

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РОССИИ  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (РАН)  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ РАН  
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ДВОЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «Искра»  
ЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ  
КРЫМСКАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ  
РОССИЙСКАЯ СЕКЦИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ИНСТИТУТА ГОРЕНИЯ

## **НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Под общей редакцией:  
Ассовского И.Г., Берлина А.А.

Москва  
2015

6. Комаров В.Ф., Сахович Г.В., Калмыков П.И. и др. Взаимодействие CL-20 с расплавленными кристаллическими веществами // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. – 2008. – № 4. – С. 79-83.
7. Калмыков П.И., Комаров В.Ф., Сидоров К.А. и др. Физико-химические аспекты ограниченной растворимости CL-20 в нитроэфирах // Сб. трудов Всерос. Научн.-техн. конф. «Успехи в специальной химии и химической технологии». – М.: ЦНИИИГТ, 2010. – С. 244-249.
8. Комаров В.Ф., Калмыков П.И., Бояринова Н.В. Сольватация гексанитрогексаазановоризитана при растворении в расплаве тринитротолуола // Журнал прикладной химии, т.85.-Вып. №5.- 2012.- С.746-749.
9. Попок В.Н., Бычкин Н.В., Попок Н.И., Шени Н.В. Механическая активация сокристаллизации некоторых соединений // Бултеровские сообщения. – 2013. – т. 34. – № 5. – С. 106-123.
10. Васильева А.А., Дашко Д.В., Душенов С.А. и др. Получение, структура и свойства бимолекулярного кристалла CL-20 и DNP // Современные проблемы технической химии. Сборник научных трудов. Пардубица. – 2014. – С. 188-195.
11. Гончаров Т.К., Алиев З.Г., Алдошин С.М., Дашко Д.В. Свойства бимолекулярных кристаллов CL-20 с 2,4-динитро-2,4-дизалентаном // Высокоэнергетические материалы, демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение. Тезисы X Международной конференции «НЕМ-2014». – 2014. – С. 47-51.
12. Каралетьянц, М.Х. Химическая термодинамика / М.Х. Каралетьянц. – М.: Химизд, 1975. – 583 с.
13. Калмыков П.И. Определение растворимости компонентов в жидких нитроэфирных системах методом рефрактометрии: Методика 07508902.01103.00301-ОАО «ФНПЦ «Алтай», 2013.- 16 с.

#### THE PECULIARITIES OF COMBUSTION OF POWER CONDENSED SYSTEMS WITH MECHANICALLY ACTIVATED METALLIZED COMPOSITES

Mofa N.N., Sadykov B.S., Bakkara A.E., Mansurov Z.A.

*Combustion Problems Institute, 172 Bogenby Batyr, Almaty 050012, Republic of Kazakhstan  
e-mail: Nina.Mofa@kaznu.kz*

#### ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ С МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫМИ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ КОМПОЗИТАМИ

Мофа Н.Н., Салыков Б.С., Баккара А.Е., Мансуров З.А.

*Институт проблем горения, Боевбай батыра 172, Алматы, Республика Казахстан  
e-mail: Nina.Mofa@kaznu.kz*

A thermal kinetic analysis of combustion of condensed systems with mechanically activated composites was performed. Systems containing aluminium, graphite and silicon dioxide were studied. Optimum conditions for MCT of aluminium in the presence of graphite and silicon dioxide in a mechanical reactor were stated. Metal particles in such composite have a porous core of crystallites and a surface layer of particles is a solid solution of carbon in aluminium, this is complex determining a high level of the system reactivity. The dependency of the change of the induction period, rate and temperature at all stages of the system combustion on the conditions of MCT of the composite was stated.

В настоящее время чтобы повысить эффективность энергетических систем в их состав включают некоторое количество металлического горючего. Интерес к таким материалам обусловлен тем, что присутствие металлического компонента в составе горючего снижает время задержки воспламенения и существенно улучшает термодинамические характеристики системы [1]. Для повышения энергоёмкости композиционных энергетических систем различного назначения используется механохимическая обработка (МХО), в результате которой изменяется дисперсность, дефектность, структура и состав поверхностных слоев частиц. Стабилизация энергетического состояния таких объектов связана с перераспределением дефектов и второго компонента в объеме системы [1], что способствует формированию новых поверхностных структур. Роль структурных структур может быть исключительно важна при создании порошковых механохимически обработанных материалов с заданным комплексом свойств при использовании любого метода, в том числе и МХО.

Наноструктурированный алюминий является эффективным горючим, по массовой эффективности он более чем в два раза превосходит магний, хотя уступает по этому показателю бору и бериллию, но значительно превосходит последние по плотности. Бор и бериллий и продукты его горения токсичны, а бор тугоплавок и его вязкий окислительный слой блокирует доступ окислителя в зону горения. Поэтому алюминий – наиболее перспективный горючий для металлизированных смесевых составов.

Механохимическое измельчение алюминия при получении высокодисперсного порошка затруднено из-за его пластичности. Для облегчения процесса диспергирования окисленного алюминия добавляют поверхностно-активные вещества, например, стearиновую кислоту или жидкие углеводороды. Обнаружено [3], что механическая обработка алюминия с добавками графита в энергонапряженных мельницах приводит к повышению у него исключительно высокой химической активности, проявляющейся в

ускорении реакций окисления алюминия водой или кислородом. Использование высокодисперсного модифицированного алюминия в составе твердых энергетических систем обеспечивает эффективность процесса и формирование необходимых продуктов сгорания [1,4].

Настоящая работа проводилась с использованием алюминиевого порошка различной дисперсности, синтетического графита и кварцевого песка Кускудукского месторождения с содержанием кварца – 81,3% и 18,7% микроклина  $K(Si_2Al)O_6$ . Механохимическую обработку (МХО) порошков проводили в центробежно-планетарной мельнице ЦПМ "Пульверизетте 5" производитель - FRITTSCH, ускорение движения размольных шаров 40g. При измельчении варьировалось время, и соотношение используемых материалов в смеси обрабатываемых порошков.

Активность измельченного и модифицированного углеродом в механическом реакторе алюминия оценивали волюмометрическим методом по выделению водорода при взаимодействии алюминия с 20% раствором NaOH. Твердым продуктом реакции является псевдобемит  $AlO(OH)$ . Максимальная доза превращения (до 100%), т.е. максимальная реакционная способность была установлена для образцов, содержащих 20% С после 20 минут МХО. Полученная при МХО композиция представляет собой матрицу из аморфного углерода, насыщенную ультрадисперсными частицами твердого раствора углерода на поверхности алюминия.

После МХО порошковые материалы использовались в качестве реагентов шихтовой СВС-смеси при стехиометрическом соотношении компонентов  $SiO_2+Al$ , для проведения твердофазного горения. В процессе синтеза велась запись температуры с помощью пилометрического термометра марки «RaytekRaynet 3» и строились температурные кривые (термограммы) горения. Твердофазное горение в режиме СВ-синтеза является хорошей модельной системой для детального изучения роли различных добавок при разработке твердых топлив.

После МХО алюминия с графитом введение полученного порошка в шихту с диоксидом кремния способствует значительному снижению индукционного периода зажигания, повышению скорости и температуры на всех стадиях процесса горения по сравнению с не активированным горючим (рисунок 1а). Иллюстрация развития процесса горения наглядно отражает эффективность использования активированной смеси алюминия с графитом в шихте при СВ-синтезе систем (рисунок 1б).

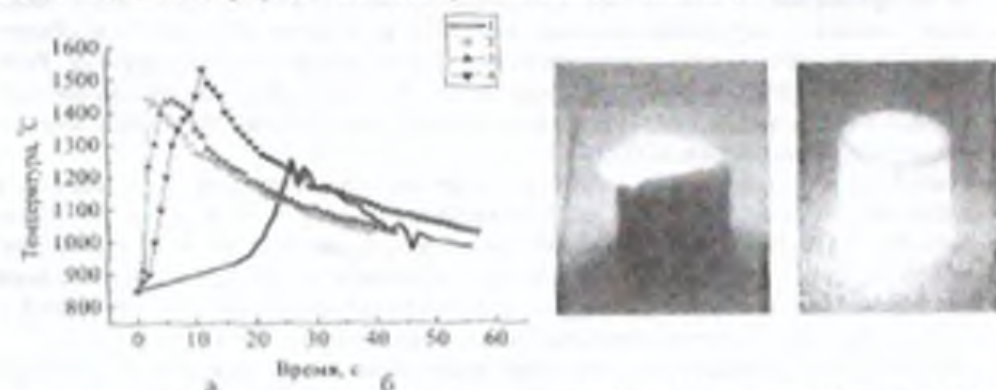


Рисунок 1 - Термограммы горения (а) системы  $SiO_2+(Al/C)$  после 20 минут МХО композита  $(Al+C)$  с 5 (1), 10 (2) и 20% (3) графита. Процесс горения СВС-образца (б)

Чтобы усилить эффект измельчения в смесь алюминия с графитом вводилось от 5 до 20% кварца. Использование полученного порошка в шихтовой смеси способствовало

оптимизации термокинетических характеристик на всех этапах процесса горения (Рисунок 2). Из представленных данных следует, что развитие процесса горения зависит от соотношения компонент в активируемой системе  $(Al+C+SiO_2)$ . Максимальная температура горения (до 1641 °С) и более продолжительный период с достаточно высокой температурой наблюдается для системы с активированным алюминием при 20% графита и с 10% либо 20% кварца, соответственно.

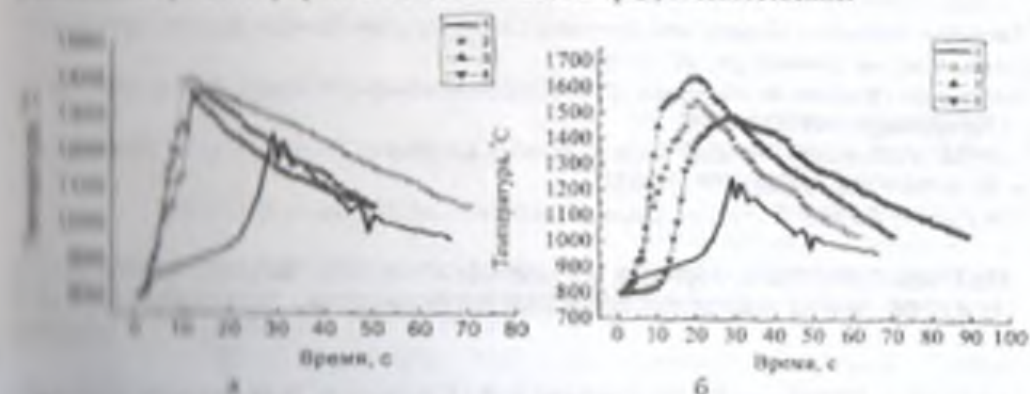


Рисунок 2 - Термограммы горения системы, содержащей активированную смесь  $(Al + C + SiO_2)$  с 10 (а) и 20% (б) графита при содержании кварца 5 (1), 10 (2) и 20% (3). Время МХО 20 минут

Волюмометрический анализ образцов после СВ-синтеза показал, что в процессе горения системы с алюминием после МХО его с графитом в присутствии диоксида кремния происходит практически полная конверсия исходных компонентов шихты и образуется по 14% карбида, 14% кремния и 6% карбида кремния, присутствуют также и небольшие количества карбид и нитрид алюминия.

Таким образом, при механохимической обработке алюминия в присутствии графита и кварца увеличивается реакционная способность смеси, что проявляется в изменении термокинетических характеристик процесса твердофазного горения и завершенности СВ-синтеза композиционной системы. Особенности развития процесса горения полученных энергетических конденсированных систем с механоактивированными ультрадисперсными композитами зависят от условий МХО и соотношения компонент в обрабатываемой смеси  $(Al + C + SiO_2)$ .

#### Литература

1. Де Лука Л.У., Галфетти Л., Северини Ф., Меда Л., Марра Ж., Ворожаков А.Б., Седой И.С., Байрак В.А. Горение смешанных твердых топлив с наноразмерным алюминием // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, №6. – С 80-94.
2. Мещеряков Н.Д., Трусов Л.И., Липовок В.И. Физические явления в ультрадисперсных топливах. – М. Атомиздат, 1984. – 224 с.
3. Стрелюцкий А.И., Клибанов И.В., Борунова И.В., Леонов А.В., Бутыгин П.Ю. Механохимическая активация алюминия. 1. Совместное измельчение алюминия и графита // Коллоидный журнал. – 2004. – Т. 66, № 6. – С.811-818.
4. Дибина Е.А., Тутубалдина И.Л., Вальцифер В.А., Стрельников В.И., Астафьева С.А., Букетов И.В. Алломеризация конденсированной фазы энергетических конденсированных систем, содержащих модифицированный алюминий // Физика горения и взрыва. – 2012. – Т. 48, №6. – С 41-46.

## Contents

### PLENARY SESSION

INTERNATIONAL COOPERATION AND FUNDAMENTAL SPACE RESEARCH Zelenyi L.M.	4
NEW AND NOVEL ENERGETIC MATERIALS FOR PROPULSION OF SPACE VEHICLES Haridwar Singh	5
TRIBOLOGY AND SPACE: HISTORY, STATE AND PROSPECTS Bronovets M.A.	6
SPACE DEBRIS HAZARD EVALUATION AND MITIGATION STRATEGIES Smirnov N.N., Kiselev A.B., Smirnova M.N., Nikitin V.F.	8
ON REDUCTION OF TWO-PHASE LOSSES OF SPECIFIC PULSE OF METALLIZED ROCKET PROPELLANTS, Assovskiy I.G., Berlin A.A., Milyokhin Yu.M.	11
MASS-SPECTROMETRY IN SPACE EXPLORATION. RETROSPECTIVE, NEW OPPORTUNITIES AND PROSPECTS Nikolaev E.N.	14
SPACE RESEARCH IN THE CRIMEAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY Rostopchina-Shabovskaya A.N.	15
GEODYNAMIC POLYGON "SIMEIZ-KATSIVELY" FOR PROBLEMS IN ASTROPHYSICS AND GEODYNAMICS Volvach A.E., Dmytrotsa A.I.	16
THE SCIENTIFIC EDUCATIONAL PROGRAM OF NANOSATELLITE DEVELOPMENT: FIRST STEPS Belokonov I.V., Kramlikh A.V., Kudryavtsev I.A., Timbai I.A.	20

### Section: TECHNOLOGIES

MECHANOCHEMICAL METHOD OF INCREASING OF DETONATION ABILITY OF EXPLOSIVE COMPOSITIONS Dolgoborodov A.Yu., Kirilenko V.G., Shevchenko A.A., Brazhnikov M.A., Streletskiy A.N.	23
DETONATION-INDUCED MICRO PARTICLES ACCELERATION AS A CONCEPT OF THEIR IMPLANTING INTO THE SUBSTRATE Ivanov M.F., Kiverin A.D.	27
CREATION OF MATERIALS FOR SPACE TECHNIQUES BY ELECTROCHEMICAL METHODS IN MOLTEN SALTS Kuznetsov S.A.	30
NEW TECHNOLOGY OF RADIATION-RESISTANT TEMPERATURE-REGULATING COATINGS FOR SPACE VEHICLES Harutyunyan V.V., Aleksanyan E.M., Baghdasaryan V.S., Bagratsyan V.V.	33
PREPARATION OF FUNCTIONALLY GRADIENT HIGH-TEMPERATURE CERAMIC MATRIX COMPOSITES USING SOL-GEL TECHNIQUE Simonenko N.P., Simonenko E.P., Sevastyanov V.G., Kuznetsov N.T.	37

INVESTIGATION OF REGULARITIES OF FORMATION OF THE COMPOSITE MATERIAL BASED ON ARAMID FIBER RUSAR-C FOR SHELL STRUCTURES ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY Sokolov V.V., Gusev S.A., Lunkina G.V., Tihonov I.V., Schetinina V.M.	40
--	----

SHS-HEAT INSULATORS BASED ON ALUMINOSILICATE-CALCIUM CERAMICS: MECHANOCHEMICAL ACTIVATION AND CONDITION OF SH-SYNTHESIS OF HEAT SHIELDING SYSTEMS Mofa N.N., Sadykov B.S., Sabayev Zh.Zh., Osserov T.B., Chernoglazova T.V., Mansurov Z.A.	44
---	----

### Section: MATERIALS

THE RESULTS OF USING A DOMESTIC COMPOSITE MATERIAL BASED ON ARAMID FIBERS IN SPACE TECHNOLOGY Milekhin Y.M., Janicki A.K., Gusev S.A., Kostin A.A.	48
--	----

BEHAVIOR OF POLYMERIC MATERIALS IN SPACE Skurat V.E.	51
--	----

SPECIFIC FEATURES OF THE KINETICS OF DIRECT AND REVERSE PHASE TRANSITIONS IN THE ENERGETIC MATERIAL FOX-7 Zakharov V.V., Chukanov N.V., Chervonnyi A.D., Vozzhikova S.A., Korsounskii B.L., Shu Yuanjie	54
---	----

PHASE INTERACTIONS AND DISSOLUTION DYNAMICS OF HEXAAZAIOWURTZINATE (HNIW) WITH DIFFERENT MORPHOLOGY IN NITROPLASTICIZERS Kalmykov P.I., Sidorov K.A., Artyomova Ye.V.	57
---	----

THE PECULIARITIES OF COMBUSTION OF POWER CONDENSED SYSTEMS WITH MECHANICALLY ACTIVATED METALLIZED COMPOSITES Mofa N.N., Sadykov B.S., Bakkara A.E., Mansurov Z.A.	61
---	----

ULTRA-HIGH-TEMPERATURE CERAMIC MATERIALS HfB <sub>2</sub> -SiC (10, 15 AND 20 VOL %) AND THEIR BEHAVIOR UNDER LONG-TERM EXPOSURE TO DISSOCIATED AIR STREAMS Simonenko E.P., Gordjev A.N., Simonenko N.P., Kolesnikov A.F., Papynov E.K., Shichalin O.O., Avramenko V.A., Sevastyanov V.G., Kuznetsov N.T.	64
--	----

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FRAGMENTATION OF SPHERICAL ALUMINIUM PROJECTILES ON STEEL MESH BUMPERS AT THE VELOCITY OF 5 ... 7 KM/S Kalmykov P.N., Kolchev S.V., Lapichev N.V., Mikhaylov I.A., Myagkov N.N., Nomakonova V.N., Salnikov A.V., Shamikhin T.A.	68
--	----

### Section: ROCKET ENGINES AND POWER SYSTEMS

NUMERICAL SIMULATION OF A MIXED SOLID FUEL ROCKET ENGINE DISPOSAL Korepanov M.A., Eremin V.N., Shaklein A.A.	71
---	----

KINETIC ASPECTS OF THE AUTOIGNITION OF HYDROGEN-OXYGEN MIXTURES IN PROPULSION POWER PLANTS Vlasov P.A., Medvedev S.P., Smirnov V.N., Tereza A.M., Khomik S.V.	74
---	----