

риментальных данных, характеризующих кинетику термоокислительной деструкции топлива в условиях околопредельного горения.

Поступила в редакцию 24/XII 1984,  
после доработки — 15/III 1985

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Еремин, В. М. Николаев, А. С. Бобков.— В кн.: Пожаротушение. М.: ВНИИПО, 1984.
2. А. И. Ассовский, Е. П. Клейменов, О. И. Лейпунский и др. ФГВ, 1981, 17, 2, 96.
3. Справочник по пластмассам. М.: Химия, 1967.
4. K. Seshadri, F. A. Williams. J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed., 1978, 16, 7, 1755.
5. В. В. Коршак. Химическое строение и температурные характеристики полимеров. М.: Наука, 1970.
6. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960.

### ВЛИЯНИЕ МАССОВЫХ СИЛ НА ГОРЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ ПРОДУКТАМИ РЕАКЦИИ

*А. И. Кирдяшкин, Ю. М. Максимов, Е. А. Некрасов*  
(Томск)

В основе эффекта влияния поля массовых сил на горение конденсированных систем лежит действие перегрузок на зону химической реакции [1]. Наложение массовых сил деформирует структуру зоны, приводя к изменению скорости горения. В работах [2—4] использование перегрузок, создаваемых вращением горящих образцов, позволило выявить механизм горения ряда конденсированных веществ с газообразными продуктами взаимодействия.

Представляет интерес изучение воздействия перегрузок на горение гетерогенных систем с конденсированными продуктами реакции. Специфической особенностью горения таких систем является плавление и капиллярное растекание реагентов в зоне реакции [5], которое, как показано в [6], может лимитировать скорость взаимодействия. Воздействие на растекание ультразвуковых колебаний позволило в несколько раз увеличить скорость горения системы Ti—В [7, 8], что доказало возможность управления процессом безгазового горения. Естественно предположить, что действие массовых сил на растекание реагентов во фронте также приведет к изменению закономерностей горения. Перегрузки могут изменять не только скорость, но и направление течения жидкости в пористой среде, что открывает дополнительные возможности для регулирования тепло- и массообмена в волне горения и получения информации о механизме процесса.

В настоящей работе исследовались закономерности горения системы Ti—В. В опытах использовались порошки титана марок ПТЭМ-1 и ПТЭК-0, бора аморфного с содержанием основного вещества 98,8%. Порошки исходных реагентов смешивали в соотношении, отвечающем образованию соединения Ti—В, и прессовали в виде цилиндрических образцов диаметром 1,5 см, длиной 3,5 см до относительной плотности  $0,6 \pm 0,01$ . Для придания большей механической прочности образцы помещали в кварцевые трубки. Опыты проводили в центрифуге по методике [1] в среде аргона при давлении 1 атм. Массовая сила варьировалась величиной перегрузки  $G = g/g_0$ , где  $g_0$  — ускорение свободного падения;  $g = \omega^2 L$ ;  $\omega$  — угловая скорость;  $L$  — расстояние от оси вращения до центра образца. В установке предусматривалась возможность организации процесса горения как в случае одинаковых направлений массовой силы

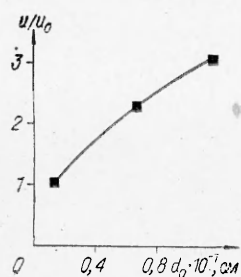


Рис. 1. Зависимость относительного изменения скорости горения от диаметра частиц титана при  $G = 1120$ ;  $u, u_0$  — соответственно скорости горения при перегрузках и в обычных условиях ( $G = 1$ ).

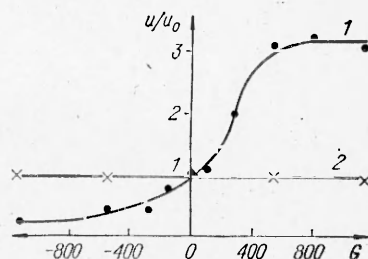


Рис. 2. Зависимости относительного изменения скорости горения от величины  $G$ .

$d_0$ , см: 1 —  $1,15 \cdot 10^{-1}$ , 2 —  $1,15 \cdot 10^{-2}$ .

и распространения фронта (положительные  $G$ ), так и противоположных (отрицательные  $G$ ). Скорость горения определяли методом фоторегистрации.

Результаты измерения скорости горения в зависимости от размера частиц металла и величины перегрузки представлены на рис. 1, 2. Видно, что воздействие  $G$  сказывается лишь для достаточно крупных частиц титана. Влияние перегрузок с разными знаками качественно различно: положительные  $G$  приводят к повышению скорости горения, отрицательные — к понижению. При горении смеси с мелким титаном перегрузки не влияют на скорость горения. Уплотнение продуктов горения за счет изменения длины образцов (рис. 3) возрастает при увеличении перегрузок обоих знаков, но не превышает 30%. На скорости горения это, по-видимому, сказывается незначительно, что подтверждается отсутствием зависимости скорости горения от  $G$  для мелкого титана.

Влияние перегрузки на скорость горения можно объяснить, исходя из анализа соотношения между масштабами растекания в поле перегрузок и при их отсутствии. Когда течение расплава происходит под действием капиллярных сил, масштаб растекания, на котором он расходится в реакции, примерно равен размеру частиц металла [6]. В поле перегрузок масштаб процесса может оказаться значительно больше, поскольку в этом случае жидкость имеет возможность направленно растекаться по всей зоне горения, создавая, таким образом, конвективный тепловой поток. Поэтому положительные  $G$ , вызывая течение расплава в сторону исходной смеси, способствуют ускорению ее нагрева и, следовательно, увеличению скорости фронта. При обратном направлении  $G$  текущий металл несет тепло в сторону продуктов, снижая тепловой поток в исходную смесь и скорость распространения волны горения. Насыщение зависимости  $u(G_+)$  обусловлено кристаллизацией расплава в низкотемпературных участках фронта. Насыщения кривых  $u(G_-)$  в исследованном интервале изменения  $G$  не обнаружено. В ряде случаев при достижении предельных для используемой установки отрицательных перегрузок наблюдались неустойчивые режимы распространения фронта. По-видимому, существует определенное значение  $G_-^*$ , при котором наступает предел горения.

Перетекание расплава под действием массовой силы проиллюстрировано на рис. 4. Крупные частицы титана 2 прямоугольного сечения запрессовывались в бор 3 и приводились в контакт с таблеткой смеси  $Ti + 2B$  1. Размер частиц титана в смеси  $\sim 0,1$  см, относительная плотность таблеток 0,61. Относительная плотность бора составляла 0,42, что равняется относительной плотности бора между частицами титана в исследованных смесях. Масса запрессованных в бор частиц была во всех случаях одинаковой и соответствовала стехиометрии  $Ti + 2B$  в слое, равном толщине частиц  $\approx 0,15$  см. При сжигании таблеток частицы плавни-

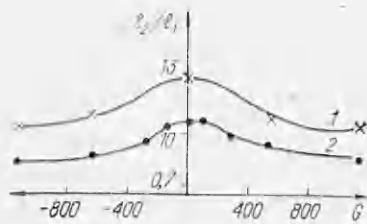


Рис. 3. Зависимости относительного изменения длины образцов от величины  $G$ ;  $l_1, l_2$  — соответственно длина образцов до и после сгорания.

$$d_0, \text{ см: } 1 - 1,15 \cdot 10^{-1}, \quad 2 - 1,15 \cdot 10^{-2}.$$

лись и растекались по пористой среде, образовав бор и продуктом горения. На месте частиц оставались полости, по форме и размерам близкие к частицам исходного титана. На фотографиях полости отмечены светлыми точками. Из рис. 4 видно, что глубина проникновения титана в бор (на фотографиях от края полости — вниз) наиболее высокая при положительных  $G$  и наименьшая при отрицательных  $G$ . В последнем случае основная часть титана перетекает в продукты горения таблетки.

Для качественных оценок полученных результатов воспользуемся уравнением [9], описывающим движение жидкости по капилляру с радиусом  $r_n$ :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r_n^3}{8\mu l} (p_k + p_g). \quad (1)$$

Здесь  $l$  — путь, пройденный по капилляру;  $p_k = 2\sigma/r_n$  — капиллярное давление;  $p_g = \rho g l \cos \varphi$  — давление, создаваемое массовой силой;  $\rho, \mu, \sigma$  — плотность, вязкость, поверхностное натяжение жидкости;  $\varphi$  — угол между направлениями течения и ускорения;  $t$  — время. В том случае, когда течение происходит под действием поверхностной силы ( $p_k \gg p_g$ ), длина пути растекания (пропитки)  $l_k$  определяется из представления исходной смеси совокупностью ячеек из частиц металла, окруженных стехиометрическим количеством бора [6]. Для смесей Ti + 2B с относительной плотностью 0,61  $l_k \approx 0,25d_0$ , где  $d_0$  — диаметр частиц металла. При  $p_k \ll p_g$  значение  $l_k$ , вообще говоря, не ограничено.

Из (1) видно, что в зависимости от  $\varphi$  перегрузки могут как увеличивать, так и уменьшать скорость растекания вдоль определенного направления. Скорость течения жидкости в пористой среде начинает зависеть от перегрузок, когда давление, создаваемое массовой силой, соизмеримо с капиллярным. Поскольку в зоне реакции размер участков, заполненных жидкостью, порядка  $d_0$ , то  $\max |p_g| \approx \rho g d_0$ . Тогда в соответствии с (1) условие  $p_k / \max |p_g| \ll 1$  записывается в виде

$$2\sigma/r_n d_0 \rho g \ll 1. \quad (2)$$

Подставляя в (2)  $\sigma = 10^3$  г/с<sup>2</sup>,  $\rho = 4$  г/см<sup>3</sup> [10] и экспериментальные значения  $g = 10^3 \div 10^6$  см/с<sup>2</sup>, получим, что для  $d_0 = 10^{-1}$  и  $10^{-2}$  см это условие выполняется соответственно при  $r_n = 10^{-1} \div 10^{-2}$  и  $1,0 - 10^{-1}$  см. Отсюда следует, что в изученном интервале перегрузок массовая сила не может вызвать изменения скорости растекания мелкого титана ( $d_0 \approx 10^{-2}$  см), так как необходимые размеры пор намного превышают все реальные масштабы гетерогенности смеси. Это согласуется с опытными данными на рис. 1, показывающими, что скорость горения смесей с мелким титаном от  $G$  не зависит.

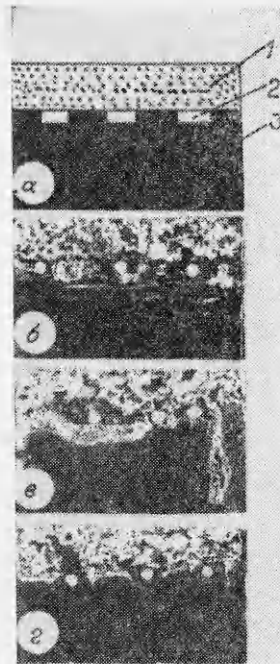


Рис. 4. Фотографии разрезов исходного образца (а) и после сгорания при  $G = 1, 1120$  и  $-1120$  (б — г).

При горении смесей с крупным титаном ( $d_0 \approx 10^{-1}$  см) каналами растекация с размером  $10^{-1}$ — $10^{-2}$  см могут служить пространства между частицами, возникающие из-за возможной неоднородности в плотности бора, и полости, оставшиеся на месте растекшегося металла. Поскольку предел прочности образцов на сжатие не превышает 6—8 кг/см<sup>2</sup>, а механические напряжения при  $G \approx 10^3$  достигают того же уровня, такими каналами могут быть и трещины в образце, возникающие от сжатия массовой силой. В ряде случаев трещины наблюдались в приповерхностных областях сгоревших образцов (см. рис. 4, в).

Попутно с растеканием расплава по большим каналам под действием  $G$  возможно также и перемещение целых капель жидкости по участкам, занятым неметаллом. Размер участков порядка размера частиц титана. В этом случае жидкость движется за счет растворения бора, а также захвата каплей целых конгломератов из частиц бора. Вследствие больших различий в плотностях жидкости и бора, последний постоянно отводится от границы с расплавом в глубь жидкости, обеспечивая условия для перемещения капли.

В заключение следует отметить, что вынужденное течение жидкости в волне горения может приводить также к увеличению скорости реакции из-за повышения полноты смешения реагентов. Однако последнее не объясняет качественного различия влияния направления силы тяжести на скорость распространения фронта. Стало быть основной причиной влияния перегрузки на скорость горения остается конвективный перенос тепла растекающимся металлом, направление которого задано направлением массовой силы. Таким образом, в работе показана возможность конвективного горения безгазовых систем с плавящимся компонентом в поле массовых сил.

Авторы благодарят А. Г. Мержанова за обсуждение работы.

Поступила в редакцию 21/1 1985

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Н. Максимов, Ю. М. Максимов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1967, 3, 3, 323.
2. Ю. М. Максимов, Э. Н. Максимов. ФГВ, 1972, 8, 4, 517.
3. Э. Н. Максимов, Ю. М. Максимов, В. Ф. Чусов. ФГВ, 1971, 7, 2, 197.
4. Ю. М. Максимов, Э. Н. Максимов, В. П. Вилонов. ФГВ, 1974, 10, 169.
5. В. М. Шкиро, Н. П. Боровинская. ФГВ, 1976, 12, 6, 945.
6. Е. А. Некрасов, Ю. М. Максимов, М. Х. Зиятдинов и др. ФГВ, 1978, 14, 5, 26.
7. А. И. Кирдяшкин, Ю. М. Максимов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1981, 17, 6, 10.
8. Ю. М. Максимов, А. Г. Мержанов, А. И. Кирдяшкин.— В кн.: Проблемы технологического горения. Т. 1. Черноголовка, 1981.
9. В. Г. Левич. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959.
10. В. П. Андронов, Б. В. Чекин, С. В. Нестеренко. Жидкие металлы и шлаки. М.: Металлургия, 1977.

#### О МАКСИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ, ДОСТИЖИМЫХ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МЕТАЛЛОВ С ГАЗАМИ

*В. И. Карпенюк, Ю. С. Найбороденко, Л. Я. Кашипов, В. Д. Гладун*  
(Томск)

Вопрос о максимальных температурах, достижимых в химических реакциях, рассмотрен в [1]. Показано, что при достаточном тепловыделении ( $T > 4000$  К) максимальное ее значение определяется энергией диссоциации конечных продуктов реакции. Однако этот вопрос рассмотрен для газофазных реакций, в ряду которых наибольшие температуры ( $\sim 6000$  К) получены для реакций образования самых прочных молекул (СО и N<sub>2</sub>).