

В приближении постоянных свойств, когда $\xi_a = \text{Pe}$, если $T_a = 4200$ К, $T_\infty = 4500$ К, $T_a^4 \gg T_w^4$, $c_{0\infty} = 0,5$, $\varepsilon = 0,9$, $a_0 = 10$ мкм, $\rho_a = 0,072$ кг/м³, $D_a = 20$ см²/с, $c_p = 1,2$ кДж/(кг · К), из формулы (18) следует $\text{Pe} = 0,44$, что в соответствии с (15) приводит к времени горения 1,0 мс. Время релаксации температуры к установившемуся значению в соответствии с (17) для рассматриваемых частиц при допущении, что $\rho' = 1300$ кг/м³ и $c_p = 2,8$ кДж/(кг · К), составляет 0,9 мс. Следует отметить, что заметная часть массы частицы в рассматриваемом случае сгорает на стадии релаксации температуры частицы к температуре сублимации, так как время релаксации оказывается сравнимым с временем горения.

Результаты экспериментальных исследований горения частиц нефтяного кокса в плазменной струе азота с 50 %-ным содержанием кислорода представлены в работе [15]. Отмечается, что время горения частиц пропорционально квадрату их начального радиуса. Это согласуется с формулой (15), в предположении $\text{Pe} = \text{const}$, что реализуется в диффузионном приближении. При температуре газового потока 4500 К время горения частиц начального радиуса 10 мкм составляет 2,3 мс, что приближенно соответствует сумме времен релаксации температуры и времени горения при температуре сублимации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хитрии Л. Н. Физика горения и взрыва.— М.: МГУ, 1957.
2. Виленский Т. В., Хзмалян Д. М. Динамика горения пылевидного топлива.— М.: Энергия, 1978.
3. Libby P. A., Blake T. R. Comb. Flames, 1979, 36, 139.
4. Matalon M. Comb. Sci. Technol., 1980, 24, 115.
5. Головин А. М., Песочин В. Р., Толмачев И. Я. ФГВ, 1982, 18, 2, 23.
6. Matalon M. SIAM J. Appl. Math., 1982, 42, 4, 787.
7. Сполдинг Д. Б. Горение и массообмен.— М.: Машиностроение, 1985.
8. Dixon-Lewis G., Bradley D., El-Din Habik S. Archivum Comb., 1987, 7, 1—2, 85.
9. Веселов С. Н., Заклязминский Л. А., Маркачев Ю. Е. ФГВ, 1986, 22, 3, 38.
10. Велихов Е. П., Волков Ю. М. Перспективы развития импульсной МГД-энергетики и ее применение в геологии и геофизике.— М., 1981.— (Препр./АН СССР. ИАЭ; 3436/6).
11. Волков Ю. М., Дегтев Ю. Г., Крикун В. В. и др. // Тр. VIII Междунар. конф. по МГД-преобразованию энергии.— М., 1983.— Т. 5.
12. Вильямс Ф. Теория горения.— М.: Наука, 1971.
13. Михайлов В. В. Инж. журн., 1962, 11, 2, 239.
14. Головина Е. С. Высокотемпературное горение и газификация углерода.— М.: Энергоатомиздат, 1983.
15. Курятников В. В., Леонова Л. Ю., Вайнфельд А. И. Физика аэродисперсных систем.— Киев; Одесса: Вища шк., 1987.— Вып. 31.

Поступила в редакцию 27/IV 1988,
после доработки — 22/II 1989

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ ПОРИСТОСТИ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ И КОНЕЧНУЮ ПОРИСТОСТЬ СМЕСЕЙ Ti + V

Т. В. Монасевич, Л. А. Монасевич, Л. С. Марцунова, В. А. Куликов

(Томск)

Бориды находят все более широкое использование в технике: значительная твердость позволяет применять их как абразивы. Для использования боридов в качестве режущих и штамповых инструментов изготавливают композиты из твердых, но хрупких боридов и пластичных металлических связей. Один из перспективных методов получения та-

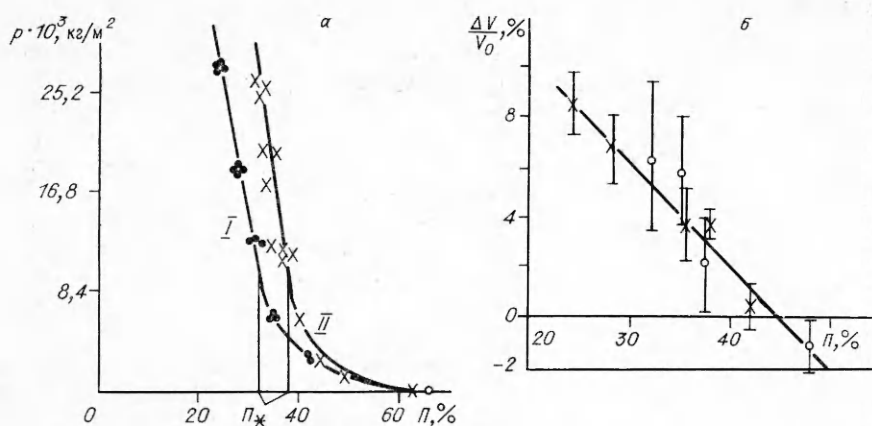


Рис. 1.

ких композитов — метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Преимущество осуществления синтеза боридов методом СВС состоит в высокой скорости протекания процесса и чистоты конечных продуктов, а также бестигельности. Особенно важна экономичность — реакция боридообразования не требует внешнего притока энергии.

Свойства композита обусловлены многими факторами, один из которых — пористость. Конечная пористость продукта P_k зависит, в частности, от исходного значения P для порошковой горючей смеси. Вопрос этот изучен недостаточно. Известно, что величина и характер пористости существенно влияют на процесс горения [1, 2].

В данной работе рассмотрено влияние значений P порошковых смесей $Ti + B$ на режим горения и некоторые свойства композита.

Исследовались составы $Ti + B$, рассчитанные на стехиометрию TiB_2 : состав I — 60 %, II — 50 % (в массовых соотношениях). Порошки смешивали в барабанном двухконусном смесителе 24 ч. Из готовой смеси прессовали образцы в виде параллелепипеда с размерами $60 \times 14 \times 14$ мм. Исходную пористость прессовок варьировали в интервале от 24 до 50 %. Процесс синтеза инициировали вольфрамовой спиралью, нагреваемой импульсом тока.

Скорость горения определяли с помощью двух термопар ВР5/ВР20 диаметром 0,2 мм, которые вставляли в просверленные до середины образца отверстия на расстоянии 20 мм друг от друга. Запись термо-ЭДС вели на двухлучевом запоминающем осциллографе С8-11. Массу образцов определяли на весах ВЛКТ-50г-М.

На рис. 1, а представлены кривые прессуемости исследуемых сплавов. Кривые разделяются на 2 участка: криволинейный соответствует стадии укладки частиц, прямолинейный — стадии деформации или дробления частиц [3]. Переход от одной стадии к другой обозначим как состояние плотной укладки частиц. Область пористостей, соответствующая плотной укладке частиц для состава I, составляет 32 ± 1 %, для II — 38 ± 1 %.

На рис. 1, б приведена зависимость изменения объема в процессе горения этих составов от пористости. Для обоих составов при больших значениях P наблюдается усадка. При уменьшении P усадка уменьшается и при $P < 45 \pm 4$ % объем брикетов увеличивается.

На рис. 2 показано влияние P на скорость горения, конечную пористость и потерю массы. Значения u для обоих составов имеют максимум. Для состава I $u_{max} \geq 8,9 \pm 0,4$ мм/с соответствует $P = 33 \pm 2$ %, для II $u_{max} = 4,6 \pm 0,2$ мм/с при $P = 36 \pm 2$ %.

При уменьшении P для обоих составов вначале наблюдается уменьшение, а затем стабилизация величины P_k . Наибольшая потеря массы брикета в процессе горения наблюдается при больших значениях пористости, особенно для состава I.

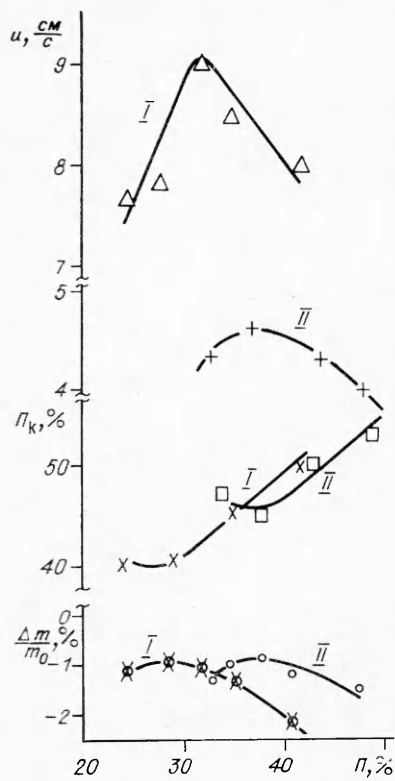


Рис. 2.

При $\Pi = 33$ и 38% для составов I и II структура изменяется от ноздревато-пористой к слоистой. При максимальных значениях Π от образца отслаиваются «лепешки». Структура образцов состава I при больших значениях пористости более рыхлая.

Из представленных результатов четко прослеживается корреляция скорости горения, конечной пористости и потери массы образца со стадиями прессуемости. Для обоих составов на стадии укладки величина u растет, уменьшаются значения Π_k и $\Delta m/m_0$ при падении Π , формируется ноздревато-пористая структура. На стадии деформации при дальнейшем уменьшении исходной пористости снижается скорость горения, растут потери массы, стабилизируется конечная пористость, образуется слоистая структура. Рентгенофазовый анализ показал, что фазовый состав при горении изучаемых систем не зависит от пористости.

Известно, что на скорость горения и макроструктуру продуктов реакции (боридов, карбидов) существенно влияет десорбция газа [4–6]. Как показано в работе [5], выделение газа происходит в зоне прогрева.

Рассмотрим условия фильтрации десорбированного газа в зависимости от структуры исходной прессовки. Под структурой будем понимать суммарный объем пор, контактное сечение и соотношение между открытой и закрытой пористостями. На стадии укладки из-за возможности перемещения частиц относительно друг друга происходит формирование и медленный рост контактного сечения [3]. Открытая пористость будет преобладать над только образующейся, закрытой. Дальнейшее уменьшение пористости происходит в основном за счет деформации частиц [3]. При этом площадь контактного сечения будет быстро увеличиваться и, естественно, быстро возрастать доля закрытой пористости. Десорбированный газ либо выходит из прессовки при открытой пористости, либо заполняет объем закрытых пор. На стадии укладки, когда преобладает открытая пористость, газы легко фильтруются, не создавая большого внутрипорового давления.

При $\Pi > 45 \pm 3\%$ наблюдается усадка брикета. Это связано с тем, что возникшее в зоне прогрева капиллярное растекание легкоплавкого компонента вызывает сжатие объема пор. Рост закрытой пористости и контактного сечения, препятствующие выходу газа, а также уменьшение суммарного объема пор ведут к повышению давления газа в порах и распуханию брикета. При дальнейшем уменьшении пористости (на стадии деформации) увеличение контактного сечения и доли закрытой пористости способствуют увеличению давления газа до уровня, превышающего силу сцепления частиц в отдельных местах, вызывая их разрывы.

Свободная фильтрация газов на стадии укладки приводит к однородной ноздревато-пористой структуре прессовки продуктов реакции. На стадии деформации образовавшиеся при горении разрывы прессовки в зоне прогрева «наследуются» структурой сгоревшего брикета, образуя его слоистость.

Сила сцепления частиц в прессовке пропорциональна площади контактного сечения. В этой связи рассмотрим зависимость потерь массы брикета от пористости. При больших значениях Π контактное сечение мало, что соответствует малым силам сцепления. Поэтому десорбированный газ при выходе может увлекать часть материала. При уменьшении пористости с ростом контактного сечения увеличивается сила сцепления, что способствует снижению потерь массы. При переходе к стадии деформации потери массы увеличиваются, так как возросшее давление газа в порах, превысив силу сцепления частиц, разрывает прессовку и, захватив часть материала, выносит его из прессовки.

В порошковых материалах из веществ с высокопроводящими свойствами передача тепла в основном происходит через контактное сечение частиц [9]. В этой связи рассмотрим зависимость $u(\Pi)$. Скорость распространения тепловой волны определяется соотношением тепловыделения и теплоотвода. Тепловыделение зависит от плотности реагирующей массы, будучи обратно пропорциональной пористости. Теплоотвод определяется коэффициентом теплопроводности, который пропорционален контактному сечению [9] и нелинейно зависит от пористости. На стадии укладки скорость увеличения плотности реагирующей массы больше скорости роста контактного сечения, что способствует накоплению тепла и соответственно скорости горения. Разрывы реагирующей массы, возникшие в зоне прогрева, уменьшают плотность прессовки, что ведет к снижению скорости тепловыделения и соответственно скорости горения на стадии деформации.

Интересным представляется следующий факт. Из рис. 1, б следует, что при $\Pi > 45 \pm 3\%$ наблюдается усадка брикета в результате горения. Однако, как видно из рис. 2, этим значениям Π не соответствуют минимальные значения Π_* . Минимальные значения Π_* получаются при $\Pi = \Pi_*$, несмотря на то, что синтез при Π_* сопровождается ростом брикетов. Связано это с тем, что увеличение объема брикета под действием газовыделения при $\Pi = \Pi_*$ и уменьшение объема под действием капиллярных сил при $\Pi > \Pi_*$ не компенсируют исходную разность пористостей в условиях независимости фазового состава от пористости. Из сопоставления результатов для составов I и II (см. рис. 2) видно, что снижение реакционной массы с 60 до 50% ведет к уменьшению скорости горения почти в 2 раза. Подобное отмечается и в работах [4, 6, 8]. Уменьшение скорости горения (увеличение времени горения) способствует более полной фильтрации десорбированного газа прессовки, что, как показано было выше, способствует улучшению макроструктуры продуктов синтеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азатян Т. С., Мальцев В. М., Мержанов А. Г. и др. ФГВ, 1979, 15, 1, 43.
2. Найбороденко Ю. С., Итин В. И. ФГВ, 1975, 11, 3, 343.
3. Шведков Е. Л., Денисенко Э. Т., Ковенский И. И. Словарь-справочник по порошковой металлургии.— Киев: Наук. думка, 1982.
4. Вершинников В. И., Филоненко А. К. ФГВ, 1978, 14, 5, 42.
5. Щербаков В. А., Сычев А. Е., Штейнберг А. С. ФГВ, 1986, 22, 4, 55.
6. Филоненко А. К. // Процесс горения в химической технологии и металлургии.— Черноголовка, 1975.
7. Мержанов А. Г. Закономерности и механизм горения пиротехнических смесей титана и бора/АН СССР. ОИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1978.
8. Азатян Т. С., Мальцев В. М., Мержанов А. Г. и др. ФГВ, 1980, 16, 2, 37.
9. Александров В. В., Груздев В. А., Коваленко Ю. А. ФГВ, 1985, 21, 1, 98.

*Поступила в редакцию 14/III 1988,
после доработки — 11/V 1988*