

нения или не было, или процесс горения шел недостаточно эффективно ( $\eta_1 = 0,2 \div 0,6$ ).

Если горение началось, то выключение свечи не приводило к срыву горения. Прекращение подачи  $H_2$  через пояс I вело к погасанию пламени, что подтверждает предположение о недостаточной дальнобойности струй пояса подачи III.

При подаче водорода только через пояс III (режимы с дозвуковым горением) воспламенения не происходит, по-видимому, из-за непопадания  $H_2$  в нишевые стабилизаторы на центральном теле. Поэтому предполагается целесообразным установление воспламенителя — свечи зажигания — на верхней стенке канала.

По результатам работы могут быть сделаны следующие выводы.

Полнота горения при подаче  $H_2$  через пояса I и II и через пояса отверстий I и III изменяется от 0,7 при  $\alpha_z \approx 1$  до  $0,95 \div 1$  при  $\alpha_z \geq 2$ ; если  $H_2$  поступал только в пояс III во всем диапазоне  $\alpha_{III} = 3,0 \div 4,0$ , воспламенение топлива отсутствовало из-за недостаточных размеров стабилизатора для самовоспламенения в исследованных условиях.

При подаче водорода через пояса I и III с ростом его расхода на первом участке канала увеличивается интегральная полнота горения и уменьшается  $\alpha_{zmin}$ , при котором реализуется течение в канале без срыва. Так, при  $\alpha_1 = 2,4$   $\alpha_{zmin} = 1,2$ , а при  $\alpha_1 = 2,8$   $\alpha_{zmin} = 1,1$ . Если  $\alpha_1 = 3,6$ , срыв течения на входе не наблюдался вплоть до  $\alpha_z = 1$ .

Если водород поступал в пояса I и II, переход от сверхзвукового режима горения к дозвуковому происходил при  $\alpha_z = 2,1$ , а в варианте подачи в пояса I и III переход соответствует  $\alpha_z = 1,4 \div 1,6$ . Для  $\alpha_1 > 2,7$  наблюдались случаи отсутствия горения в нишевом стабилизаторе первого участка. Относительная доля тепла, отводимого в стенку при  $\alpha_z \approx 1$ , составляет 20—25 % от подведенного.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hypersonic research engine project. Phase 2: aerothermodynamic integration model development, 1968.
2. Billig F. S., Dugger G. L., Waltrup P. J. Inlet-combustor interface problems in scramjet engines // 1st Int. Symp. on Air Breathing Engines, June 19—23, 1972.—Marseille (France).
3. Waltrup P. J., Anderson G. Y., Stull F. D. Supersonic combustion ramjet engine development in the United States // The 3d Int. Symp. on Air Breathing Engines.—Munich (Germany), 1976.
4. Баев В. К., Шумский В. В., Ярославцев М. И. Исследование распределения давления и теплообмена в газодинамической модели с горением, обтекаемой высокоэнthalпийным потоком воздуха // ПМТФ.—1985.—№ 5.—С. 56—65.
5. Баев В. К., Шумский В. В., Ярославцев М. И. Некоторые методические аспекты исследования газодинамических моделей с тепломассоподводом в импульсной аэродинамической трубе // ФГВ.—1987.—23, № 5.—С. 45—54.
6. Авдеевский В. С. Метод расчета пространственного турбулентного пограничного слоя в сжимаемом газе // Изв. АН СССР. МЖГ.—1962.—№ 4.—С. 3—12.

г. Москва

Поступила в редакцию 22/VIII 1990

УДК 546

В. Н. Санин, С. Л. Силяков, В. И. Юхвид

#### РАСПРОСТРАНЕНИЕ ФРОНТА ГОРЕНИЯ ПО ДЛИННОМЕРНОМУ КАНАЛУ

Экспериментально изучена феноменология, закономерности и механизм распространения фронта горения по железоалюминиевому термиту в длинномерном канале. Описана динамика изменения ориентации фронта горения в зависимости от калорийности смеси и предложен механизм этой динамики. Показано, что существуют пределы горения в вертикальном и продольном направлениях по ширине канала и калорийности смеси.

В исследовании горения гетерогенных систем горение длинномерных образцов с открытой поверхностью — одно из направлений. Гетерогенные системы с открытой поверхностью горят с образованием и течением газа вдоль поверхности. Примерами такого горения являются распространение фронта пламени по полимерному образцу в условиях подвода окислителя из атмосферы [1] и распространение лесных пожаров [2]. Более сложно протекает процесс в пористых и многоканальных пороках и взрывчатых веществах, где образующийся газ с высокой скоростью фильтруется в порах вещества. Скорость горения в этом случае определяется перемещением фронта воспламенения конвективным потоком [3]. В настоящей работе впервые изучены закономерности горения высококалорийной гетерогенной системы типа оксид — восстановитель по длинномерному каналу, широко используемых в СВС и металлургических процессах [4, 5].

Исследовался стехиометрический состав  $75\% \text{Fe}_2\text{O}_3 + 25\% \text{Al}$ , который разбавлялся конечным продуктом горения — оксидом алюминия в интервале  $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 30\%$  масс. В качестве исходных материалов использовали порошки  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  марки ЧДА,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  марки Ч и АІ АСД-1. Основная серия экспериментов проводилась в тугоплавкой форме (рис. 1) с шириной канала 20, длиной 300 и высотой 30 мм, лицевая часть которой была изготовлена из кварцевого стекла с целью визуального наблюдения за фронтом горения. Плотность засыпки экзотермического состава постоянна и составляла  $1,1 \text{ г/см}^3$ . Состав инициировали с верхнего открытого конца с помощью высокочастотной электрической дуги. Эксперименты выполнялись по четырем основным схемам (рис. 2). Изучалось горение однослойных и двухслойных составов, отличающихся друг от друга тепловым эффектом, а также устойчивость горения при введении преграды на пути его распространения в верхней или нижней части канала.

В опытах измерялись стационарная линейная скорость горения  $u$ , и глубина разброса  $\eta_p$ . Линейную скорость измеряли по методике перегораемых проволочек и с помощью каскада фотодиодов с последующей регистрацией сигналов на светолучевой комплекс К-121 (рис. 3). Особенности распространения фронта горения фиксировались с помощью покадровой съемки фотоаппаратом «Зенит-ТТЛ». Глубину разброса вычисляли по формуле  $\eta_p = (M_0 - M_n) / M_0$ , где  $M_0$  — масса исходного состава,  $M_n$  — масса продуктов горения.

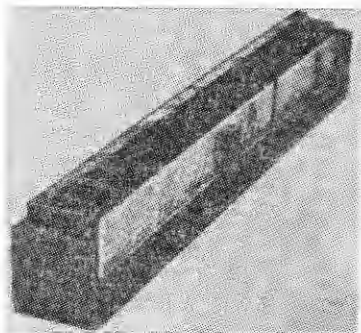


Рис. 1. Тугоплавкая форма для сжигания.

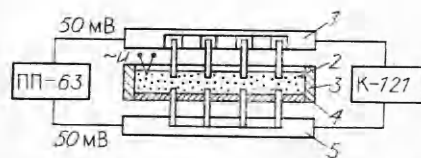


Рис. 3. Схема установки.

1 — каскад перегораемых проволочек; 2 — кварцевое стекло; 3 — форма; 4 — смесь; 5 — каскад фотодиодов.

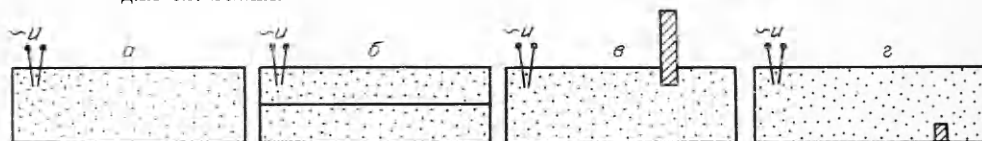


Рис. 2. Постановка опытов.

а — однослойная смесь; б — двухслойная смесь; в — с верхней преградой; г — с нижней преградой.



Рис. 4. Влияние калорийности состава на характер горения.

Визуальное наблюдение процесса горения гетерогенных составов в одно- и двухслойном вариантах с различной калорийностью выявило сложную, богатую эффектами картину горения. В зависимости от калорийности составов в экспериментах реализуются четыре основных ситуации (рис. 4). Для высококалорийных составов формируется стационарный фронт горения, угол наклона которого к горизонту менее  $90^\circ$  (рис. 5, а), который перемещается по каналу со стационарной линейной скоростью. Перед и над фронтом горения формируется «огненный вал» из газообразных продуктов горения и диспергируемых частиц. В отдельных случаях крупные капли расплава выбрасываются из фронта, перелетают на значительное расстояние от фронта и вызывают воспламенение состава. В этом случае формируется встречный фронт горения. Продукты горения высококалорийных составов имеют литой вид и формируются на дне канала в виде двухфазного слоя, состоящего из расплавленных корочек металла и оксидной матрицы. Для составов со средней калорийностью, разбавленных оксидом алюминия до 10 %, наклон фронта горения приближается к  $90^\circ$  (рис. 5, б). Фронт горения перемещается со стационарной скоростью при незначительной интенсивности «огненного вала». Для слабокалорийных составов наклон фронта горения к горизонту более  $90^\circ$  (рис. 5, в). «Огненный вал» практически отсутствует, форма фронта меняется из-за разрушения образующегося нависающего «козырька» из исходной смеси. Как и в первых двух случаях продукты горения имеют литой вид.

Разбавление железоалюминиевого термита на 20 %  $Al_2O_3$  приводит к невозможности перемещения фронта горения по длине канала. В этой ситуации, после воспламенения состава происходит лишь перемещение фронта горения от открытой части к донной только под воспламенителем (рис. 4, г). Эксперименты по экранированию открытой поверхности высококалорийных составов инертным веществом ( $Al_2O_3$ ) изменяют положение фронта горения (рис. 5, г). Вместо наклонного формируется вертикальный фронт, который перемещается со стационарной скоростью по длине канала. Наличие преграды на пути распространения фронта горения для слабокалорийных составов приводит к прекращению горения. Для высококалорийных составов после прохождения преграды форма

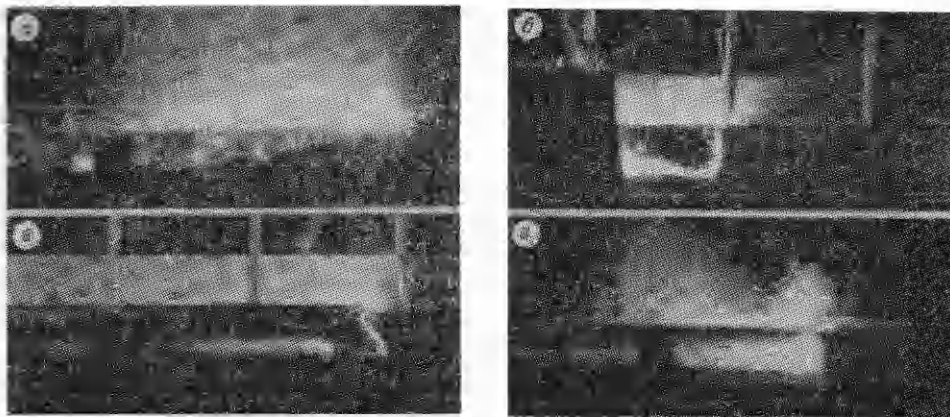


Рис. 5. Характерный вид распространения фронта горения для высококалорийных (а), со средней калорийностью (б) и слабокалорийных составов (в). г) горение при плакировании оксидом алюминия.

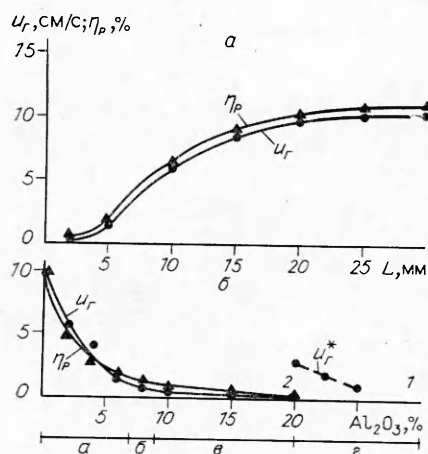


Рис. 6. Зависимости  $u_r$  и  $\eta_p$  от  $L$  (а) и степени разбавления конечным продуктом (б).

(рис. 6, а). Первый ( $L=2$  мм) связан с прекращением перемещения фронта горения по каналу, второй ( $L=1$  мм) с прекращением распространения фронта горения в вертикальном направлении. Разбавление исходной смеси инертной добавкой ( $Al_2O_3$ ) приводит к падению скорости горения и глубины разброса (рис. 6, б). При содержании  $Al_2O_3$  20 % горение становится невозможным в продольном направлении, а при разбавлении до 30 % невозможно распространение в вертикальном направлении под местом иницирования.

С целью взаимного влияния слоев с различной калорийностью на процесс и характер горения проведена серия экспериментов. Индивидуальная скорость горения слоев измерена в предварительно проведенных экспериментах и составляла 1,8 и 0,18 см/с соответственно. В условиях, когда высококалорийный состав помещался в верхний слой, скорость горения его была сравнима с индивидуальной, скорость горения нижнего слоя возрастала в 7 раз. При обратном сочетании слоев фронт горения нижнего высококалорийного слоя перемещается со скоростью, в 3 раза меньше индивидуальной, но опережая фронт горения низкокалорийного состава, расположенного в верхней части. Скорость горения низкокалорийного состава в этом случае возрастает в 1,6 раза.

Исходя из приведенных результатов можно сформулировать представление о механизме горения плавящихся гетерогенных систем типа термита в длинномерном канале.

Рассмотрим длинномерный канал, по которому перемещается фронт горения, а впереди него движется двухфазный поток продуктов горения, состоящий из газообразных продуктов и диспергирующих частиц с температурой, сравнимой с температурой горения состава. Твердые частицы обладают значительным запасом тепла и, падая на открытую поверхность состава, воспламеняют ее. Расстояние, на которое перемещаются частицы от фронта горения до места падения, определяется скоростью течения образующегося газа и массой частиц. Таким образом, перемещение двухфазного потока по поверхности состава вызывает его воспламенение и определяет скорость горения вдоль канала. Кроме того, после воспламенения горение перемещается в глубину засыпки со скоростью, равной собственной скорости горения термитного состава.

Процесс горения можно охарактеризовать с помощью двух составляющих скоростей горения: горизонтальной  $u_{||}$  и вертикальной  $u_{\perp}$ . Соотношение этих скоростей и определяет тангенс угла наклона фронта горения:

$$\operatorname{tg} \alpha = u_{\perp} / u_{||}$$

Для высококалорийных составов, у которых  $u_{\perp} \ll u_{||}$ ,  $\operatorname{tg} \alpha \ll 1$ . Скорость нормального распространения фронта горения в вертикальном направлении осуществляется за счет теплопроводности, а скорость перемещения в горизонтальном направлении определяется скоростью перемещения

двухфазного потока. Для слабокалорийных составов перенос тепла по поверхности двухфазным потоком отсутствует. Перемещение его во всех точках обусловлено теплопроводностью. В этих условиях нижние слои засыпки, контактирующие со слоем расплава продуктов горения (рис. 4, в), имеют преимущество перед верхними слоями состава. В этой ситуации скорость горения определяется процессами, происходящими в данной части канала. В результате наклон фронта горения становится более  $90^\circ$ . Аналогичные закономерности замечены на других термитных сложных составах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбанин С. С., Соболев С. Л. Распространение волн воспламенения в макронеоднородных системах/АН СССР. ОИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1986.— С. 11.
2. Струнина А. Г., Демидова Л. К., Фирсов А. И. и др. Устойчивость горения безгазовых систем при наличии потерь // ФГВ.— 1973.— 23, № 3.— С. 52.
3. Беляев А. Ф., Боболов В. К., Коротков А. И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв.— М.: Наука, 1973.
4. Плинер Ю. Л., Игнатенко Г. Ф. Восстановление окислов металлов алюминием.— М., 1967.
5. Мержанов А. Г., Юхвид В. И., Боровинская И. П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез литых тугоплавких соединений // Докл. АН СССР.— 1980.— 255, № 1.— С. 120—124.

*п. Черноголовка*

*Поступила в редакцию 11/X 1990*

УДК 536.46

*И. Н. Дорожеев, Э. А. Штессель*

### РОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ПРИ ГОРЕНИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Рассматривается влияние поверхностных процессов и химических транспортных реакций на горение СВС-систем через изменение поверхности контакта реагентов. Предлагается модель, позволяющая учесть изменение поверхности контакта в процессе распространения волны горения. Показано, что поверхностная диффузия и химический транспорт одного из реагентов к поверхности другого способны увеличить скорость горения в 3—4 раза, для достижения максимальных скоростей необходимо формирование поверхности контакта реагентов в зоне прогрева волны горения.

В настоящее время получение различных материалов с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) имеет широкое распространение. Существует большое количество теоретических и экспериментальных работ, изучающих механизм этого процесса [1, 2]. Одна из особенностей СВС-системы — дисперсный характер, частицы одного реагента имеют неполную поверхность контакта с частицами другого реагента. Кроме того, между частицами в такой системе существует свободное поровое пространство. Так как скорость тепловыделения зависит от удельной поверхности контакта, увеличением или уменьшением поверхности контакта можно изменять скорость волны горения.

Самым простым способом такого управления служит уплотнение шихты перед синтезом. Увеличить поверхность контакта в самом процессе СВС можно с помощью поверхностных процессов, таких как поверхностная диффузия, растекание [3, 4]; с помощью переноса одного из компонентов на свободную поверхность другого посредством химической транспортной реакции [5]. Тогда увеличением поверхности контакта реагентов можно обеспечить необходимое для распространения волны тепловыделение.

Макрокинетическая модель, описывающая указанные выше процессы, может быть сформулирована следующим образом. Рассмотрим СВС-