

4. Варшавский Г. А., Пещанская Л. Г. // Там же. Вып. 8.
5. Агафонова Ф. А., Гуревич М. А., Тарасова Е. Ф. // Тр. Третьего Всесоюз. совещания по теории горения.— М.: Изд-во АН СССР, 1960.— Ч. 2.
6. Федосеев Д. В. // Физика аэродисперсных систем.— Киев: Изд-во КГУ, 1969.— Вып. 1.
7. Рыбанин С. С. // Горение и взрыв.— М.: Наука, 1972.
8. Калинин В. В. // Физика аэродисперсных систем.— Киев: Вища шк., 1972.— Вып. 6.
9. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
10. Magarvey R. H., Blackford V. L. Canad. J. Phys., 1962, 40, 8, 1036.
11. Nakamura I. Phys. Fluids, 1976, 19, 1, 5.

г. Одесса

Поступила в редакцию 31/V 1988,
после доработки — 2/1 1989

УДК 536.46

А. Л. Брейтер, В. М. Мальцев, Е. И. Попов

ПУТИ МОДИФИКАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ГОРЮЧЕГО КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Использование дисперсных металлов в качестве горючего в энергетических устройствах требует обоснованного выбора вида металлического горючего. Применяемый для этих целей металл должен обладать высокой энергетичностью и определенными физико-химическими свойствами, благоприятствующими его эффективному сгоранию. Наиболее распространенный вид металлического горючего — алюминий — наряду со многими положительными качествами обладает рядом недостатков. Во-первых, частицы Al имеют сравнительно высокую температуру воспламенения, что может приводить при ограниченном времени пребывания в зоне высоких температур к неполному сгоранию металла. Во-вторых, ввиду высокой температуры плавления Al в волне горения конденсированных систем подвержен агломерации, т. е. существенному увеличению размеров частиц [1, 2]. Это явление снижает эффективность использования металла в составах конденсированных систем.

Замена алюминия другим металлом в большинстве существующих энергетических устройств нерациональна. Более плодотворным представляется иной путь оптимизации металлического горючего — его модификация без замены алюминиевой основы, с целью облегчения воспламенения или затруднения агломерации. Такая модификация может вестись в двух основных направлениях: сплавлением алюминия с более активными (химически или поверхностно) металлами и покрытием алюминиевых частиц пленками тугоплавких металлов.

Модификация алюминиевого горючего сплавлением с магнием, наиболее удобным из химически активных металлов, изучена в [3, 4]. Данные этих работ показывают, что введение магния интенсифицирует горение металла: обеспечивается более раннее воспламенение, увеличивается доля реакций в паровой фазе, возникает фрагментация горящих металлических частиц. Все это способно повысить полноту сгорания металла.

В настоящей статье рассматривается модификация металлического горючего путем покрытия частиц Al пленками других металлов. Основная цель такого капсулирования — уменьшение агломерации металлического компонента конденсированных систем. Агломерация приводит к укрупнению металлических частиц и, как следствие, — к существенному росту потерь удельного импульса. Увеличение размера горящих металлических частиц снижает, во-первых, полноту их сгорания, ибо время горения металла в конденсированных системах связано с диаметром горячей частицы зависимостью $\tau_r \sim d_{Me}^n$, где $n \approx 2$. Во-вторых, с ростом

d увеличивается и размер продуктов сгорания, в основном, их крупной моды, образованной в результате горения по поверхностному механизму (как при предпламенном окислении, так и при установившемся процессе параллельно с парофазным горением) и в результате обратной конденсации окиси алюминия при парофазном горении. Именно эти частицы окисла, размер которых близок к размеру горящих металлических частиц, определяют в конечном счете двухфазные потери.

Интенсивность агломерации металла зависит от ряда свойств конденсированной системы и условий ее горения: химического состава окислителя, его дисперсности, вида связующего, скорости горения системы, давления, обдува поверхности горения и т. п. Однако борьба с агломерацией посредством видоизменения металлического горючего представляется наиболее перспективной, так как воздействует на истоки явления, а не на условия его развития.

Основное содержание процесса агломерации металлического горючего в волне горения конденсированных систем — слияние расплавленных металлических частиц. Окисление и взаимодействие частиц Me начинаются на ранних стадиях волны горения — в конденсированной фазе (в зоне прогрева). Далее они протекают в основном на поверхности горения заряда, где время пребывания металлической частицы превосходит время, необходимое для протекания процессов, приводящих к расплавлению металла и слиянию частиц. Агломерация практически прекращается как с вылетом частицы (даже невоспламенившейся) с поверхности заряда, так и с ее воспламенением, поскольку после воспламенения частица, как правило, покидает поверхность, что связано с локальным повышением температуры вокруг нее, увеличением вследствие этого газификации и оттока продуктов разложения компонентов, которые и увлекают ее с собой.

Из сказанного следует, что интенсивность агломерации металла в конденсированной системе определяется, в первую очередь, соотношением температуры плавления металла $T_{пл}$, температуры поверхности горения $T_{г}$ и температуры воспламенения металла $T_{в}$. Отсюда вытекает наиболее естественный способ модификации металлического горючего для снижения агломерации: изменение характеристик металла таким образом, чтобы $T_{пл}$ стала выше $T_{г}$ или чтобы $T_{в}$ стала ниже $T_{г}$.

Снижение температуры воспламенения металлического компонента эффективнее всего достигается сплавом Al с Mg . Однако при этом $T_{в}$ не становится ниже начала температурного интервала плавления (температуры солидус) сплава [5]. Даже чистый магний в определенной степени подвержен агломерации [2]. Второй путь — повышение температуры плавления металлического компонента — наиболее эффективно достигается капсуляцией алюминиевой частицы в тугоплавкую оболочку. Последняя может иметь органическое или металлическое происхождение.

В работе изучен способ модификации металлического горючего конденсированных систем путем повышения температуры плавления за счет нанесения на частицы Al пленок более тугоплавких металлов: меди, никеля и железа с $T_{пл} = 1350, 1730$ и 1810 К соответственно [6]. Эти температуры значительно превышают и температуру поверхности горения смесевых конденсированных систем на основе ПХА ($T_{г} \approx 1100$ К) [4], и температуру воспламенения алюминия в таких системах ($T_{в} \leq \leq 1300$ К) [7], тогда как для Al $T_{пл} = 930$ К [6], что ниже этих температур. Горение подобных биметаллических частиц в конденсированных системах изучалось в [8], где капсуляция металлического горючего, служащего одновременно катализатором горения смесевой системы, способствовала расшифровке механизма действия катализатора.

Биметаллические частицы, использованные в работе, представляют собой алюминиевые частицы стандартной дисперсности (фракция менее 50 мкм, средний диаметр ~ 15 мкм), покрытые оболочкой тугоплавких металлов. Их получали путем химического осаждения тугоплавких металлов из растворов их солей на алюминиевый порошок [9]. Биметалличе-

ский порошок вводили в модельную конденсированную систему, состоящую из стехиометрической смеси ПХА и ПММА, которая сжигалась в стандартной бомбе постоянного давления в атмосфере азота при $p \leq 60$ ати. В эксперименте измерялась скорость горения системы (с помощью фоторегистратора). Этот метод выбран за предоставляемую им возможность наблюдать за процессом в течение всего цикла горения. В бомбе с наклонными окнами и с подсветкой горячей поверхности изучалась методом киносъемки структура поверхности горения. Суждение о степени агломерации выносилось по наличию на поверхности металлических капель и их величине, по числу треков горящих металлических частиц, их ширине и месту возникновения. В установке, включающей бомбу, лампу подсветки, спектрограф, фотоумножитель и осциллограф, методом обращения спектральных линий определялась максимальная температура горения системы. Еще в одной установке собирались продукты сгорания, в которых затем определялись полнота сгорания (химическим волюмометрическим анализом) и дисперсность (обсчетом под оптическим микроскопом со шшивкой результатов по двум диапазонам результатов) — среднемаассовый диаметр.

Толщина оболочки тугоплавкого металла должна быть минимально необходимой для предотвращения слияния алюминиевых ядер частицы, учитывая, что все капсулирующие металлы имеют теплоту сгорания меньше алюминия. Действительная толщина пленки на частицах составляла 0,01—0,1 мкм. Микрофотографии капсулированных частиц показывают, что пленки сплошные и сравнительно равномерные. Некоторая неодинаковость их толщины связана с «залечиванием» дефектов или выравниванием покрываемой поверхности. Надежность металлического покрытия дополнительно проверялась нагреванием частиц до 1300 К с последующим рассмотрением частиц под микроскопом, а также дериватографическим анализом. Оба способа проверки показали, что частицы не изменяли своей структуры.

Полная сплошность пленки достигалась при ее толщине порядка 0,1 мкм, что соответствует содержанию покрывающего металла $\sim 10\%$. Замена такого количества Al низкокалорийным металлом означает снижение теплотворной способности металлизированной смесевой системы и соответственно расчетного удельного импульса на величину до 1,5%. Однако повышение полноты сгорания металла и снижение двухфазных потерь за счет устранения агломерации может увеличить суммарно импульс системы даже при таком покрытии, поскольку двухфазные потери достигают 5% при теоретически возможном минимуме ниже 1%.

Влияние тугоплавкой пленки на агломерацию металла в конденсированных системах изучалось для разных толщин пленки, при различных содержаниях металлического горючего в системе C_{Me} и давлениях. В первой части работы исследовано капсулирование алюминия никелем. Никель имеет температуру плавления значительно выше, чем температура поверхности горения смесевой системы на основе ПХА, и выше температуры воспламенения Al в таких системах. Поэтому никелевое покрытие должно благотворно сказаться на уменьшении агломерации. Дополнительное достоинство Ni заключается в том, что он не катализирует горение смесевой системы, отчего не изменяется скорость ее горения и не оказывается постороннее влияние на агломерацию металла.

В опытах изучена зависимость агломерации от толщины δ никелевой пленки и более подробно рассмотрено поведение металла при сравнительно толстых пленках: исследована структура поверхности горения, измерена скорость горения u при различных p и C_{Me} . Фотографирование горячей поверхности проводилось при $C_{Me} = 2\%$, чтобы можно было разглядеть отдельные металлические частицы и их треки.

Фотографирование поверхности горения смесевой системы, содержащей металлическое горючее в виде Al (рис. 1, а), и системы, содержащей столько же биметалла Al—Ni ($\delta \approx 0,1$ мкм) (рис. 1, б), показывает, что на поверхности системы с биметаллом исчезли крупные части-



Рис. 1. Фотографии горячей поверхности смесей ПХА + ПММА с различными металлическими горючими; $p = 1$ атм, содержание металла 2 %.
а) алюминий; б) алюминий, покрытый никелем; в) алюминий, покрытый медью; г) сплав алюминия с висмутом.

цы, а треки горящих частиц сузились и число их выросло. Обсчет дает рост числа треков в 3,1 раза, чему соответствует снижение линейных размеров горящей частицы в 1,5 раза. Об уменьшении размеров косвенно свидетельствует и то, что треки горящих частиц биметалла начинаются ближе к поверхности, чем у горящих алюминиевых частиц. (Специальное измерение температуры воспламенения одинаковых по размеру частиц алюминия и биметалла Al—Ni показало, что пленка никеля на температуре воспламенения не сказывается.) Исчезновение крупных частиц металла с поверхности горения, рост числа горящих частиц, более раннее воспламенение металла свидетельствуют об ослаблении слияния металла на поверхности горения.

Скорость горения систем, содержащих биметалл Al—Ni, выше, чем систем с алюминием (рис. 2). Это также должно являться следствием уменьшения размеров горящих частиц и более быстрого их сгорания, так что увеличивается доля тепла от сгорания металла, выделяющаяся в пределах «зоны влияния». Чтобы исключить возможное каталитическое действие никелевого покрытия, измерена величина u для систем, содержащих:

- а) порошки Al и Ni, смешанные в том же соотношении, как и в биметалле;
- б) сплав Al—Ni адекватного состава;
- в) никель в таком количестве, какое имеется в системе при введении биметалла.

Рис. 2 показывает, что значение u систем со сплавом или смесью металлов не повысилось по сравнению с составом с Al, т. е. никель здесь не является катализатором горения. Об этом же говорит отсутствие прироста u неметаллизированной смеси при введении в нее никеля. Поэтому разница в скоростях горения систем с биметаллом, где никель мог предупреждать слияние металлических частиц, и со сплавом или смесью металлов, где влияние никеля на агломерацию не могло проявиться, показывает, что прирост u при введении биметалла следует отнести на счет уменьшения агломерации металлического горючего. В пользу этого вывода говорит также рассмотрение зависимости действия никелевого покрытия от C_{Me} (рис. 3). Скорость горения с биметаллом выше, чем с алюминием, только при больших величинах C_{Me} , когда на некапсулированном металле сказывается агломерация.

Наконец, о том же свидетельствует характер зависимости $u(p)$ систем с различным металлическим горючим. Наибольший прирост скорости при замене Al на биметалл получен при низких давлениях, когда агломерация больше. Показатель степени ν в законе скорости горения для алюминия, покрытого никелем, ниже, чем для чистого Al: соответственно 0,32 и 0,38.

Таким образом, анализ результатов измерения величины u систем с алюминием и с биметаллом Al—Ni и характера зависимостей $u(C_{Me})$

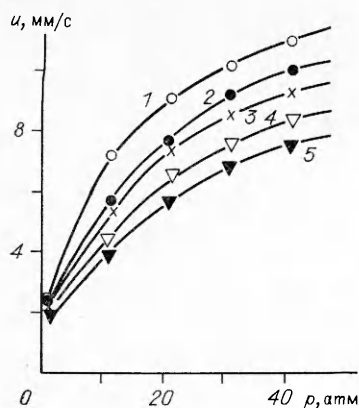


Рис. 2. Зависимость $u(p)$ смесей ПХА + ПММА с различными металлическими горючими; содержание Ni в смеси ПХА + ПММА 2 %, остальных металлических горючих 20 %, содержание никеля в сплаве, смеси металлов и биметалле 10 %.
1 — биметалл; 2 — Al; 3 — сплав; 4 — без металла; 5 — Ni.

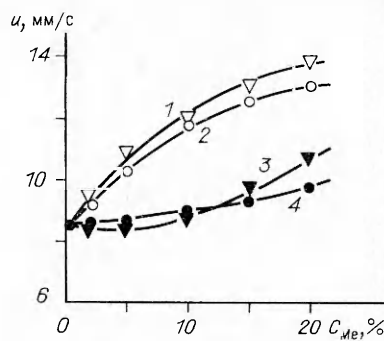


Рис. 3. Зависимость $u(C_{Me})$ смесей ПХА + ПММА с алюминием и биметаллами; $p = 40$ атм, содержание капсулирующего металла в биметалле 10 %.
1 — Al—Cu; 2 — Al—Fe; 3 — Al—Ni; 4 — Al.

и $u(p)$ однозначно свидетельствует, что при покрытии алюминия агломерация металла уменьшается.

Измерения среднемассового размера d_{43} продуктов сгорания показали, что пленка никеля существенно (до 1,5 раз) снижает d_{43} (рис. 4). Влияние Ni увеличивается с ростом толщины капсулирующей пленки δ_k . Наиболее сильна эта зависимость в области тонких пленок. Сравнительно быстрое насыщение зависимости $d_{43} = d_{43}(\delta_k)$ — положительный фактор, ибо применение тонких покрытий не приводит к заметному снижению энергетичности металла и в целом конденсированной системы.

Рассматривая влияние δ_k на величину u , можно видеть, что наиболее сильно она выражена тоже в области малых δ_k . Корреляция зависимостей d_{43} и u от δ_k также является аргументом в пользу объяснения влияния величины δ_k на обе функции одной и той же причиной — уменьшением агломерации металла. Изучалась также капсуляция алюминия медью. Медь имеет $T_{пл}$ выше температуры поверхности горения смеси системы на основе ПХА, и выше, чем температура воспламенения алюминия в таких системах. Поэтому медь должна сказываться на уменьшении агломерации. Результаты опытов показывают, что в системах с биметаллом Al—Cu агломерация меньше, чем с алюминием. Об этом говорит, во-первых, вид поверхности горения. Количество треков горящих частиц (см. рис. 2, в) в 2,5 раза больше, чем на фотографии системы с алюминием (см. рис. 2, а); это увеличение соответствует уменьшению размера горячей частицы в 1,3 раза. Количество крупных частиц металла на поверхности образца уменьшается. Воспламенение частиц происходит ближе к поверхности.

Об уменьшении агломерации свидетельствует также тот факт, что скорость горения смесей, содержащих порошок алюминия, покрытого медью, значительно выше, чем с алюминием (см. рис. 3). Одной из причин этого прироста является, как и при покрытии никелем, уменьшение агломерации, что дополнительно подтверждается снижением ν до 0,32.

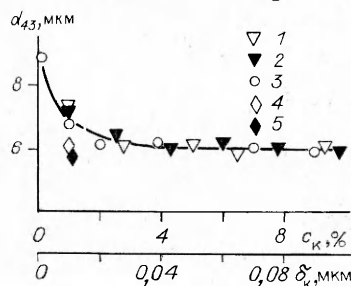


Рис. 4. Зависимость среднемассового диаметра продуктов сгорания от содержания капсулирующего металла в биметалле; $p = 40$ атм, $C_{Me} = 20$ %.
1 — Al—Cu; 2 — Al—Ni; 3 — Al—Fe; 4 — Al—Mg—Cu; 5 — Al—Mg—Ni.

Но весь прирост нельзя объяснить уменьшением агломерации, поскольку пленка меди должна препятствовать слиянию частиц не больше никеля (ввиду меньшей температуры плавления меди).

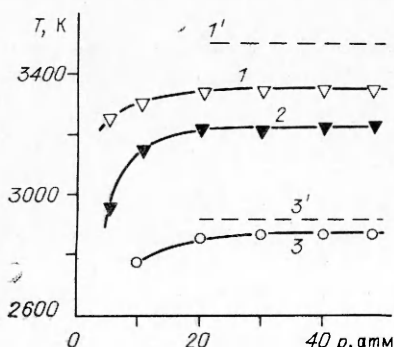
Для объяснения такого большого роста величины u изучено горение модельных систем, содержащих Al и Cu в виде сплава и в виде смеси порошков одинакового с биметаллом состава, а также содержащих порошок меди в таком же количестве, в каком присутствует в модельной системе медь, входящая в состав биметалла. Оказалось, что скорость горения составов со смесью металлов, с их сплавом гораздо меньше, чем с биметаллом. Но при введении смеси металлов скорость горения все же выше, чем при добавке чистого Al, тогда как в случае с никелем аналогичная модификация металлического горючего приводила к снижению u (видимо, из-за снижения теплоты сгорания металлического компонента). Увеличение u при введении Cu может быть объяснено катализирующим влиянием меди или продуктов ее сгорания на горение смеси ПХА + ПММА. Это подтверждается увеличением скорости горения при добавке порошка меди в неметаллизированную смесь окислитель — горючее. (При введении частиц сплава контакт меди с окислителем и горючим затруднен и $u = \text{const.}$) Следует предположить, что прирост скорости горения из-за уменьшения агломерации при использовании биметалла Al—Cu не должен превышать таковой при капсуляции алюминия никелем. Действительно, агломерация при покрытии медью (см. рис. 2, в) хотя и снижается (растет количество треков, уменьшается количество частиц на поверхности заряда), но не исчезает (на поверхности видны отдельные крупные частицы). Остальной прирост скорости горения следует отнести на счет катализирующего действия Cu.

Большую разницу в приросте скорости горения системы при добавке в одном случае меди в виде пленки на частицах Al, в другом — в виде порошка Cu (чистого или смешанного с порошком алюминия) следует, очевидно, объяснить разницей в величине поверхности взаимодействия меди с компонентами конденсированной системы. Когда медь находится в виде биметалла, резко (в 18 раз) возрастает ее поверхность по сравнению с поверхностью медного порошка той же массы и соответственно усиливается ее катализирующее действие.

Влияние Cu на дисперсность продуктов сгорания видно на рис. 4. Подобно Ni, нанесенная на частицы Al медь уменьшает размер частиц металлического окисла. При небольших толщинах капсулирующей пленки медь несколько меньше никеля повышает дисперсность окисла металла, что согласуется с температурами плавления этих металлов и видом поверхности горения систем, содержащих соответствующие биметаллы. При большой толщине капсулирующей пленки, т. е. в пределе, воздействие меди на агломерацию становится равным воздействию никеля.

Общая картина зависимости $d_{43} = d_{43}(\delta_k)$ при покрытии алюминия медью такая же, как и при покрытии никелем. Наиболее сильна она в интервале малых δ_k ; при $C_k > 2,5\%$ d_{43} не зависит от δ_k .

Дополнительные данные о влиянии капсулирования алюминия медью на агломерацию дает измерение максимальной температуры горения



(рис. 5). Оно показывает, что горение составов, содержащих биметалл Al—Cu, протекает более интенсивно. Температура горения повышается от 3220 до 3350 K и разница между расчетной и измеренной температурами уменьшается от 280 до 150 K (даже без учета некоторого снижения расчетной температуры при частич-

Рис. 5. Зависимость максимальной температуры горения смеси ПХА + ПММА от давления; $C_{Me} = 20\%$, содержание меди в биметалле 10%. 1 — Al—Cu; 2 — Al; 3 — без металла; 1' и 3' — расчет.

ной замене на менее энергетичный металл). Единственное возможное объяснение этого — уменьшение агломерации.

Третьим металлом, использованным для капсуляции алюминия, было железо. Влияние пленки Fe на агломерацию оценивалось по тем же характеристикам. Дисперсность продуктов сгорания модельной системы с биметаллом Al—Fe (см. рис. 4) близка к соответствующей для смесей с биметаллами Al—Ni и Al—Cu, как это и можно предположить по физико-химическим свойствам капсулирующих металлов. При $\delta_n < < 0,02$ мкм железо оказывает наибольшее влияние на агломерацию в соответствии со своей более высокой температурой плавления. При более толстых пленках зависимость $d_{43} = d_{43}(\delta_n)$ насыщается на том же уровне дисперсности, что и для никеля и меди. Поверхность горения также имеет вид, аналогичный биметаллам с никелем и медью. Истинное воздействие уменьшения агломерации на рост значения u затенено катализирующим влиянием железа на горение смеси перхлоратной системы. В случае сравнительно тонких пленок влияние Fe на скорость горения аналогично Cu, но имеет тенденцию к более раннему насыщению.

Для дополнительного подтверждения вывода о механизме действия тугоплавких пленок на агломерацию проверено поведение алюминия, покрытого магнием ($T_{пл}$ Mg (820 K) [6] меньше, чем у алюминия). Скорость горения системы с биметаллом Al—Mg не превысила скорость горения со сплавом идентичного состава.

Некоторое снижение агломерации удалось получить сплавлением алюминия с поверхностно-активными по отношению к нему металлами, например, висмутом (см. рис. 4, з). За счет уменьшения поверхностного натяжения сплава (коэффициент поверхностного натяжения Al равен 0,91, висмута — 0,39 Н/м [6]) уменьшается равновесный размер расплавленной металлической капли. Однако поверхностно-активные металлы имеют, как правило, очень низкую энергетику, отчего ограниченное уменьшение размеров горящих частиц не компенсирует потерю расчетного импульса.

Как показано в работах [1, 2], сплавление алюминия с активными металлами — в первую очередь с магнием — позволяет улучшить такие параметры горения металлического компонента, как температура воспламенения и время горения. Поэтому представляется весьма интересным совместить два способа модификации металлического горючего: сплавление алюминия с химически активным металлом и капсулирование полученного сплава тугоплавким металлом.

В настоящей работе изучено горение сплавов Al — 1—5 % Mg, покрытых медью или никелем (1 %). Результаты показывают, что дисперсность продуктов сгорания металла повышается до содержания магния в сплаве ~2 %, при большем количестве Mg уменьшение d_{43} прекращается. Среднемассовый диаметр продуктов сгорания сплава Al + 2 % Mg, капсулированного 1 % Cu или Ni, такой же, как и у Al, покрытого 2,5 % Cu или Ni. В то же время металлическое горючее состава 97 % Al + 2 % Mg + 1 % Cu (Ni) имеет большую теплоту сгорания, чем горючее состава 97,5 % Al + 2,5 % Cu (Ni). Кроме того, присутствие химически активного магния интенсифицирует горение металла. Поэтому сочетание двух способов модификации металлического горючего имеет преимущество перед каждым из этих способов в отдельности.

Таким образом, показано, что покрытие частиц алюминия пленками тугоплавких металлов (никеля, меди, железа) уменьшает агломерацию частиц. Этим повышается полнота сгорания металла, о чем свидетельствуют химический анализ окисных частиц и рост максимальной температуры факела пламени, и улучшается дисперсный состав конденсированной фазы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брейтер А. Л., Кашпоров Л. Я., Мальцев В. М. и др. ФГВ, 1971, 7, 2, 222.
2. Попов Е. И., Кашпоров Л. Я., Мальцев В. М. и др. ФГВ, 1973, 9, 2, 240.
3. Похил П. Ф., Логачев В. С., Мальцев В. М. и др. Горение металлизированных конденсированных систем.— М., 1962.
4. Похил П. Ф., Логачев В. С., Мальцев В. М. ФГВ, 1970, 6, 1, 80.
5. Брейтер А. Л., Попов Е. И., Великанова В. Л. Физика аэродисперсных систем.— Киев; Одесса: Вища шк., 1983.— Вып. 23.
6. Физико-химические свойства элементов: Справочник/Под ред. Г. В. Самсонова.— Киев, 1965.
7. Похил П. Ф., Мальцев В. М., Логачев В. С. и др. ФГВ, 1971, 7, 1, 51.
8. Боболев В. К., Брейтер А. Л., Мальцев В. М. и др. Докл. АН СССР, 1973, 208, 6, 1375.
9. Егорова Л. Г., Сахнев А. С., Брейтер А. Л. и др. Защита металлов, 1975, 4, 505.

г. Москва

Поступила в редакцию 1/IV 1988,
после доработки — 13/VI 1988

УДК 546

*А. Г. Мержанов, А. С. Рогачев, А. С. Мукасян,
Б. М. Хусид*

МАКРОКИНЕТИКА СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ БЕЗГАЗОВОМ ГОРЕНИИ СМЕСЕЙ ПОРОШКОВ ТИТАНА И УГЛЕРОДА

Особенность безгазового горения состоит в наличии пространственной структуры у исходной реакционной смеси, промежуточных и конечных продуктов горения. В широком смысле это понятие включает в себя тонкую (кристаллическую) структуру вещества, микроструктуру, описывающую морфологию, размер и взаимное расположение фазовых составляющих, и макроструктуру, характеризующую неоднородность вещества (наличие раковин и т. п.). Фазовый состав и структура продукта горения определяют его свойства.

В существующих тепловых моделях горения гетерогенных систем [1], построенных по схеме гомогенных процессов [2, 3], основную роль играют тепловой эффект химической реакции и эффективная скорость тепловыделения. Они позволяют определять скорость горения и температуру фронта, не требуя детальной информации о механизме процессов, протекающих в волне горения. Однако этих параметров недостаточно для описания структурных превращений, происходящих при гетерогенном безгазовом горении и определяющих свойства конечных продуктов.

В последние годы появился ряд работ, в которых предлагались и рассматривались различные структурные модели процессов безгазового горения. В [4] для анализа особенностей безгазового горения использована модель упорядоченной слоевой системы, ранее применявшаяся в теории горения смесевых порохов [5]. Капиллярное строение реакционной среды рассмотрено в [6]. Различные варианты реакционных ячеек, основанные на предположениях о важной роли диффузии в расплаве или в слое твердофазного продукта, анализировались в работах [7—10]. В [11] структурные схемы исходных и сгоревших образцов использовались при изучении процессов дегазации. В работах [12, 13] изучено влияние фазовых превращений (в частности, плавления реагентов и продуктов) на скорость горения.

Во всех отмеченных работах структурные модели применены для объяснения закономерностей горения, т. е. традиционные параметры горения (скорость и температура) исследовались в непосредственной взаимосвязи с пространственной организацией среды. Подобный подход со-