnogoslownykh obraztsakh aluminii-ftoroplast pri udare na kopre [Initiation reactions in thin-film multilayer aluminium-fluoropolymer samples upon impact to koper]. *Khimicheskaya fizika*. 2008. Vol. 27. No. 6. P. 83—90.
19. Laptenev V.N., Saltanov L.S., Svidinskii A.V., Belov V.Yu., Baranov G.V., Krylov V.P. Kompozitsionnyi material dlya osuschestvleniya vzryvopronikayushchego deystviya [Composite material for the implementation of the explosive actions]. Pat. 2579586 (RU). 2016.
20. Vadchenko S.G., Alymov M.I. Ignition of W—Teflon—Al Powder Mixtures. *Int. J. Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2017. Vol. 26. No. 2. P. 137—139.
21. Selivanov V.V., Imhovich N.A., Lashkov V.N., Selezenev A.A. Issledovanie protsessov fiziko-khimicheskoi destruktivnoi PTFE i kompozitsii PTFE-metal pri termicheskikh i udarno-volnovykh vozdustviyakh [Study process physical and chemical degradation of PTFE and PTFE-metal compositions with thermal and shock-wave effects]. *Khimicheskaya fizika*. 2001. Vol. 20. No. 8. P. 80—85.
22. Buznik V.M., Kuryavii V.G. Morfologiya i stroeniye mikronnykh i nanorazmernykh poroshkov olitetraforetilena, poluchennykh gazofaznym metodom [Morphology and structure of fine teflon powders prepared by gas-phase method]. *Ros. khimicheskii. zhurnal im. D.I. Mendeleeva*. 2008. Vol. LII. No. 3. P. 131—139.
23. Tarasov A.V., Alikhanian A.S., Arkhangel'skii I.V. Vzaimodeystviye ftoropolimerov s perekhodnymi metallami [Chemical interaction of fluoropolymers with transition metals]. *Neorgan. materialy*. 2009. Vol. 45. No. 7. P. 1—6.