

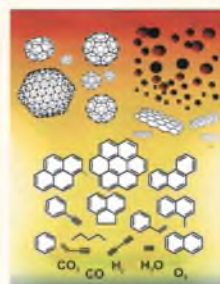
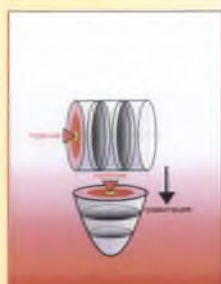
Ministry of Education & Science of the Republic of Kazakhstan / Қазақстан Республикасы Білім және Ғылым Министрлігі  
Министерство Образования и Науки Республики Казахстан

al-Farabi Kazakh National University / ал-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті  
Казахский национальный университет им. аль-Фараби



# Proceedings of the Joint International VIII Symposium “Combustion & Plasmochemistry”

The Institute of Combustion Problem. Институт проблем горения. МОН РК - Комитет Науки



and

# Scientific & Technical Conference “Energy Efficiency-2015”

National Academy of Science of Ukraine / The Gas Institute  
Українаның Ұлттық Ғылыми академиясы / Газ Институты  
Национальная академия наук Украины / Институт газа



Бірлескен VIII “ЖАНУ ЖӘНЕ ПЛАЗМОХИМИЯ” халықаралық симпозиумы  
мен “ЭНЕРГИЯЛЫҚ ТИІМДІЛІК-2015” ғылыми техникалық конференциясы

Совместный VIII международный симпозиум “ГОРЕНИЕ И ПЛАЗМОХИМИЯ”  
и научно-техническая конференция “ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ-2015”

September, 16-18, 2015, Almaty, Republic of Kazakhstan

VIII Международный симпозиум  
«Горение и плазмохимия»  
Международная научно-техническая конференция  
«Энергоэффективность-2015»

---

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 412 | ТОВАРНАЯ ПРОДУКЦИЯ ИЗ БЕНЗИНОВОЙ ФРАКЦИИ<br>КАРАЖАНБАССКОЙ НЕФТИ<br>Родивилов С.М., Касымбеков А.Б., Аубакиров Е.А., Батырбаев А.Т.....   | 452 |
| 416 | АНАЛИЗ СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА<br>УГЛЕРОДНОЙ ПЛЕНКИ<br>Ю.А. Рябикин, В.В. Клименов, Б. А. Байтимбетова, В.Б. Глазман, Б.А. Рақыметов,<br>А.Т. Исова, С.Ж. Токмолдин.....  | 457 |
| 422 | ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОКСИДА ГРАФЕНА В ТРЕХМЕРНЫЕ ПОРИСТЫЕ<br>СТРУКТУРЫ<br>Ф.Р. Султанов, А.А. Уразгалиева, Б. Бакболат, З. Азизов, Байтимбетова Б.А,<br>З.А. Мансуров, Shin-Shem Pei.....   | 459 |
| 426 | РАЗРАБОТКА УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОРБЦИИ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ<br>Сейтжанова М.А., Керимкулова М.Р., Мамбетова М, Азат С.,<br>Керимкулова А.Р., Мансуров З.А.....   | 463 |
| 430 | ФРАКТАЛЬНОСТЬ МИКРОЧАСТИЦ ИЗ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА<br>Н.А. Смоланов .....   | 467 |
| 4   | ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОКРАЩЕНИЯ РАСХОДА<br>И ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ЕГО ЗАМЕЩЕНИИ<br>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ГАЗАМИ<br>Сорока Б.С., Бершадский А.И., Воробьев Н.В.....  | 471 |
| 48  | РАЗРАБОТКА И ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛОТЫ ДЛЯ<br>СРЕДНЕ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ<br>Сорока Б.С., Шандор П., Воробьев Н.В., Згурский В.А., Бершадский А.И.....   | 475 |
| 40  | ГОРЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА С УВЛАЖНЕННЫМ ОКИСЛИТЕЛЕМ – НОВОЕ<br>НАПРАВЛЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА<br>Сорока Б.С., Згурский В.А.....  | 479 |
| 8   | ГОРЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ<br>МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ<br>Б.С. Садыков, А. Е. Баккара, Л.Т. Де Лука, Н.Н. Мофа, З.А. Мансуров.....   | 483 |
| 6   | ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИСПАРЕНИЯ И СЖИГАНИЯ ОБЕССЕРЕННОЙ<br>КАШАГАНСКОЙ НЕФТИ В КАЧЕСТВЕ МЕТОДА ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ В<br>КАЗАХСТАНСКОМ СЕКТОРЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ<br>Смагулова Г.Т., Лесбаев Б.Т., Атаманов М.К., Турсынбек С., Абдикаримов М.С.,<br>Бодыков Д.У., Нуртаева Г.К., Кулекеев Ж.Ж., Мансуров З.А..... | 487 |



**ГОРЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ  
МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ**

**Б.С. Садыков<sup>1</sup>, А. Е. Баккара<sup>1</sup>, Л.Т. Де Лука<sup>2</sup>, Н.Н. Мофа<sup>1</sup>, З.А. Мансуров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт проблем горения, Богенбай батыра 172, Алматы 050012, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Миланский политехнический университет, I-20158 Милан, Италия,

e-mail: sadykoff\_baha@mail.ru

**Аннотация**

Проведен термокинетический анализ горения конденсированных систем с механически активированным алюминием. Определены оптимальные условия обработки алюминия в присутствии графита и диоксида кремния в механическом реакторе. Показано, что металлические частицы в таком композите имеют оптимальный размер кристаллитов, а поверхностный слой частиц представляет собой твердый раствор углерода в алюминии, что в комплексе и определяет их высокую реакционную способность.

**Введение**

В настоящее время горению систем металлизированных ультрадисперсным алюминиевым порошком уделяется большое внимание. Интерес к таким смесям обусловлен тем, что присутствие металлического компонента в составе горючего снижает время задержки воспламенения и существенно улучшает термокинетические характеристики системы [1]. Для повышения энергоемкости конденсированных порошковых 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 в объеме частицы [2] и формированием новых поверхностных структур. Роль поверхностных структур исключительно важна при создании порошковых модифицированных материалов с заданным комплексом свойств при использовании любого метода, в том числе и МХО.

Механическое измельчение алюминия при получении высокодисперсного порошка затруднено из-за его пластичности. Для облегчения процесса диспергирования пластичного алюминия добавляют поверхностно-активные вещества, например, стеариновую кислоту или жидкие углеводороды. Обнаружено [3], что механическая обработка алюминия с добавками графита в энергонапряженных мельницах приводит к появлению 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].

**Экспериментальная часть**

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  $K(Si_3Al)O_8$ . Механохимическую обработку (МХО) порошков проводили в центробежно-планетарной мельнице ЦПМ



“Пулверизетте 5” производитель - FRITSCH, ускорение движения размольных шаров 400. 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 % C после 20 минут МХО. Полученная при МХО композиция представляет собой смесь высокодисперсных частиц алюминия и аморфного углерода.

После МХО порошковые материалы использовались в качестве реагентов шихтовой СВС-смеси при стехиометрическом соотношении компонентов  $SiO_2+Al$ , для проведения технологического горения. В процессе синтеза велась запись температуры с помощью пирометрического термометра марки «Raytek Raynger 3i» 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.

### Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены результаты рентгенофазового анализа (РФА) алюминисодержащего порошка ПА4 после механической активации совместно с графитом при варьировании количества последнего в обрабатываемой смеси и времени МХО. При содержании в смеси 20 % и выше углерода и времени обработки от 40 минут и более активированная смесь воспламеняется на воздухе с образованием карбида и нитрида алюминия.

Таблица 1 – Состав механохимически активированной композиции Al/C

| Состав смеси | Время МХО | Al,% | C,% | $Al_4C_3$ | AlN  |
|--------------|-----------|------|-----|-----------|------|
| Al+10%C      | 20        | 99,2 | 0,8 |           |      |
| Al+20%C      | 20        | 94,2 | 5,8 |           |      |
| Al+10%C      | 40        | 99,9 |     |           |      |
| Al+20%C      | 40        | 40,6 | 0,5 | 45,3      | 2,1  |
| Al+30%C      | 40        | 40,1 | 4,0 | 34,9      | 20,9 |
| Al+10%C      | 60        | 99,9 |     |           |      |
| Al+20%C      | 60        | 48,9 |     | 44,6      | 6,4  |

Чтобы предотвратить окисление частиц алюминия кислородом воздуха после МХО и оценить изменения, действительно связанные с механическим воздействием, образцы диспергированной смеси (Al+C) пассивировались гексаном. Результаты РФА (таблица 2) показали, что в процессе измельчения количество графита, т.е. кристаллического углерода существенно уменьшается. Основная его часть аморфизуется. Изменение параметров решетки алюминия от  $4,041 \text{ \AA}$  до  $4,054 - 4,056 \text{ \AA}$  свидетельствует о внедрении углерода в решетку алюминия, т.е. об образовании твердого раствора. При этом с изменением количества углерода в смеси от 30 до 20% происходит уменьшение размера кристаллитов. Чтобы усилить эффект измельчения, в смесь алюминия с графитом вводилось от 5 до 20% кварца.

VIII Международный симпозиум  
«Горение и плазмохимия»  
Международная научно-техническая конференция  
«Энергоэффективность-2015»

Таблица 2 - Состав механохимически активированной композиции Al/C, пассивированной гексаном, размер кристаллитов и параметр решетки алюминия

| Состав смеси                    | Время МХО | Al, % | C, % | Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> | L, Å Al | a, Å Al        |
|---------------------------------|-----------|-------|------|--------------------------------|---------|----------------|
| Al+20%C                         | 40        | 98,4  | 0,7  | 0,8                            | 480     | 4,054 ± 0,003  |
| Al+30%C                         | 40        | 97,7  | 2,3  |                                | 600     | 4,055 ± 0,0002 |
| Al+20%C+<br>10%SiO <sub>2</sub> | 40        | 97,9  | 2,0  |                                | 348     | 4,056 ± 0,001  |

После МХО алюминия с графитами 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).

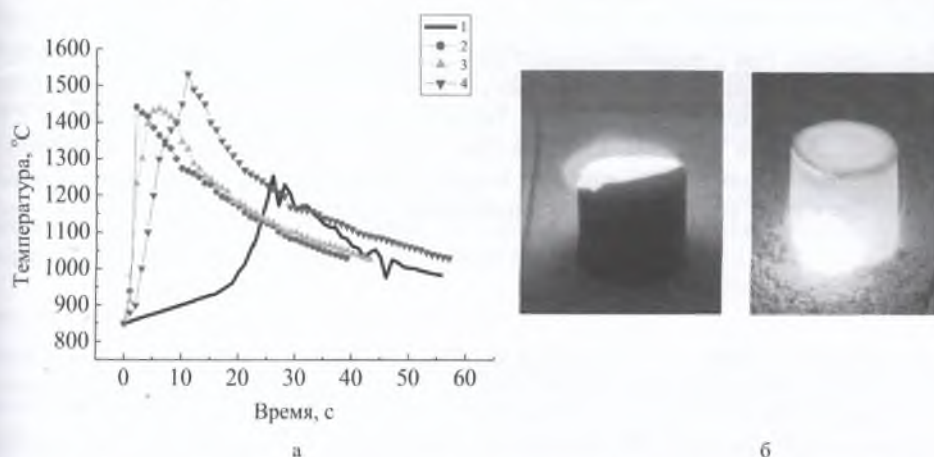


Рис. 1 – Термограммы горения (а) системы SiO<sub>2</sub> +(Al/C) после 20 минут МХО композита (Al+C) с 5 (2), 10 (3) и 20 % (4) графита. Процесс горения СВС-образца (б)

Развитие процесса горения зависит от соотношения компонент в активируемой системе (Al+C+SiO<sub>2</sub>). Максимальная температура горения (до 1641 °С) наблюдается для системы с активированным алюминием при 20 % графита и 10 % кварца. А наиболее продолжительное развитие процесса горения с достаточно высокой температурой имеет место при увеличении кварца в активируемой смеси до 20 %.

Рентгенофазовый анализ образцов после СВ-синтеза показал, что в процессе горения систем с алюминием после МХО его с графитом в присутствии диоксида кремния происходит практически полная конверсия исходных компонентов шихты и образуется до 75% корунда, 14% кремния и 6% карбида кремния, присутствуют также в небольшом количестве карбид и нитрид алюминия.



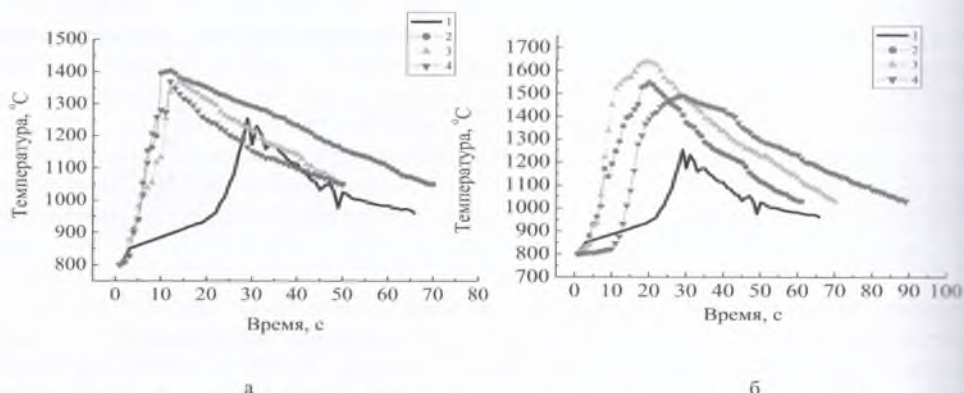


Рис. 2 – Термограммы горения системы, содержащей активированную смесь (Al+C+SiO<sub>2</sub>) с 10 (а) и 20% (б) графита при содержании кварца 5 (2), 10 (3) и 20% (4). Время МХО 20 минут

## Заключение

Таким образом, при механохимической обработке алюминия в присутствии графита и кварца повышается реакционная способность смеси, что проявляется в изменении термокинетических характеристик процесса твердофазного горения и завершенности синтеза композиционной системы. Особенности развития процесса горения полученных энергетических конденсированных систем с механоактивированными металлизированными композитами зависят от условий МХО и соотношения компонент в обрабатываемой смеси (Al+C+SiO<sub>2</sub>).

## Литература

- 1 Де Лука Л.Т., Галфетти Л., Северини Ф., Меда Л., Марра Ж., Ворожцов А.Б., Селви В.С., Бабук В.А. Горение смесевых твердых топлив с наноразмерным алюминием // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, №6. – С 80-94.
- 2 Морохов И.Д., Трусов Л.И., Липовок В.Н. Физические явления в ультрадисперсных средах. – М.: Атомиздат, 1984. – 224 с.
- 3 Стрелецкий А.Н., Колбанев И.В., Борунова И.В., Леонов А.В., Бутягин П.Ю. Механохимическая активация алюминия. 1. Совместное измельчение алюминия и графита // Коллоидный журнал. - 2004. – Т. 66, № 6. - С.811-818.
- 4 Лебедева Е.А., Тутубалина И.Л., Вальцифер В.А., Стрельников В.Н., Астафьева С.А., Бекетов И.В. Агломерация конденсированной фазы энергетических конденсированных систем, содержащих модифицированный алюминий // Физика горения и взрыва. – 2012. – Т. 48, №6. – С 41-46.

## Abstract

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 composites have a minimum size 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.