

УДК 536.46

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАГИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ В СОСТАВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ПРЯМОТОЧНЫХ ГИДРОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Х.-Т. Хуан, М.-Ш. Цзоу, С.-Я. Го, Ж.-Цз. Ян, Ю.-К. Ли

Пекинский технологический институт, 100081 Пекин, Китай, zoumeishuai@gmail.com

Для моделирования двухстадийного горения гидрореагирующего топлива в прямоточном гидро-реактивном двигателе использованы камера сгорания высокого давления и реактор металл/пар. В качестве металлической добавки исследованы порошки алюминия, магния, алюмомагниевого сплава 50/50 (АМ) и алюмомагниевого механосплава 50/50 (b-АМ), полученного в шаровой мельнице. Порошки характеризовали с использованием сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового и термогравиметрического анализов. Определена эффективность реагирования Al в исходном (сырьевом) металле в горячем паре, а также при двухстадийном горении топлива. Результаты исследований показали, что Mg и Al в составе сплавов АМ и b-АМ полностью реагируют в воздухе при нагревании до температуры 950 °С. По данным рентгенофазового анализа продукты реакции обоих сплавов в горячем паре содержали оксид магния MgO и шпинель Al₂MgO₄, в рентгенограммах также зарегистрированы пики дифракции Al. Эффективность реагирования Al с горячим паром в составе сплавов АМ и b-АМ была намного выше, чем в случае чистых порошков Al. Топливные композиции на основе полибутадиена с концевыми гидроксильными группами (НТРВ), такие как НТРВ-АР-(b-АМ)-Mg и НТРВ-АР-АМ-Mg, продемонстрировали лучшую эффективность реагирования Al, чем системы НТРВ-АР-Al-Mg и НТРВ-АР-Al.

Ключевые слова: гидрореагирующее топливо, алюминий, эффективность сгорания, водный прямоточный гидрореактивный двигатель.

ВВЕДЕНИЕ

Реагирование металла с водой приводит к выделению тепловой энергии и большого количества водорода [1, 2]. Прямоточный гидрореактивный двигатель, схематично показанный на рис. 1, — новый тип системы реактивного движения, в которой используются высокоэнергетическое гидрореагирующее металлизированное топливо в качестве горючего и морская вода в качестве окислителя. Устройство имеет высокий удельный импульс и тягу и в будущем может стать лучшей двигательной установкой для ультрабыстроходного подводного оружия [3, 4].

Прямоточный гидрореактивный двигатель обладает большим потенциалом для увеличения удельного импульса тяги вследствие отсутствия окислителя на борту и использования забортного окислителя. Имеется ряд металлов, реагирующих с водой: Mg, Al, Li, Be.

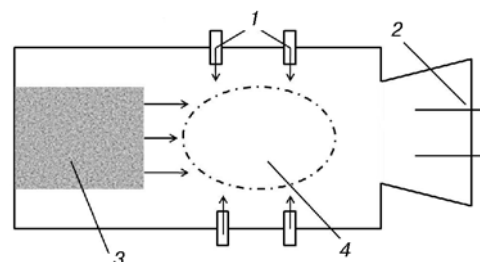


Рис. 1. Схема прямоточного твердотопливного гидрореактивного двигателя:

1 — ввод воды, 2 — продукты горения, 3 — шашка твердого топлива, 4 — зона горения

Принимая во внимание потенциальную химическую энергию, требования к хранению и низкую токсичность, в качестве реагирующих систем металл/вода можно предложить Mg/H₂O, Al/H₂O или Mg—Al/H₂O [5]. Алюминий широко применяется как добавка к энергетическим материалам и топливу для подводного реактивного движения. Однако эффективное сжигание Al осложнено наличием на его поверхности естественного защитного оксидного слоя

[6]. Кроме того, агломерация частиц Al во время первичного процесса горения топлива накладывает ограничения на скорость реагирования частиц Al с водой, что уменьшает эффективность вторичного горения при работе проточного гидрореактивного двигателя.

Современные исследования сосредоточены на фундаментальных аспектах реагирования Al и H₂O. В [7] исследовано воспламенение частиц Al в среде неподвижного водяного пара и показано, что температура воспламенения Al может быть значительно ниже, чем температура плавления оксидной пленки, покрывающей частицу. Известны экспериментальные исследования скорости горения частиц Mg в водяном паре в диффузионно-контролируемом режиме [8, 9]. В [10] изучено воспламенение сплавов Al/Mg в среде водяного пара и аргона. В [11] обнаружено, что характеристики горения смесей высококалорийных металлов с водой зависят прежде всего от степени окисления металлического порошка. Термическое разложение гидрореагирующего топлива на основе магния исследовано в [12]. В [13] исследованы характеристики горения порошка Al в водяном паре при атмосферном давлении. В [14] изучено влияние жидкой и газообразной воды как окислителя при горении как микронных, так и наноразмерных частиц Al. В [15, 16] исследовано термическое разложение и приведены данные по характеристикам пламени первичного горения обогащенного горючим металлизированного топлива.

В литературе опубликовано множество результатов фундаментальных исследований процессов реагирования металла с водой, кислородом, а также в составе твердого топлива [17–25]. Однако лишь в некоторых работах затрагиваются вопросы эффективности реагирования Al в реакции с водой; еще меньше работ посвящено исследованию горения гидрореагирующего топлива.

Данная работа направлена на изучение реагирования алюминия с водой в гидрореактивных топливных системах как на основе чистого металла, так и на основе топлива с перхлоратом аммония (AP). Для исследования характеристик горения использованы камера сгорания высокого давления и прозрачная печь, питаемая водяным паром. Были проанализированы и охарактеризованы продукты горения, затем вычислена эффективность реагирования Al и проведено сравнение композиций.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Приготовление и рецептура гидрореактивных топливных композиций

Порошки Mg и Al, а также алюмомагниевого сплава AM 50/50 имели размер частиц $30 \div 100$ мкм. Полученный в шаровой мельнице алюмомагниевого механосплав b-AM был изготовлен из порошков алюминия и магния крупностью –325 меш (мельче 40 мкм), взятых в соотношении 50/50. Использовали мельницу Simoloyer CM01-21 с объемом камеры 2 л. Были изучены четыре типа смеси топлива: (1) НТРВ-AP-(b-AM)-Mg, (2) НТРВ-AP-AM-Mg, (3) НТРВ-AP-Al-Mg и (4) НТРВ-AP-Al. Все образцы имели одинаковое суммарное массовое содержание твердых компонентов 85 %, из них 60 % приходилось на металл. Содержание Al в композициях 1–3 составляло 20 %, в топливе 4 — 60 %. Рецептуры исследованных топливных композиций представлены в табл. 1.

Все компоненты, за исключением отверждающего агента, смешивали в вертикальном миксере в течение 10 мин при температуре 60 °С, затем в вакууме в течение 3 ч. Свежеприготовленную топливную суспензию в вакууме заливали в формы и отверждали в течение 7 сут при 50 °С.

Реагирование с горячим паром

На рис. 2 показана упрощенная схема экспериментальной установки. Тщательно взвешенную пробу исследуемого материала массой $m_{total} = 500$ мг помещали в тигле из оксида алюминия в прозрачную трубчатую печь.

Таблица 1
Компонентный состав образцов исследованных композиций

Номер образца	Массовое содержание, %				
	НТРВ/TDI-AP	Mg	Al	AM	b-AM
1	40	20	—	—	40
2	40	20	—	40	—
3	40	40	20	—	—
4	40	—	60	—	—

Примечания. НТРВ — полибутadiен с концевыми гидроксильными группами, TDI — толуол-2,4-диизоцианат.

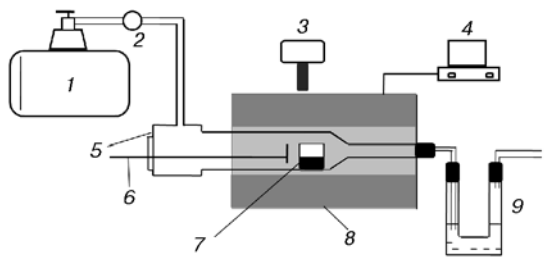


Рис. 2. Схема установки-реактора с горячим паром:

1 — генератор пара, 2 — расходомер, 3 — высокоскоростная кинокамера, 4 — терморегулятор, 5 — трубка из оксида кремния, 6 — стержень для ввода образца, 7 — тигель из оксида алюминия, 8 — прозрачная трубчатая печь, 9 — U-образный затвор (служит для снижения скорости потока пара)

Температуру печи контролировали терморегулятором. Пар поступал в печь при температуре 900 °С в течение 30 мин. Твердые продукты реагирования оставались в тигле.

Двухстадийное сжигание гидрореактивного топлива

Для моделирования первичного горения гидрореактивного топлива использовали установку с камерой высокого давления с окнами, схема которой показана на рис. 3. Образец отвержденного топлива массой m_{total2} , помещенный внутрь камеры высокого давления, поджигали с нижнего торца никромовой проволокой, нагреваемой переменным электрическим

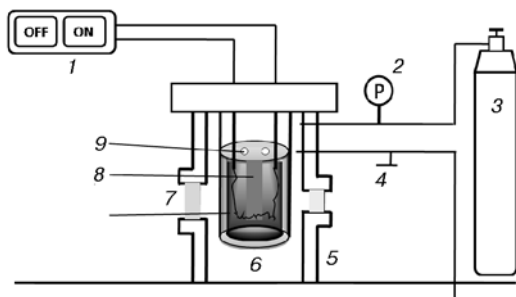


Рис. 3. Схема установки высокого давления для первичного сжигания:

1 — система электроподжига, 2 — датчик давления, 3 — баллон с аргоном, 4 — выпускной клапан, 5 — корпус камеры высокого давления, 6 — устройство (резервуар) для сбора продуктов, 7 — окно, 8 — образец с проволокой поджига, 9 — отверстие

Таблица 2
Эффективность реагирования алюминия (η) с горячим паром в сплавах и порошке

Исходный металл	η , %
b-AM	90.6
AM	83.8
Al	25.1

током с напряжением 30 В. Давление в камере создавали аргоном и поддерживали на уровне 3 МПа с помощью клапана. Камера снабжена устройством для сбора остатков, которое представляет собой резервуар из нержавеющей стали с несколькими отверстиями в крышке. После эксперимента резервуар с собранными продуктами первичного горения извлекали, и продукты подвергали воздействию горячего пара в установке, схематично показанной на рис. 2, чтобы затем смоделировать вторичное горение. Твердые продукты вторичного сгорания также подлежали сбору и изучению.

Известно [26], что в газообразных продуктах горения топлива содержатся HCl и H₂O, взаимодействие с которыми приводит к расходованию Al на дне пробоотборного резервуара. В экспериментах подобного типа такое последующее реагирование обычно подавляют с помощью гасящей жидкости. Мы не использовали гасящую жидкость, поэтому значения, представленные в табл. 2, немного выше истинных. Однако можно надеяться, что тенденции, прослеживаемые в данных табл. 2, заслуживают доверия.

Определение эффективности реагирования алюминия

Морфологию сырьевых металлических порошков исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа FE-SEM S4800 (напряжение 15 кВ). Фазовый состав каждого образца определяли рентгенофазовым методом с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра X'Pert PRO MPD с CuK α -излучением. Термогравиметрический анализ проводили на аппарате NETZSCH F209 в диапазоне температур 40 ÷ 950 °С при скорости нагрева 10 °С/мин с продувкой воздухом с расходом \approx 50 мл/мин.

На рис. 4 показана схема установки для оценки количества непрореагировавшего Al.

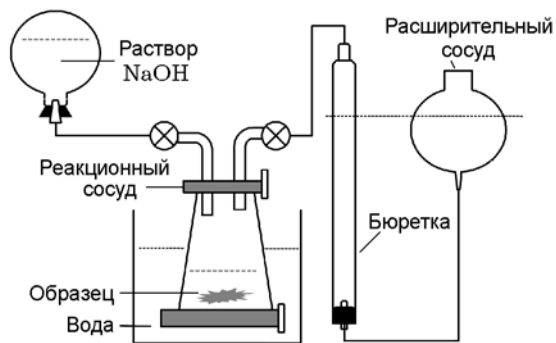


Рис. 4. Схема установки для определения количества непрореагировавшего алюминия

Образец помещали в реакционный сосуд, соединенный с бюреткой. Уровень воды в бюретке записывали до и после реагирования пробы с раствором щелочи NaOH, который вводили в реакционный сосуд. Ошибки, обусловленные разницей давления в начале и конце эксперимента, исключали путем перемещения расширительного сосуда вниз перед снятием конечного показания уровня. Это гарантирует, что столб газа в верхней части бюретки находится при атмосферном давлении. Большой объем воды в контейнере предотвращает значимое повышение температуры во время реакции, что позволяет устранить ошибку, обусловленную испарением воды. По разности измеренных уровней можно определить объем выделившегося в результате реакции водорода и, соответственно, количество молей израсходованного Al и содержание непрореагировавшего алюминия в образце. Эффективность (полнота) реагирования Al вычисляется по формуле

$$\eta = 1 - \frac{m_{unAl}}{m_{total} X_{Al}} \cdot 100 \%,$$

где m_{total} — масса исходного металла (m_{total1}) или топлива (m_{total2}), X_{Al} — содержание Al в исходном металле или в топливе, %, m_{unAl} — масса непрореагировавшего Al в продуктах горения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология и фазовый состав исходных металлов

На рис. 5 представлены изображения частиц порошков исходных металлов, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM). Частицы Mg и AM имеют сферическую форму, более правильную, чем

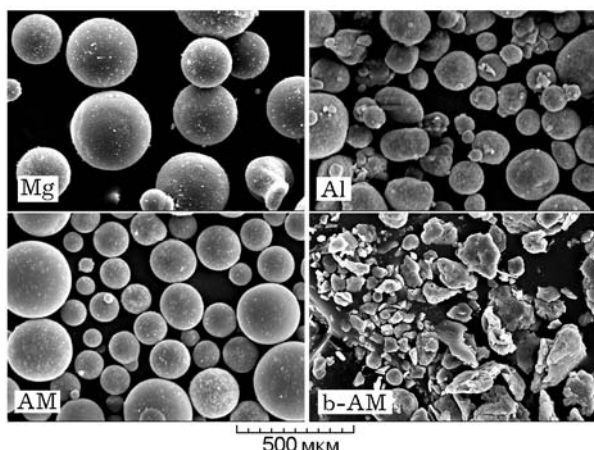


Рис. 5. SEM-изображения частиц исходных металлов

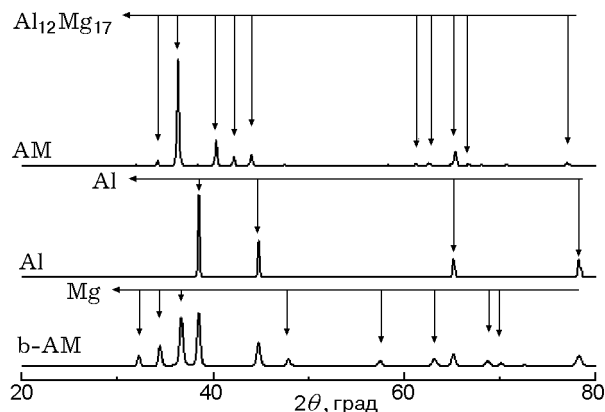


Рис. 6. Дифрактограммы порошков исходных металлов (данные рентгенофазового анализа)

у частиц Al. Частицы измельченного механосплава b-AM имеют неправильную форму и очень широкое распределение по размерам.

На рис. 6 приведены дифрактограммы, полученные при рентгенофазовом анализе. В начальном порошке алюминия ясно виден набор пиков, соответствующих Al. В случае сплава AM наблюдаются рефлексы $Al_{12}Mg_{17}$. Механосплав b-AM демонстрирует наборы пиков, соответствующих Al и Mg, однако интерметаллид $Al_{12}Mg_{17}$ не регистрируется.

Термические свойства исходных металлов

Для исследования реакционной способности исходных порошков в воздухе использовали метод термогравиметрического анализа. Результаты представлены на рис. 7. Все исходные металлические порошки в определенной степе-

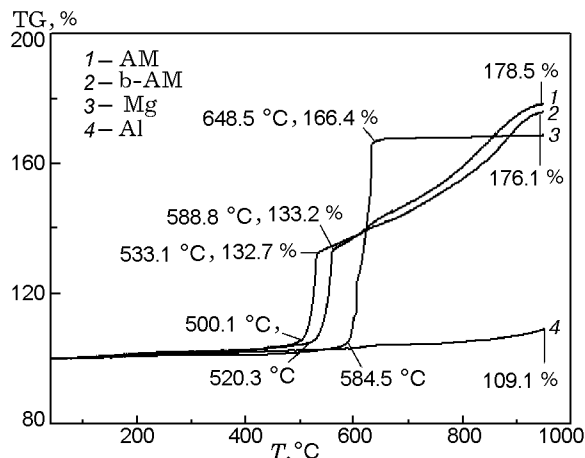


Рис. 7. Записи увеличения массы образцов исходных металлических порошков при окислении в воздухе (данные термогравиметрического анализа)

ни реагировали с воздухом, в том числе и Al. Как и ожидалось, порошки Mg и сплавы были более активны, чем Al. На записи изменения массы (TG) магния регистрируется одинокое резкое увеличение (на 66.4 %) в диапазоне температур $584.5 \div 648.5$ °C, обусловленное обычным окислением металла. Масса порошка Al увеличивается лишь на ≈ 9.1 %, поскольку оксидная оболочка препятствует развитию реакции окисления. Интересно, что на кривых TG обоих алюмомагниевого сплава, AM и b-AM, имеется по два участка, на которых масса образца растет. Для AM масса увеличилась на 33.2 % при температурах $520.3 \div 558.8$ °C и на 45.3 % при $558.8 \div 950$ °C. Для b-AM рост массы составил 32.7 % при температурах $500.1 \div 533.1$ °C и 43.4 % при $533.1 \div 950$ °C. Первое, более резкое, увеличение массы образца связано с окислением Mg, второе — с окислением Al. Последнее, вероятно, происходит из-за термического расширения, которое ломает оксидную оболочку и приводит к появлению свежего Al и его окислению.

Анализ продуктов реагирования исходных металлических порошков с горячим паром

Фазовый состав продуктов реагирования исходных металлов в горячем паре был проанализирован рентгенофазовым методом. Примеры дифрактограмм продуктов горения AM, b-AM и Al показаны на рис. 8. Дифрактограмма продуктов реагирования Al содержит пи-

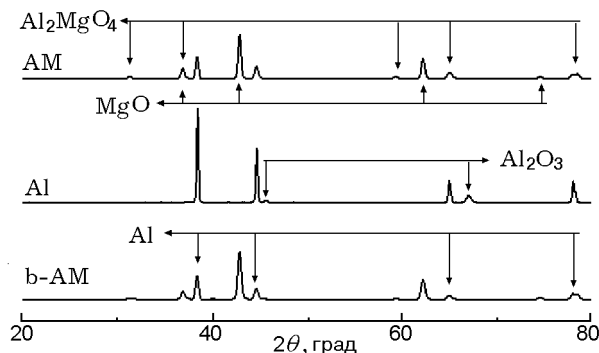


Рис. 8. Дифрактограммы (спектры рентгенофазового анализа) продуктов реагирования исходных материалов (AM, Al и b-AM) с горячей водой (стрелками указаны характерные пики основных соединений)

ки Al и Al_2O_3 . При этом, как и ожидалось, относительная интенсивность пиков Al велика, что свидетельствует о невысокой полноте реакции. В дифрактограммах продуктов реагирования сплавов AM и b-AM имеются пики, соответствующие оксиду MgO, шпинели Al_2MgO_4 и металлическому алюминию. Отметим, что непрореагировавший Al в действительности присутствовал во всех образцах продуктов реакции.

Наблюдаемые фазовые составы продуктов реакции показывают, что активность реагирования Al в порошках сплава отлична от его активности в порошке алюминия: эффективность реагирования в сплавах выше (см. табл. 2). Это также проявляется в образовании шпинели Al_2MgO_4 и оксида MgO, в то время как Al_2O_3 при реагировании сплавов не образуется.

Данные об эффективности реагирования Al в исходных металлических порошках с горячим паром представлены в табл. 2. Наиболее высокая эффективность регистрируется у порошка b-AM, самая низкая — у порошка чистого Al. Порошки b-AM имели большую удельную поверхность, чем порошки AM и Al, и оксидная оболочка частиц b-AM могла быть нарушена во время помола. Поэтому свежий порошок b-AM может активно реагировать с горячим паром. Кроме того, на поверхности расплава AM формируется пористый слой Al_2MgO_4 , который, по предположению, не оказывает сопротивления окислению и горению [27]. Поверхность частиц порошка Al, в противоположность этому, защищена оксидной оболочкой, которая препятствует полному реагированию металла.

Анализ продуктов сгорания гидрореактивного топлива

Продукты, собранные после двухстадийного горения образцов топлив 1–4 (см. табл. 1), были подвергнуты рентгенофазовому анализу. Соответствующие дифрактограммы показаны на рис. 9. Непрореагировавший Al был обнаружен в продуктах сгорания всех образцов, в то время как Mg реагировал полностью. Сравнение показало, что фазовый состав продуктов сгорания образцов 1–3 подобен. Все они содержали MgO, шпинель Al_2MgO_4 , Al_4C_3 и Al. Присутствие Al_4C_3 указывает на то, что Al может реагировать с продуктами разложения НТРВ/АР во время первичного сгорания. Мы считаем это наблюдение заслуживающим внимания. В дифрактограммах продуктов горения образца 4 имеются пики Al и Al_2O_3 , причем относительная интенсивность пиков Al намного выше, что указывает на низкую полноту реагирования.

Вычисленные по экспериментальным данным значения эффективности реагирования Al при горении топлив 1–4 представлены в табл. 3. Результаты подобны данным, полученным при оценке эффективности реагирования исходных металлических порошков с горячим паром, но Al при горении топлива реагирует более полно. Наибольшая эффективность сгорания Al достигнута для топлива НТРВ-АР-(b-AM)-AM, наименьшая — для топлива НТРВ-АР-Al. Эф-

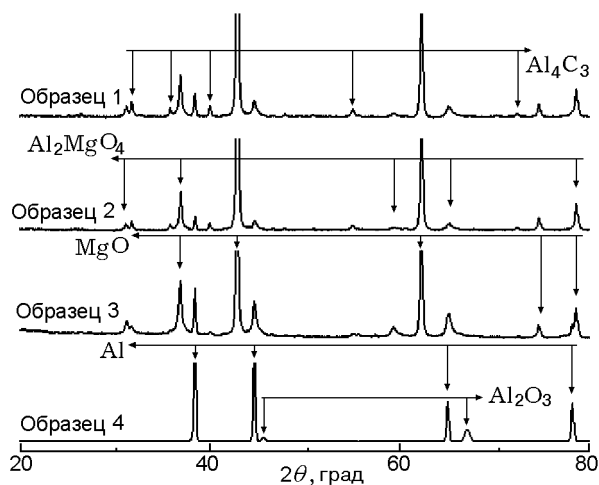


Рис. 9. Дифрактограммы (спектры рентгенофазового анализа) продуктов двухстадийного сгорания образцов 1–4

Таблица 3

Эффективность реагирования
алюминия в образцах топлив

Номер образца	η , %
1	93.6
2	90.2
3	86.3
4	67.3

фективность реакции Al в топливных композициях 1 и 2 со сплавами выше, чем в композициях 3 и 4 с чистым Al. Кроме того, топливо, содержащее порошок Mg (образцы 1–3), сгорало более полно, чем топливо 4 без Mg, так что присутствие Mg улучшает сгорание Al.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены предварительные результаты исследования эффективности реагирования Al при сгорании в составе гидрореактивного топлива. Четыре металлических порошка (b-AM, AM, Al, Mg) анализировали методами сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового и дифференциального термического анализом. Продукты сгорания анализировали рентгенофазовым методом, а эффективность реагирования Al определяли по выделению водорода в реакции доокисления непрореагировавшего металла. Частицы порошков AM и Mg имели правильную сферическую форму, более совершенную, чем у частиц Al. Частицы порошка b-AM имели неправильную форму и очень широкое распределение по размерам. Данные дифференциального термического анализа показывают, что Mg и Al могли полностью прореагировать в воздухе в сплавах (b-AM или AM). В продуктах реакции сплавов b-AM и AM с горячим паром рентгенофазовым методом обнаружены дифракционные пики, соответствующие MgO, шпинели Al_2MgO_4 и Al; в продуктах реакции порошков Al обнаружены Al и Al_2O_3 .

Эффективность реакции Al в составе композиций b-AM и AM с горячим паром была намного выше, чем у порошка Al. Полнота реагирования Al в топливных композициях НТРВ-АР-(b-AM)-Mg и НТРВ-АР-AM-Mg оказалась выше, чем в композициях НТРВ-АР-Al-Mg и НТРВ-АР-Al. Алюминий в композициях, содержащих Mg, сгорал более полно, чем в компози-

циях без Mg. Наконец, порошки Al в составе топлива реагировали более полно, чем в горячем паре.

В итоге следует отметить, что высокая эффективность реакции Al указывает на потенциальные преимущества сплавов b-AM и AM для практического применения в гидрореактивных топливах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естествознания Китая (проект № 51106010) и Молодежного фонда пороховой и детонаторной промышленности Китая.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zou M. S., Yang R. J., Guo X. Y., Huang H. T., He J. Y., Zhang P.** The preparation of Mg-based hydro reactive materials and their reactive properties in seawater // Intern. J. Hydrogen Energy. — 2011. — N 36. — P. 6478–6483.
2. **Lee W. M.** Aluminum powder/water reaction ignited by electrical pulsed powder // Research Rep. NSWC. — AD-A269223. — 1993.
3. **Gerrard-Gough J. D., Christman A. B.** History of the Naval Weapons Center, U.S. Govt. — Washington, D.C.: Printing Office, 1978.
4. **Huang L. Y., Xia Z. Y., Hu J. X., Zhu Q. W.** Performance study of a water ramjet engine // Sci. China Ser. E, Technol. Sci. (in Netherlands). — 2011. — N 54. — P. 877–882.
5. **Kiely D. H.** Review of underwater thermal propulsion // AIAA-1994-2837. — 1994.
6. **Hahma A., Gany A., Palovuori K.** Combustion of activated aluminum // Combust. Flame. — 2006. — N 145. — P. 464–480.
7. **Kuehl D. K.** Ignition and combustion of aluminum and beryllium // AIAA J. — 1965. — V. 3, N 12. — P. 2239–2247.
8. **Грачухо В. П., Озеров Е. С., Юринов А. А.** Горение частиц магния в водяном паре // Физика горения и взрыва. — 1971. — Т. 7, № 2. — С. 232–236.
9. **Озеров Е. С., Юринов А. А.** Горение частиц алюмомагниевого сплава в водяном паре // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 6. — С. 913–915.
10. **Megli T. W., Krier H., Burton R.** Shock tube ignition of Al/Mg alloys in water vapor and argon // Proc. of the 3rd World Conf. on Heat Transfer and Thermodynamics, Honolulu, HI, USA, 1993. — P. 1097–1105.
11. **Gorbunov V. V.** Combustion of mixtures high-calorific metal powders and water // Research Rep. NSWC. — AD-2771789. — 1973.
12. **Foote J. P., Lineberry J. T.** Investigation of aluminum particle combustion for underwater propulsion applications // AIAA-1996-3086. — 1996.
13. **Li S. L., Zhang W.** Thermal decomposition characteristics of magnesium-based hydro reactive metal fuel // J. Propul. Technol. (in Chinese). — 2009. — V. 30, N 6. — P. 740–744.
14. **Risha G. A., Huang Y.** Combustion of aluminum particles with steam and liquid water // AIAA-2006-1154. — 2006.
15. **Li S. L., Zhang W., Zhou X., Gao D. L.** Study on primary combustion wave characteristics of magnesium-based hydro reactive metal fuel // J. Solid Rocket Technol. (in Chinese). — 2009. — V. 32, N 2. — P. 197–200.
16. **Miller T. F., Walter J. L., Kiely D. H.** A next-generation AUV energy system based on aluminum-seawater combustion // Proc. of the 2002 Workshop on Autonomous Underwater Vehicle Technology, San Antonio, TX, USA, 2002. — P. 111–119.
17. **Miller T. F., Herr J. D.** Green rocket propulsion by reaction of Al and Mg powders and water // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. — AIAA-2004-4037. — 2004.
18. **Vasilev A. V., Gorbunov V. V., Shidlovskii A. A.** The effect of certain additives on critical diameter and combustion rates of mixtures of aluminum with gelled water // Research Rep. NSWC. — AD-A000210. — 1973.
19. **Luo K., Dang J. J., Wang Y. C.** System capability estimating for a metal-water reaction fuel ramjet system // J. Propul. Technol. (in Chinese). — 2004. — V. 25, N 6. — P. 495–498.
20. **Sun Z. P., Le F. R.** Reaction mechanism of aluminum/water // Chem. Propell. and Polymer. Mater. (in Chinese). — 2006. — V. 4, N 2. — P. 37–39.
21. **Zhang Y. G., Pang A. M., Gang W., Xiao J. W.** Research status and application prospects of the reaction between metal matrix fuel and water // J. Solid Rocket Technol. (in Chinese). — 2009. — V. 29, N 1. — P. 52–55.
22. **Брейтер А. Л., Мальцев В. М., Попов Е. И.** Модели воспламенения металлов // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 4. — С. 558–570.
23. **Huang L. Y., Xia Z. X., Zhang W. H.** An experimental study on rocket propulsion by reaction of mg-based propellant and water // Proc. of 60th Intern. Astronaut. Congress, Daejeon, Korea, 2009.
24. **Hori K., Glotov O. G., Zarko V. E., Habu H.** Combustion of Mg and Al in solid propellants // Proc. of 23rd Intern. Symp. of Space Technology and Science, Matsue, Japan. — R: 02-a-08. — 2002.
25. **Hori K., Glotov O. G., Zarko V. E., Habu H., Faisal A. M. M., Fedotova T. D.** Study of the combustion residues for Mg/Al solid propellant // Energetic Materials: Synthesis, Production and Application: 33rd Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany. — 2002. — P. 71–1–71-14.

26. **Braithwaite P. C., Christensen W. N., Daugherty V.** Quench bomb investigation of aluminum oxide formation from solid rocket propellants. Pt I: Experimental methodology // 25th JANNAF Combustion Meeting (Huntsville, AL), Chemical Propulsion Information Agency, Johns Hopkins Univ., Applied Physics Lab. — CPIA-Pub-498-VI, Laurel, MD, 1988. — P. 175–184.
27. **Magnesium** Technology: Metallurgy, Design Data, Applications / H. E. Friedrich, B. L. Mordike (Eds). — Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. — XXII.

*Поступила в редакцию 18/VI 2012 г.,
в окончательном варианте — 20/XI 2012 г.*
