

## ДИНАМИКА ДЕФОРМАЦИИ РЕАГИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ БЕЗГАЗОВОМ ГОРЕНИИ

О. К. Камынина, А. С. Рогачев, Л. М. Умаров

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 142432 Черноголовка  
kuz@ism.ac.ru

Экспериментально исследован процесс деформации при безгазовом горении образцов на примере составов  $5\text{Ti} + 3\text{Si}$  и  $\text{Ti} + \text{C}$ . Использование скоростной видеосъемки (500 кадр/с) позволило проследить динамику перемещения вещества в волне безгазового горения с пространственным разрешением порядка 10 мкм. Показано, что непосредственно за фронтом волны горения происходит расширение среды, затем сжатие. Определены размеры зоны расширения и зоны сжатия.

Ключевые слова: безгазовое горение, деформация, скоростная микровидеосъемка.

Известно, что при горении некоторых безгазовых составов происходит увеличение размеров образцов в направлении, совпадающем с направлением распространения волны горения [1]. Поскольку к безгазовым волнам горения принято относить процессы, в которых реакция протекает в конденсированном (твердом или расплавленном) состоянии, не исключается присутствие некоторого количества газифицирующихся примесей или же газов в порах образца при условии, что эти газы не участвуют в реакции горения. Поэтому расширение образцов объясняется обычно действием примесных газов, давление которых резко возрастает в зонах прогрева и реакции [2]. Это согласуется с тем, что при введении в реакционную смесь инертных газифицирующихся добавок возрастает удлинение образцов [3]. В дальнейшем на примере систем титан — углерод, тантал — углерод было показано, что источник газовыделения сосредоточен в зоне прогрева, при этом выделившийся газ фильтруется и через исходное вещество, и через конечный продукт [4]. Влияние внешней нагрузки на деформацию образцов изучалось в работах [5, 6], где показано, что в зависимости от величины нагрузки могут происходить как сжатие, так и расширение образца, а деформация сильно зависит от механизма горения.

Несмотря на имеющийся экспериментальный материал, динамика и механизм расширения или сжатия образцов в отсутствие внешних нагрузок при безгазовом горении остаются

малоизученными. До сих пор не получены однозначные ответы на вопросы о том, в каких зонах волн «безгазового» горения происходит деформация и какова скорость этого процесса. До недавнего времени предполагалось, что зона деформации находится в зоне прогрева [4, 7]. В работе [6] поднимался вопрос о связи зоны деформации со структурой волны горения. В настоящей работе получен ответ на этот вопрос. Впервые показано, что зона деформации находится непосредственно за фронтом горения, определены размеры зоны деформации для систем титан — кремний, титан — углерод.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований были выбраны составы  $5\text{Ti} + 3\text{Si}$  и  $\text{Ti} + \text{C}$ . Использовались порошки титана марок ПТОМ, ПТМ, ПТС (размеры частиц ПТС  $80 \div 100$ ,  $100 \div 125$ ,  $160 \div 200$  мкм). Образцы прессовали из порошковых смесей в виде цилиндров диаметром 10 мм и высотой  $18 \div 20$  мм, с относительной плотностью  $\approx 0,45$ . В середину образца по горизонтали запрессовывалась метка — вольфрамовая проволока диаметром 50 мкм. Схема эксперимента показана на рис. 1. Образцы устанавливались вертикально в реакционной камере, которая затем вакуумировалась и заполнялась аргоном под давлением 1 атм. Для того чтобы положение метки фиксировалось видеокамерой в течение всего эксперимента, использовался сильный источник постоянного света, яркость которого была сопоставима с яркостью свечения фронта горения. Таким образом, контуры метки и боковой поверхности образца были видны до зажигания сквозь плотный светофильтр СЗС, ко-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номера проектов 00-15-97370 и 01-03-32077).

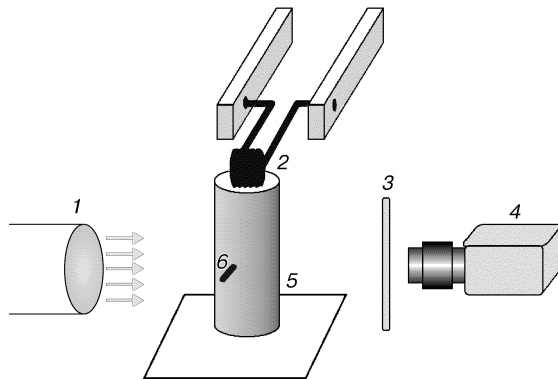


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
1 — лампа, 2 — плавающий поджиг, 3 — светофильтр СЗС, 4 — скоростная камера с микроскопической головкой, 5 — образец, 6 — запрессованная метка

торый позволял избежать засветки кадра после попадания волны горения в поле зрения видеокамеры. Таблетки поджигались с верхнего торца свободно лежащей вольфрамовой спиралью, форма которой давала ей возможность свободно поворачиваться вокруг горизонтальной оси (см. рис. 1), не оказывая никакого сопротивления расширению образцов (система «плавающего поджига»). Масса используемой спирали составляла 0,6 г, поэтому давление спирали, оказываемое на поверхность образца, можно не учитывать. Реакционная камера представляла собой колпак, оснащенный тремя смотровыми окнами, через которые проводилась запись процесса скоростной видеокамерой Motion Score 500. Запись велась со скоростью 500 кадр/с через микроскоп МБС-9, что позволяло получать изображение процесса, увеличенное в 105 раз для состава  $5\text{Ti} + 3\text{Si}$  и в 60 раз для состава  $\text{Ti} + \text{C}$ . Затем скоростная видеозапись процесса перезаписывалась с замедлением в 100 раз на видеокассету с помощью видеоманитофона Panasonic NV-SD 450. Таким образом была получена цифровая запись эксперимента с разрешением камеры 12 мкм на строку, при этом экспозиция одного кадра, которую затем переводили в аналоговую, варьировалась в зависимости от состава образца от 2 до 0,1 мс. Изменение координаты метки в процессе горения образца определялось с помощью покадрового просмотра видеозаписи. Кроме того, покадровый просмотр позволил определить скорость распространения фронта горения и с достаточно большой точностью оценить величину зоны расширения образца.

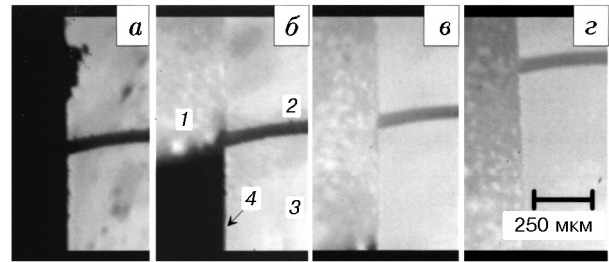


Рис. 2. Кадры видеозаписи эксперимента:  
*a* — момент поджига образца, *б* — момент прохождения фронта волны горения через метку ( $t = 0$ ), *в* —  $t = 24$  мс, *г* —  $t = 108$  мс; 1 — фронт горения, 2 — метка (проволока,  $d = 50$  мкм), 3 — подсвеченный фон, 4 — край образца

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Кадры видеодиаграммы эксперимента представлены на рис. 2. Эксперименты показали, что метка оставалась неподвижной вплоть до момента, когда ее достигал фронт волны горения. Для всех исследованных составов движение метки начиналось за фронтом горения, причем метка, как правило, двигалась в направлении, противоположном направлению волны горения. На рис. 3 приведены осредненные по нескольким экспериментам зависимости координаты метки от времени для состава  $5\text{Ti} + 3\text{Si}$ . Регистрировалось только смещение вдоль оси образца, так как изменение диаметра образца было незначительным. В составах на основе мелкого титана ПТОМ движение метки начиналось сразу же за фронтом горения, в то время как в составах с более крупным титаном ПТС с размером фракций  $100 \div 125$  и  $160 \div 200$  мкм — только через 0,02 и 0,04 с соответственно. Кроме того, изменение координаты метки было в 8–10 раз больше для тонкодисперсных смесей по сравнению с грубодисперсными. Аналогичные зависимости для состава  $\text{Ti} + \text{C}$  представлены на рис. 4. В данной системе, в отличие от системы титан — кремний, метка смещалась «скачкообразно». По-видимому, это связано с особенностью механизма горения в системе титан — углерод [8]. Интересно, что при этих различиях за равные промежутки времени метка в системах титан — кремний и титан — углерод смещалась практически на равные расстояния.

Скорость волны горения состава  $5\text{Ti} + 3\text{Si}$  изменялась от 44 мм/с при использовании порошка ПТОМ до 25 мм/с с порошком ПТС,

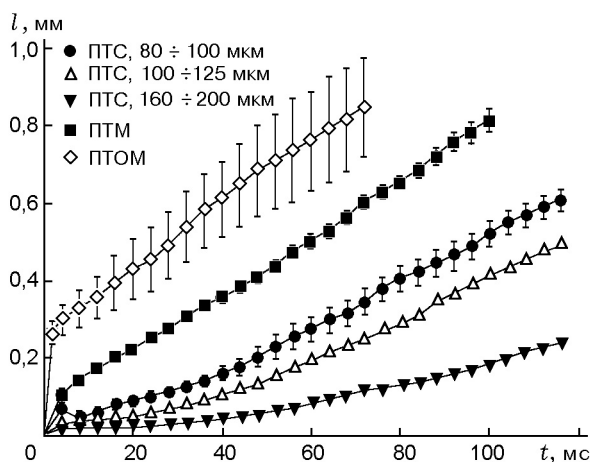


Рис. 3. Изменение координаты метки при горении состава 5Ti+3Si

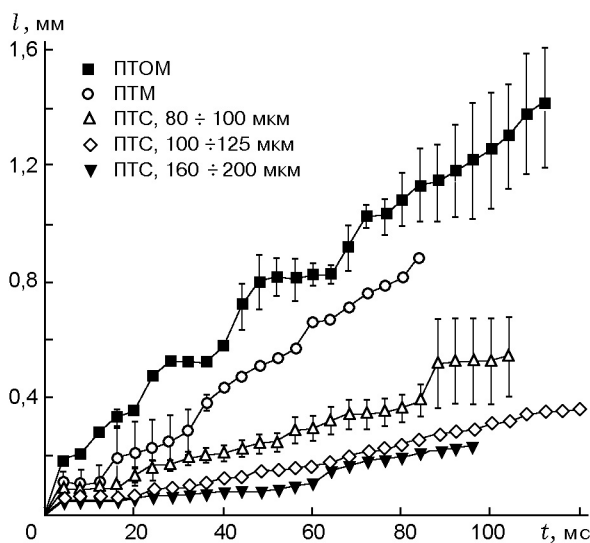


Рис. 4. Изменение координаты метки при горении состава Ti+C

160 ÷ 200 мкм, в то время как для состава Ti+C скорость была значительно меньше: 23 мм/с с порошком ПТОМ и 17 мм/с с порошком ПТС, 160 ÷ 200 мкм.

На рис. 5 представлены зависимости скорости движения метки от времени для составов 5Ti+3Si и Ti+C с маркой порошков металла ПТОМ. В системе титан — кремний наблюдается резкое ускорение метки, до 140 мм/с, непосредственно за фронтом горения, но уже через 4 мс скорость метки становится практически постоянной, не превышая 10 мм/с. В системе титан — углерод первоначальное значение ско-

рости 48 мм/с, затем скорость среды становится меньше, но не постоянной, а изменяется «скачкообразно». Эта особенность распространения фронта волны горения характерна для данной системы.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты показывают, что деформация происходит в сравнительно узкой зоне, движущейся вместе с фронтом горения. Очевидно, эта зона обладает повышенной пластичностью из-за наличия расплава, а за пределами этой зоны расплав либо не успел образоваться (исходная смесь), либо весь израсходовался в реакции (область твердого продукта). Кроме того, сопоставление результатов для систем титан — кремний и титан — углерод показывает, что в первом случае деформация происходит плавно и скорость метки возрастает монотонно, а во втором случае расширение носит колебательный (периодический) характер. Наибольший интерес представляет именно первый случай, так как он позволяет по координате произвольной точки среды (метки) рассчитать профиль плотности в волне горения.

Перейдем в систему координат, связанную с фронтом волны горения (исследовались только стационарно горящие составы), и запишем закон сохранения потока массы:

$$\rho_0 u = \rho \tilde{w},$$

где  $\rho_0$  — исходная плотность,  $\rho$  — текущая плотность,  $u$  — скорость движения исходной смеси в выбранной системе координат (численно равна скорости горения, измеренной в лабораторной системе координат, но направлена в противоположную сторону),  $\tilde{w} = w + u$  — скорость среды в системе координат, связанной с фронтом волны горения,  $w$  — скорость среды в лабораторной системе координат. Следовательно, динамика изменения плотности описывается формулой

$$\rho(t) = \rho_0 \frac{u}{u + w(t)}.$$

Таким образом, для расчета текущей локальной плотности в любой момент времени достаточно определить экспериментально исходную плотность, скорость горения и временную зависимость скорости движения метки. Аналогичное выражение можно записать и для безраз-

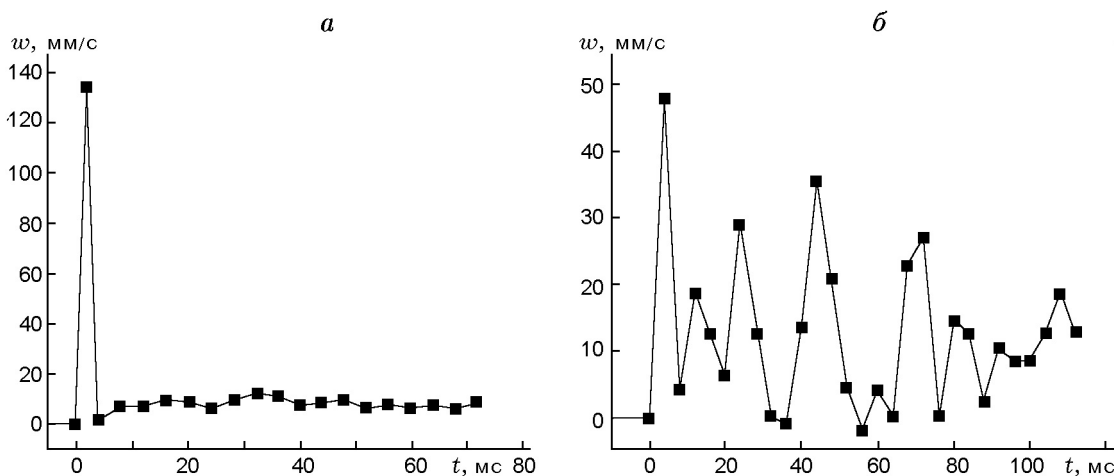


Рис. 5. Зависимость скорости движения метки от времени для составов 5Ti+3Si (а) и Ti+C (б)

мерной относительной плотности, т. е. плотности, нормированной на максимально возможную теоретическую плотность исходной среды с нулевой пористостью (или же беспористого продукта):

$$\rho^{rel}(t) = \rho_0^{rel} \frac{u}{u + w(t)}.$$

На рис. 6 показано изменение относительной плотности во времени (исходная относительная плотность  $\rho_0^{rel} = 0,45$ ). Видно, что непосредственно за фронтом волны горения плотность резко уменьшается, что соответствует расширению среды, затем резко увеличивается, что соответствует сжатию среды. Наибольшее уменьшение плотности происходит в системе ПТОМ, наименьшее — в системе с крупными частицами титана. Ширина зоны расширения 100 ÷ 300 мкм, ширина зоны сжатия 200 ÷ 300 мкм. Ширина этих зон зависит от размеров частиц порошка металла.

Таким образом, зона расширения практически совпадает с зоной реакции волны горения. Можно предположить, что «движущей силой» расширения является быстрое увеличение давления примесных и инертных газов, вызванное резким повышением температуры. Нельзя также исключить роль образования кристаллов новой фазы, что также может приводить к локальному расширению. Данный вопрос требует более детального исследования. Неожиданным оказалось наличие зоны сжатия, следующей за зоной расширения. По-видимому, это объясняется тем, что ширина «зоны теку-

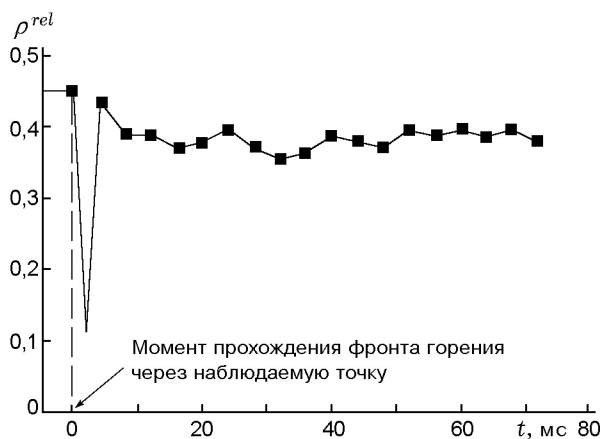


Рис. 6. Изменение относительной плотности во времени для системы титан — кремний

части» среды, обусловленной наличием расплавов и отсутствием жесткого кристаллического каркаса, превышает ширину зоны реакции. Как видно из экспериментальных данных, интенсивная деформация происходит в зоне шириной 400 ÷ 600 мкм за фронтом горения, в то время как резкое расширение ограничено зоной 100 ÷ 200 мкм. Часть пластичного вещества оказывается зажатой между зоной расширения и затвердевшим продуктом, в котором отдельные кристаллы уже образовали жесткий каркас. Поэтому резкое расширение среды в реакционной зоне естественно приводит к некоторому уплотнению мягкой прослойки между зоной реакции и продуктом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Мержанов А. Г.** Закономерности и механизм горения пиротехнических смесей титана и бора. Репринт, Черноголовка, 1978. (Препринт).
2. **Вершинников В. И., Филоненко А. К.** О зависимости скорости безгазового режима горения от давления // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 5. С. 42–47.
3. **Штейнберг А. С., Щербаков В. А., Мартынов В. В. и др.** СВС высокопористых материалов в невесомости // Докл. АН СССР. 1991. Т. 318, № 2. С. 337–341.
4. **Щербаков В. А., Сычев А. Е., Штейнберг А. С.** Макрокинетика дегазации в процессе СВС // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 4. С. 55–61.
5. **Вадченко С. Г., Гордополов А. Ю., Мукасьян А. С.** Роль молекулярного и кондуктивного механизмов теплопередачи в распространении гетерогенной волны горения // Докл. АН СССР. 1997. Т. 354, № 5. С. 610–612.
6. **Вадченко С. Г., Мержанов А. Г., Мукасьян А. С., Сычев А. Е.** Влияние одноосного нагружения на макрокинетика горения безгазовых систем // Докл. АН СССР. 1994. Т. 337, № 5. С. 618–621.
7. **Филоненко А. К., Вершинников В. И.** Газовыделение от примесей при безгазовом горении смесей переходных металлов с бором // Хим. физика. 1984. Т. 3, № 3. С. 430.
8. **Шкиро В. М., Боровинская И. П.** Исследование закономерностей горения смесей титана с углеродом // Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975. С. 253–258.

*Поступила в редакцию 20/III 2002 г.,  
в окончательном варианте — 21/V 2003 г.*

---