

В настоящей работе рассмотрен случай горения с образованием твердых продуктов реакции, однако принятый подход при соответствующем усложнении расчетной схемы может быть распространен на более общий случай горения газообразующих систем.

Поступила в редакцию 18/XI 1982,
после доработки — 30/V 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Алдушин, А. Г. Мержанов, Б. И. Хайкин. Докл. АН СССР, 1974, 512, 3.
2. А. П. Алдушин, Т. П. Ивлева, А. Г. Мержанов и др.— В кн.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черногловка, 1975.
3. А. П. Алдушин, Б. С. Сеплярский. Теория фильтрационного горения пористых металлических образцов. Препринт. Черногловка, 1977.
4. И. П. Боровинская, А. И. Питюлин. ФГВ, 1978, 14, 1.
5. А. Н. Питюлин, В. А. Щербаков, И. П. Боровинская и др. ФГВ, 1979, 15, 4.
6. К. Хауффе. Реакции в твердых телах и на их поверхности. М.: Металлургия, 1962.
7. А. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Статистическая физика. М.: Наука, 1976.
8. А. П. Алдушин, Б. И. Хайкин. ФГВ, 1974, 10, 3.
9. С. С. Забродский. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963.
10. В. И. Аравин, С. Н. Нумеров. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. М.: ГИТТЛ, 1953.

РАЗВИТИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В ПЛОСКОМ СЛОЕ ПОРИСТОГО ВЕЩЕСТВА

Н. Н. Столярова, Г. С. Сухов
(Ленинград)

В последние годы интенсивно развиваются исследования по горению металлов, например, [1—6]. Последние ориентированы прежде всего на изучение особенностей развития высокотемпературного синтеза в зависимости от физико-химических свойств реагентов, внешних условий и способов организации процесса. Объектом выполненных до настоящего времени экспериментов были, как правило, образцы цилиндрической формы, приготовленные либо из химически активной смеси порошкообразных металла и неметалла, либо из порошкообразного металла, способного гореть в атмосфере газообразного окислителя. Наряду с этим определенным интерес представляют процессы, развивающиеся в слоях вещества различной конфигурации.

В настоящей работе обсуждаются некоторые результаты экспериментального исследования горения порошкообразного металла в плоских засыпках при подводе окислителя через открытую свободную поверхность.

Опыты проводились в атмосфере азота с порошкообразным титаном марки ИТС с эффективным размером частиц $3 \cdot 10^{-4}$ м. Горение осуществлялось в слоевых засыпках размером $0,05 \times 0,105$ м при трех фиксированных значениях высоты $H = 5, 10$ и 15 мм и насыпной плотности порошка $(1,86 \pm 0,06) \cdot 10^3$ кг/м³. Образцы располагались на подложке из огнеупорного шамота с теплопроводностью $\lambda = 1,167$ Вт/(м · К) и помещались в барокамеру постоянного давления объемом $0,02$ м³, оснащенную системами откачки воздуха, подачи окислителя, поджигания, а также различными средствами наблюдения за развитием горения. Образцы поджигались от источника постоянного тока с помощью устройства, состоящего из вольфрамовой нити диаметром $0,55$ мм, погруженной в слой легковоспламеняющегося мелкодисперсного титанового порошка. Такой способ обеспечивал достаточно высокую стабильность и однородность (по поперечному сечению) воспламенения исследуемых

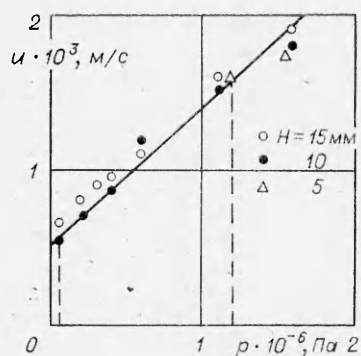


Рис. 1. Зависимость скорости распространения горения от давления окислителя при $c = 0$; штриховыми линиями отмечены значения $p_{кр}$ при $H = 10$ и 5 мм.

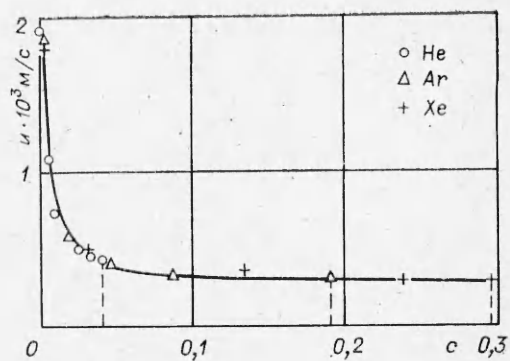


Рис. 2. Зависимость скорости горения от концентрации инерта в окислителе при $H = 15$ мм и давлении смеси газов $1,6 \cdot 10^6$ Па; штриховыми линиями отмечены значения $c_{кр}$ для гелия, аргона и ксенона.

слоевых образцов. Перед экспериментами титановый порошок обезвоживали под вакуумом 2 ч при $T = 360$ К.

За распространением горения в образце наблюдали через иллюминатор с помощью кинокамеры РФК-5, оснащенной устройством для регулирования частоты съемки от 1 до 10 кадр/с. Скорость горения определялась по времени прохождения волной базового участка протяженностью 60 мм в центральной части образца, размеченного несколькими реперными штифтами.

Исследовались зависимости скорости горения от давления окислителя p , состава газовой фазы и высоты H слоя засыпки. Опыты, выполненные при варьировании параметров p и H в достаточно широких пределах (рис. 1) показали, что скорость распространения горения слабо зависит от изменения высоты засыпки. Влияние давления существенно и в пределах погрешности измерений (порядка 10%) может быть аппроксимировано линейной зависимостью

$$u = u_0[1 + 0,072(p/p_0 - 1)],$$

где $u_0 = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м/с; $p_0 = 0,5 \cdot 10^5$ Па (сплошная линия на рис. 1).

В опытах наблюдалось явление срыва горения, наступающее при снижении давления до некоторого $p_{кр}$ (см. рис. 1). Причем значение $p_{кр}$ резко возрастает с уменьшением высоты слоя засыпки (при $H = 10$ мм $p_{кр} = 0,5 \cdot 10^5$ Па, при $H = 5$ мм $p_{кр} = 1,2 \cdot 10^6$ Па), что связано с ухудшением условий горения вследствие роста относительной доли теплопотерь во внешнюю среду.

Для оценки влияния газообразной инертной добавки на развитие горения в опытах использованы гелий, аргон и ксенон с резко различающимися значениями молекулярной массы. Обнаружена сильная чувствительность скорости горения к уровню начального содержания инерта в окислителе¹. Из данных рис. 2 видно, что убывание скорости горения с ростом содержания инерта завершается срывом высокотемпературного процесса при достижении некоторой предельной концентрации $c_{кр}$, зависящей от вида присадки. Причем с ростом молекулярной массы величина $c_{кр}$ возрастает линейно.

Существенно, что представленная на рис. 2 зависимость $u(c)$ свидетельствует о возможности обобщения данных по торможению волны горения различными инертными газами, если содержание последних в окислителе оценивать не отношением парциальных давлений инерта и окислителя, как в [8], а концентрацией инерта

¹ Ранее этот эффект наблюдался в [8, 9] при исследовании горения цилиндрических образцов циркония и титана в азоте с добавлением гелия или аргона.

$$c = \left(1 + \frac{p_N}{p_{II}} \frac{\mu_N}{\mu_{II}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где p_{II} , p_N — соответственно парциальные давления инерта и окислителя; μ — молекулярная масса. При этом вид зависимостей скорости горения от p_{II}/p_N получается таким же, как в [8], в чем легко убедиться, перейдя с помощью (1) от c к переменной p_{II}/p_N .

Наблюдаемые закономерности можно объяснить, если сделать допущение о том, что разогрев инертного компонента в зоне горения приводит к существенному локальному росту давления и сопровождается переориентацией фильтрационного потока в направлении внешней среды. Этот эффект, выраженный сильнее у легких, более упругих инертных газов, при нарастании их концентрации в окислителе может стать фактором, все более затрудняющим диффузию окислителя к фронту реакции, и в условиях внешних теплопотерь привести к срыву горения.

Киносъемка процесса при одновременной регистрации излучения фоторезистором показала, что горение в засыпках носит отчетливо выраженный неустойчивый характер. В образцах высотой 10 мм при $p > 2 \cdot 10^5$ Па и 15 мм при $p > 6 \cdot 10^5$ Па нестационарность проявлялась в виде автоколебаний с фазами депрессий и вспышек при сохранении плоской формы фронта.

О колебательном характере процесса можно судить по пульсациям амплитуды сигналов фоторезистора, пропорциональных интенсивности свечения горящего образца (рис. 3). О том же свидетельствуют обнаруженные при обработке кинограмм процесса периодические изменения скорости распространения волны горения. Скорость волны на стадии вспышки u_{max} существенно выше ее среднего значения u , а в депрессии u_{min} заметно ниже. Например, для первого и второго режимов горения на рис. 3 $u_{max} = 2,25$ и $2,32$ мм/с, $u_{min} = 1,5$ и $1,24$ мм/с при $u = 1,95$ и $1,75$ мм/с.

Снижение давления по отношению к указанным выше предельным значениям или разбавление окислителя инертным газом ведет к переходу в спиновый режим горения. Для него характерны искривление фронта и появление одного или нескольких ярко светящихся горячих пятен. Судя по сигналам фоторезистора, частота пульсаций процесса в сравнении с автоколебательным режимом несколько снижается (табл. 1).

Для наблюдения за распространением горения в глубине слоя использовались терморезисторы ВР 5/20, помещенные в различных его точках. Их показания, обработанные с учетом перемещения фронта, позволяют воспроизвести форму последнего и оценить глубину проникновения реакции в слой твердого реагента. Результаты измерений (рис. 4) дают определенное представление об этих характеристиках процесса. Снижение давления окислителя ведет к сокращению глубины проникновения

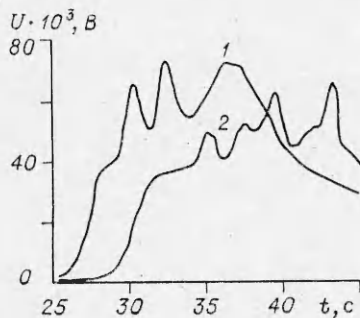


Рис. 3. Показания фоторезистора при $p = 1,6 \cdot 10^6$ Па.
1 — $H = 15$ мм; 2 — $H = 10$ мм.

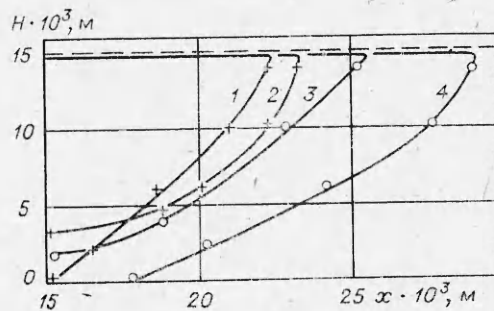


Рис. 4. Форма фронта горения внутри слоя $H = 15$ мм.
 p , Па: $1,6 \cdot 10^6$ (1, 2, 4), $0,6 \cdot 10^6$ (3); $c = 0$ (3, 4), $0,01$ He (1), $0,02$ He (2).

Таблица 1

Частота колебаний f в зависимости от давления окислителя и высоты слоя, $c = 0$ (звездочкой отмечены спиновые режимы горения)

$p \cdot 10^{-5}$, Па	f , Гц	
	$H=10$ мм	$H=15$ мм
3	—	0,09 *
4	—	0,14 *
5	0,06	—
6	0,07	0,19 *
11	0,33	0,25
16	0,50	0,29

реакции. Зона выгорания имеет клинообразную форму и, как правило, сильно вытянута в продольном направлении, что свидетельствует о неодинаковой интенсивности процесса на различных участках фронта горения. Если в глубине слоя, куда поступление окислителя затруднено вследствие спекания продукта или теплового расширения инерта, скорость распространения горения определяется медленными процессами фильтрации или диффузии, то вблизи открытой поверхности, где эти процессы интенсифицируются, скорость горения существенно возрастает. Однако на самой поверхности в большинстве опытов наблюдается остаточный слой титанового порошка толщиной до 0,5 мм, свидетельствующий об отсутствии химической реакции. Явление срыва горения на поверхности впервые обнаружено в численных экспериментах [7] и объяснялось охлаждающим действием поступающего из внешней среды окислителя.

В данном случае другой возможной причиной этого явления следует считать также теплопотери излучением.

Регистрация привеса образца после эксперимента дает возможность оценить среднее значение полноты превращения η в слое по соотношению $\eta = 2\mu_M g / \mu_N G$, где μ_M — атомная масса титана; g — привес; G — первоначальный вес образца. Табл. 2 иллюстрирует зависимость η от концентрации инертной добавки в окислителе.

Приведенные здесь же значения полноты превращения, найденные из анализа проб продукта в центре образца методом Кьельдаля², несколько превышают значения η , вычисленные по привесу образцов. Эти расхождения есть следствие локализации горения в части слоя и вытекающего из этого завышения величины G , принимаемой в расчетной формуле за исходную массу всего образца. И все же в обоих случаях просматривается явная тенденция к снижению полноты превращения в слое с увеличением содержания инертной примеси в окислителе.

Поступила в редакцию 22/X 1982,
после доработки — 7/II 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Шкиро, В. К. Прокудина, И. П. Боровинская. Порошковая металлургия, 1981, 12.
2. Н. А. Мартиросян, С. К. Долуханян, Г. М. Мкртчян и др. Порошковая металлургия, 1977, 7.
3. И. П. Боровинская, В. Э. Лорян. Порошковая металлургия, 1978, 11.
4. И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов, А. Н. Питюлин и др. — В кн.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975.
5. А. Н. Питюлин, В. А. Щербаков, И. П. Боровинская и др. ФГВ, 1979, 15, 4.
6. И. П. Боровинская, А. Н. Питюлин. ФГВ, 1978, 14, 1.
7. Т. П. Ивлева. Канд. дис. ОИХФ АН СССР, 1981.

² Химический анализ на содержание азота в продукте выполнен в лаборатории ОИХФ АН СССР.

8. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская, Ю. Е. Володин. Докл. АН СССР, 1972, 206, 4.
9. А. К. Филоенко, В. И. Вершинников. ФГВ, 1975, 11, 3.
10. А. Г. Мержанов, А. К. Филоенко, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1973, 208, 4.

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РЕЖИМЫ
НЕУСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ ОБРАЗЦА
БЕЗГАЗОВОГО СОСТАВА В ФОРМЕ ДЛИННОГО СТЕРЖНЯ
КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ**

С. Б. Щербак
(Москва)

Установившееся после поджигания горение образцов безгазовых составов может проходить в стационарном или различных нестационарных режимах. К нестационарным или неустойчивым режимам горения относят автоколебательный, спиновый и другие режимы, наблюдаемые в эксперименте [1—3]. Впервые пульсирующий режим горения обнаружен при численном решении системы одномерных уравнений теплопроводности и кинетики с учетом протекания химической реакции аррениусовского типа, описывающей распространение фронта горения по конденсированной фазе [4]. В теоретических работах, посвященных исследованию устойчивости плоского фронта пламени, использовалась модель «узкой зоны» [5]. Эта модель рассматривает зону химической реакции как поверхность слабого газодинамического разрыва. Граница устойчивости плоского фронта пламени к пространственным возмущениям в приближении «узкой зоны» найдена в [6], где, в частности, показано, что наиболее опасны для пламени не одномерные возмущения, а пространственные. Аналогичный результат получен также без использования предположения о квазистационарности скорости сгорания вещества [7] и прямым численным расчетом нелинейной пространственной задачи [8].

Результаты [6] во многом объясняют, почему в области неустойчивого распространения плоского фронта пламени при небольшой закритичности наблюдаются сложные пространственные структуры и помогают найти возможные формы этих структур в различных случаях [8—10]. Так, для образцов безгазовых составов в форме стержней с произвольным поперечным сечением форма этих структур определяется собственными функциями оператора Лапласа для этого сечения [10]. Однако линейный анализ оказывается недостаточным для определения реализующегося в действительности неустойчивого режима горения. Дело в том, что в линейном приближении большинство критических возмущений является двукратно вырожденными, т. е. конкретным параметрам задачи отвечают два линейно независимых решения, а значит есть «веер» допустимых решений. Прояснить ситуацию может нелинейный анализ или численный расчет пространственной задачи. Теоретическое изучение неустойчивых режимов горения при небольшой и умеренной закритичности в настоящее время возможно с применением численных методов. Отметим выполненные в [11] расчеты закономерностей спинового горения с помощью простой двумерной модели [12] и работу [8], где получен осесимметричный или, как назвали в [2], кольцевой режим горения образца безгазового состава цилиндрической формы.

В настоящей работе численными методами изучаются неустойчивые режимы горения образца безгазового состава в виде длинного стержня квадратного сечения. Численно решается нестационарная пространствен-