

объясняется неблагоприятными фазовыми соотношениями между колебаниями скорости тепловыделения и давления, так как пламя находилось несколько выше узла давления и скорость тепловыделения изменялась практически в противофазе с колебаниями давления во всем исследованном диапазоне частот [1].

Эксперименты с турбулентными пламенами проводились при невысоких значениях чисел Рейнольдса и интенсивности турбулентности. При таких условиях режим турбулентного горения был поверхностным. Этим объясняется слабое отличие частотных характеристик ламинарных и турбулентных пламен. Наблюдаемое влияние турбулентности можно объяснить изменением характерного времени процесса горения.

Поступила в редакцию
6/VII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Раушенбах. Вибрационное горение. М.: Физматгиз, 1961.
2. Нестационарное распространение пламени. Под ред. Дж. Г. Маркштейна. М.: Мир, 1968.
3. Е. С. Щетинков. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
4. В. И. Фурлетов, В. И. Скляр. ПМТФ, 1974, 1.
5. Е. Скучик. Основы акустики. М.: Мир, 1976.
6. А. Гейдон. Спектроскопия пламен. М.: ИЛ, 1959.
7. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
8. Н. Н. Иноземцев. Изв. АН СССР, ОТН, сер. Энергетика и автоматика, 1960, 2.
9. Д. И. Абугов, О. И. Обрезков. ФГВ, 1978, 14, 5.
10. В. А. Бессекерский, Е. И. Попов. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972.

РЕЖИМЫ НЕУСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ БЕЗГАЗОВЫХ СИСТЕМ

Ю. М. Максимов, А. Г. Мержанов, А. Т. Пак,
М. Н. Кучкин
(Томск)

В теоретических и экспериментальных исследованиях процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [1—6] обнаружены и описаны интересные явления неустойчивого горения — автоколебательное и спиновое. Автоколебательное горение наблюдалось в безгазовых системах, спиновое — в гибридных (металл — азот). В работе [6] предложен единый теоретический подход к описанию обоих явлений, основанный на представлениях о тепловой неустойчивости процесса к продольным и поперечным возмущениям, и впервые проведено математическое моделирование спинового горения. Авторами [7] обнаружено спиновое горение в безгазовых системах.

В данной работе в развитие результатов, полученных в [7], проведено подробное экспериментальное исследование режимов неустойчивого горения в безгазовых системах с легкоплавкой добавкой и высказано предположение о стабилизирующей роли локальной кристаллизации расплава.

В качестве объекта исследования выбраны системы Ti—B, Ti—C, Hf—B, (Fe—B)—Ti, где (Fe—B) — сплав железа с 50% (по массе) бора. Детальные исследования проводились на системе Ti—B. В опытах ис-

пользовались порошки титана (ПТМ) с размером частиц 5—10, 15—25, 25—40 мкм, бора аморфного (0,1 мкм) чистотой 98%, углерода марки ПМ-16, а также мелкодисперсные порошки Ni. В качестве легкоплавкой добавки использовались порошки алюминия АД-4, железа карбонильного особо чистого дисперсностью менее 10 мкм, меди с размером частиц менее 40 мкм. Порошки по фракциям разделялись на воздушно-центробежном классификаторе [8].

Опыты проводились на цилиндрических и прямоугольных образцах, спрессованных до относительной плотности 0,3—0,7; сжигание образцов и измерение скорости горения — по методике [9] в бомбе постоянного давления при давлении инертного газа 6 атм. Наблюдения за процессом неустойчивого горения осуществлялись путем покадровой съемки камерой «Конвас». В ряде случаев горящие образцы подвергались быстрой закалке в жидком аргоне [10]. Конечные продукты горения изучались с помощью металлографического (ПМТ-3) и рентгенофазового (ДРОН-2) анализов.

Общая картина неустойчивого горения

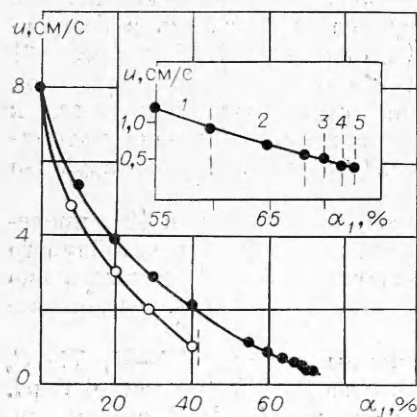
Общая картина неустойчивого горения исследовалась на системе Ti—В, разбавленной легкоплавкими добавками с различной температурой плавления Al ($T_{пл} = 660^\circ\text{C}$), Cu ($T_{пл} = 1083^\circ\text{C}$), Fe ($T_{пл} = 1536^\circ\text{C}$). Исследования проводились на образцах диаметром $d_0 = 10$ мм, относительной плотностью $\rho_0 = 0,5$, дисперсностью титана $r_{Ti} = 5—10$ мкм.

Состав Ti + 2В, разбавленный конечным тугоплавким продуктом TiB_2 , горит только стационарно, предельная скорость горения составляет 1 см/с (рис. 1). По мере разбавления легкоплавкой добавкой наблюдается несколько режимов неустойчивого горения, которые можно разделить на четыре основных типа.

Автоколебательное горение. При содержании определенного количества легкоплавкой добавки в смеси стационарное горение переходит в пульсирующее (см. рис. 1, 2), причем наблюдается два характерных вида возмущений фронта.

1. Фронт горения совершает колебания в вертикальном направлении без видимых поперечных возмущений. Наиболее ярко этот вид неустойчивости проявляется на системе, разбавленной Al, при содержании последнего в смеси более 40% вплоть до погасания (58%). Образцы при этом растрескиваются на лепешки равного с образцом диаметра.

2. В системе, разбавленной Cu и Fe, автоколебания проявляются при содержании добавки в смеси 58—60%. При $\alpha_1 > 60\%$ начинает пульсировать не весь фронт, а отдельные его участки (рис. 2, а). На кинограмме заметна яркая вспышка отдельных участков, затем фронт выравнивается и картина повторяется. Частота продольных колебаний больше, а амплитуда значительно меньше, чем у системы, разбавленной Al. На боковой поверхности сгоревших образцов заметно



ме заметна яркая вспышка отдельных участков, затем фронт выравнивается и картина повторяется. Частота продольных колебаний больше, а амплитуда значительно меньше, чем у системы, разбавленной Al. На боковой поверхности сгоревших образцов заметно

Рис. 1. Зависимость средней скорости горения u смеси Ti+2В от массового содержания разбавителя α_1 (светлыми точками показан разбавитель тугоплавкий продукт, темными — медь).

Области: 1 — стационарного горения, 2 — пульсирующего горения, 3 — переходная от пульсирующего к спиновому горению, 4 — спинового горения, 5 — предельного режима горения.

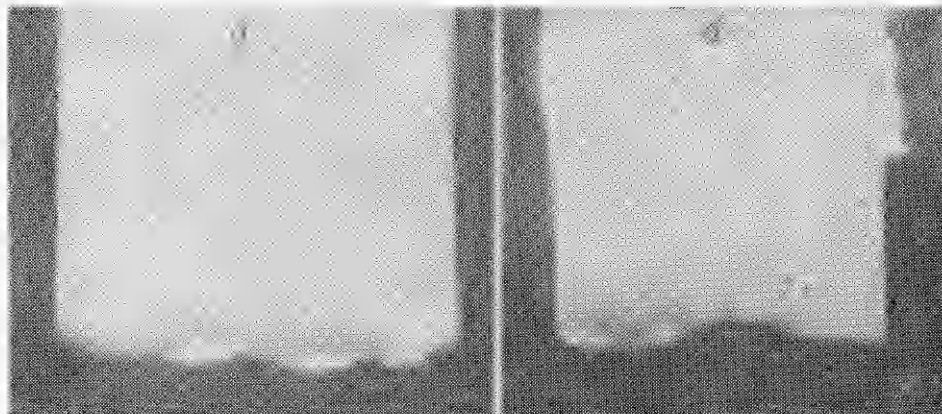


Рис. 2. Кинокадры горения системы $Ti+2B+\alpha Cu$.
а) пульсации отдельных участков фронта; б) развитие двумерной неустойчивости.

лишь частичное нарушение сплошности продукта. Система, разбавленная Cu и Fe , после сжигания имеет соответственно фазы TiB_2 , Cu и TiB_2 , $\alpha-Fe$, $FeTi$. Предельные скорости горения соответственно равны 0,5 и 0,25 см/с. Металлографические исследования указывают на то, что Cu и Fe во фронте горения плавятся.

Переход от автоколебательного горения к спиновому. Для большинства систем, разбавленных конечным тугоплавким продуктом, автоколебательный режим является предельным, т. е. при дальнейшем разбавлении системы процесс горения затухает [2]. Для систем $Ti-B$, $Ti-C$, $Hf-B$ по мере разбавления их легкоплавкой связкой происходит смена режима горения (см. рис. 1, 3). На кинограмме (см. рис. 2, б) во фронте заметны бегущие волны возмущений с достаточно большой амплитудой. Внешне картина процесса в этом случае схожа с колебательным режимом, наблюдаемым при горении жидких ВВ [11—13]. По мере развития двумерной неустойчивости на поверхности образца возникает светящаяся точка (реже 2—3 точки), которая, двигаясь произвольно по окружности, может то исчезать, то вновь появляться, меняя направление своего движения на противоположное.

На боковой поверхности сгоревших образцов (рис. 3) остается след в виде волнообразных, часто сходящихся спиралей с непостоянным шагом. На шлифе образца обычно видны темные и светлые полосы, расположенные под разным углом. Светлые более оплавленные полосы — след от прохождения очага химической реакции, темные — границы раздела между ними. Рентгенофазовый анализ темных и светлых участков не обнаружил отличия в фазовом составе.

Устойчивое спиновое горение. С увеличением содержания связки (в системе $Ti-B$ до 70% Cu) неупорядоченное движение точки стабилизируется в устойчивое спиновое с постоянным шагом винта (см. рис. 1, 4). На рис. 4, а представлена кинограмма

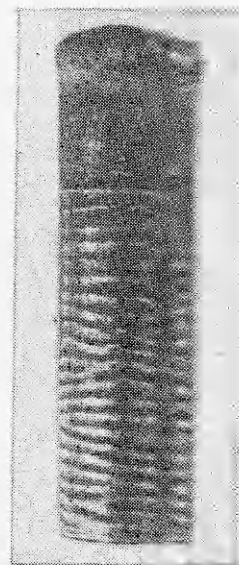


Рис. 3. Внешний вид образца, сгоревшего в режиме неустойчивого спинового горения.

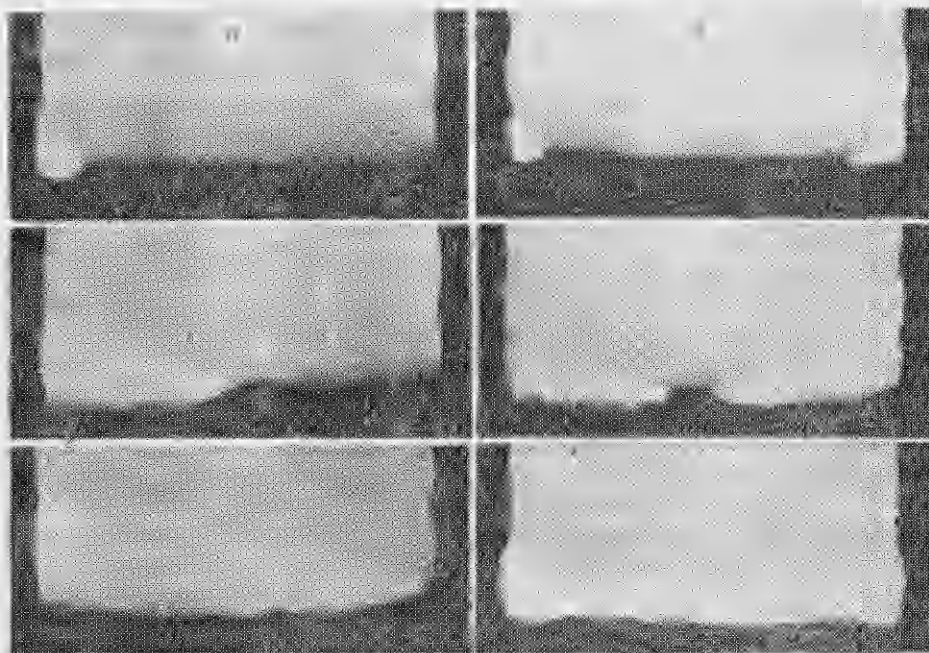


Рис. 4. Кинокадры неустойчивых режимов горения.
а — спиновой режим; б — предельный режим.

спинового горения. Сгоревшие в спиновом режиме образцы, как правило, сильно уплотнены, и на боковой поверхности отчетливо видна винтовая линия с постоянным шагом — след прохождения химической реакции (рис. 5, а). Поверхность цилиндрических образцов приобретает характерный волнистый вид с чередованием гребней и впадин. В сечении образ-

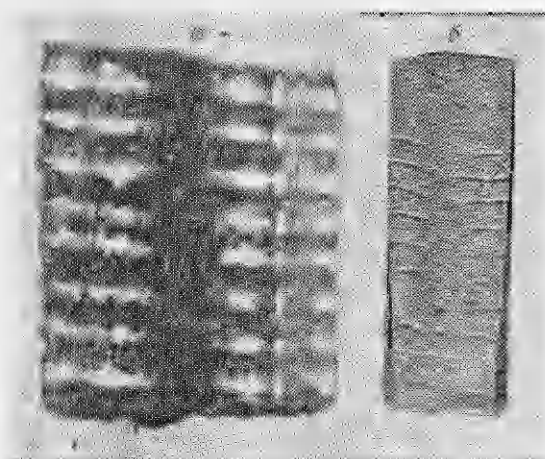


Рис. 5. Внешний вид (а) и шлиф образца (б), сгоревшего в спиновом режиме.

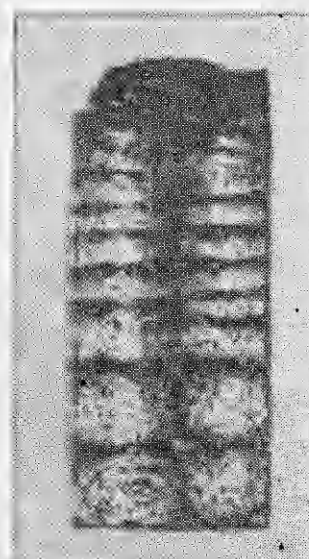


Рис. 6. Внешний вид образца, сгоревшего в спиновом и предельном режимах.

цов заметно чередование светлых и темных участков — места прохождения химической реакции и границы раздела между ними (рис. 5, б).

Таким образом, как и в предыдущем случае, реакция идет не только по боковой поверхности, но и в объеме образца. Геометрически область превращения конечных продуктов представляет собой спирально закрученную плоскость. Такая картина получается в результате винтового движения зоны химической реакции с осью вращения, проходящей через центр образца.

Предельный режим горения. Спиновый режим не является пределом неустойчивого горения. При дальнейшем разбавлении спиновой смеси легкоплавким компонентом (до 71,5% Cu) реализуется качественно иной режим, который существует в узкой области по концентрации связки (см. рис. 1, 5). Этот тип явления характерен тем, что на боковой поверхности образца возникает яркое пятно, которое, растекаясь по окружности, образует две,двигающиеся навстречу друг другу точки (см. рис. 4, б). Вскоре точки, сливаясь, образуют яркое кольцо. Далее следует некоторый период прогрева следующего слоя, появление яркого пятна, и картина повторяется. Как показала закалка образцов, формирование фронта химической реакции происходит в центре образца, где выше температура. Закаленный фронт реакции представляет собой несимметричный очаг, распространение которого визуальнo воспринимается как растекающееся по боковой поверхности пятно. В ряде случаев замечены вспышки на боковой поверхности отдельных поясков. Можно предположить, что очаг химической реакции в этом случае распространялся симметрично, приводя к радиальным пульсациям фронта.

Как показали исследования, такой режим является предельным, за ним наступает погасание. На рис. 6 изображен внешний вид образца, сгоревшего в спиновом и предельном режимах. В верхней части образца (сгоревшего в спиновом режиме) заметен спиральный след прохождения химической реакции, следы же нижней части (соответствующие предельному режиму) представляют собой чередование замкнутых колец, расположенных параллельно друг другу.

Таким образом, наличие достаточного количества легкоплавкой связки в безгазовых системах позволяет реализовать тот или иной режим горения. Причем с изменением концентрации легкоплавкого разбавителя переход от автоколебательного горения к предельному и обратно возможен при неизбежном прохождении через область спинового горения (см. рис. 1).

Закономерности спинового горения смеси на основе Ti — В

Детально спиновое горение исследовалось на системе Ti — В в зависимости от температуры плавления разбавителя, его содержания, дисперсности компонентов, плотности, размеров и формы образца.

Введение в состав $Ti + 2B$ ($d_0 = 10$ мм, $\rho_0 = 0,5$, $r_{Ti} = 5-10$ мкм) добавки меди приводит к спиновому горению при содержании последней в смеси 70% ($\alpha = 2,56$, где α — содержание добавки в молях). Увеличение содержания меди до 71,5% переводит систему в предельный режим. Частота и средняя скорость спинового распространения фронта соответственно равны $\nu = 5,6$ с⁻¹, $u = 0,5$ см/с. Линейная скорость движения точки $u_r = 17,6$ см/с, рентгенофазовый анализ конечного продукта обнаруживает фазу TiB_2 и свободную медь.

Система $Ti + 2B + \alpha Fe$ отличается от предыдущей более высокой температурой плавления добавки. Спиновый режим здесь реализуется при содержании в смеси железа 71% ($\alpha = 3,02$), что близко к спиновой концентрации состава с медью. Основные параметры процесса: $\nu = 1,4$ с⁻¹, $u = 0,22$ см/с, $u_r = 4,4$ см/с. Исследования показали, что фазовый состав

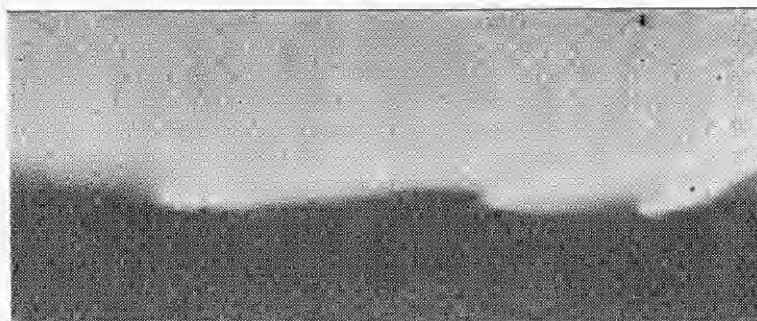


Рис. 7. 3-головый спин (кинокадр процесса).

образцов состоит в основном из TiB_2 , $FeTi$, свободного α -железа и бора.

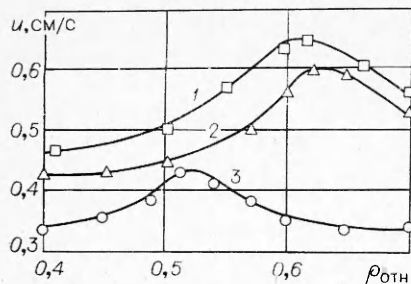
На системе $(Ti + 2B) + \alpha Al$ спиновый режим реализуется при массовом содержании алюминия 70% ($\alpha = 6,0$) и температуре подогрева $T_0 = 550^\circ C$. Параметры процесса: $v = 8,9 \text{ с}^{-1}$, $u = 1,1 \text{ см/с}$, $u_r = 28 \text{ см/с}$, что выше параметров рассмотренных систем. Продукт реакции состоит из фаз TiB_2 , $TiAl$ и свободного алюминия и бора. Причем образцы в значительной степени деформированы, в сечении заметно наличие оплавленных участков и больших раковин. Граница раздела между участками прохождения химической реакции размыта.

В общем случае взаимодействие компонентов такой сложной системы, как $(Ti + 2B) + \alpha Me$, требует самостоятельного изучения. Однако с определенностью можно сказать, что температура спинового горения всех рассмотренных случаев была выше температуры плавления металла-разбавителя. Металлографические исследования указывают на то, что металл-разбавитель в зоне горения плавится.

Влияние диаметра на скорость горения исследовалось на составах $Ti + 2B + 3Fe$ и $(Fe - B) + 2Ti$, горящих в спиновом режиме при диаметре образцов $d_0 = 40 \text{ мм}$ ($\rho_0 = 0,55$, $r_{Ti} = 5-10 \text{ мкм}$). Уменьшение диаметра образцов приводит к снижению скорости горения. Так, для первой смеси $u_{ад}/u_{пр} = 1,3$, для второй $u_{ад}/u_{пр} = 1,35$, что согласуется с [14]. Интересно, что с изменением диаметра меняется и картина спинового горения. При горении, например, состава $(Fe - B) + 2Ti$ при диаметре таблетки 10 мм наблюдается один устойчивый «спин», при $d_0 = 25 \text{ мм}$ появляется 2-, 3-головый спин (рис. 7), с дальнейшим увеличением диаметра количество «спинов» растет.

Влияние дисперсности компонентов на характер горения изучалось на спиновом составе $Ti + 2B + 2,56Cu$. В опытах менялась дисперсность частиц титана от 5 до 40 мкм. Экспериментально установлено, что скорость и частота спинового горения с увеличением размера частиц падают.

Зависимость средней скорости спинового горения от относительной



плотности состава $Ti + 2B + 2,56Cu$ приведена на рис. 8. Видно, что кривые зависимости $u(\rho)$ имеют максимум. Следует отметить, что при $\rho_0 \leq 0,4$ и $\rho_0 \geq 0,7$ спиновый режим горения переходит в предельный.

Рис. 8. Зависимость средней скорости спинового горения от относительной плотности смеси $Ti + 2B + 2,56Cu$; $d_0 = 10 \text{ мм}$.

r_{Ti} , мкм: 1 — 5—10, 2 — 10—25, 3 — 25—40.

На системе $Ti + 2B + \alpha Cu$ исследовалось также влияние условий зажигания на характер неустойчивости. Для этого на таблетку, горящую в обычных условиях в пульсирующем режиме ($\alpha = 65\% Cu$), ставилась таблетка со спиновой смесью. После инициирования реакции верхняя таблетка сгорала в спиновом режиме, спин возникал и в нижней таблетке. Влияние геометрии образца на характер спинового горения исследовалось на составе $(Fe - B) + 2Ti$. Как показали опыты, характер спинового горения не зависит от геометрии образца. Так, на образцах квадратного сечения по мере увеличения площади сечения образца, как и в случае увеличения диаметра, появляется «многоголовый спин». Кроме описанных выше примеров спиновое горение наблюдалось на составах $Ti - C$, $Hf - B$, разбавленных легкоплавкими добавками (Cu , Al). Содержание добавок во всех случаях составляло не менее 50%.

Обсуждение результатов

Наблюдаемое на безгазовых составах автоколебательное и спиновое горение можно объяснить из представлений, развитых в [5, 6], о тепловом механизме неустойчивых горений безгазовых систем. В [5] показано, что при горении гомогенных безгазовых составов может быть реализован режим устойчивого пульсирующего горения — последовательное чередование всплесков и депрессий. Такой режим есть следствие одномерной неустойчивости фронта горения к продольным возмущениям. Физически это явление в [5] объясняется избытком энтальпии во фронте горения, поскольку для безгазовых систем область сильного изменения глубины превращения значительно меньше области изменения температуры. Избыток тепла во фронте способствует возникновению неустойчивости стационарного горения. Показано также стабилизирующее влияние на процесс горения теплового потока от продуктов горения в зону превращения.

Спиновый режим объясняется как проявление неустойчивости одномерного автоколебательного режима к поперечным возмущениям [6]. Такая двумерная неустойчивость фронта горения вызвана локальным его возмущением в момент депрессии. При пульсирующем режиме в момент депрессии случайно возникший очаг движется вдоль прогретого слоя, описывая спираль, поскольку здесь более высокая температура и непрореагировавшая среда.

В теоретической работе [6] предусматривается возможность существования как пульсирующего, так и спинового горения в одной и той же системе при различных параметрах процесса. Однако в экспериментальных работах эти режимы наблюдались ранее в различных системах. Так, автоколебательный режим наблюдался только на безгазовых системах [2, 3], спиновый — на гибридных [4, 4]. Интересно, что в настоящих опытах оказалось возможным реализовать оба режима на одних и тех же системах, благодаря наличию в исходном составе плавящейся во фронте горения добавки. Кроме того, введение достаточного количества легкоплавкой добавки позволяет осуществить неустойчивые режимы в тех системах, в которых они не наблюдались. Система $Ti + 2B$ при разбавлении ее конечным продуктом вплоть до погасания горит только стационарно. Введение в состав 70%-ной легкоплавкой меди переводит горение в пульсирующее. При дальнейшем увеличении связки реализуется установившийся спиновый режим горения. Причем при переходе от автоколебательного горения к спиновому и от спинового к погасанию существуют узкие по концентрации легкоплавкой связки области, где наблюдаются неустановившиеся переходные режимы.

Действие легкоплавкой добавки на реализацию того или иного режима можно объяснить ее кристаллизацией в момент падения температуры во фронте при удалении от предела устойчивости. При большом

удалении от предела теплоотдачи системы типа $Ti + 2B$, разбавленной тугоплавким продуктом, приводят к затуханию горения. При наличии легкоплавкого разбавителя во фронте начинается его локальная кристаллизация с выделением тепла. Таким образом, в момент депрессии падение температуры ограничено температурой плавления одного из компонентов состава. Дополнительное тепловыделение компенсирует отвод тепла из зоны реакции и выводит систему из депрессии, приводя к автоколебательному горению.

С дальнейшим удалением от предела устойчивости начинает пульсировать не весь фронт, а отдельные его участки, что связано с развитием поперечных возмущений. В результате наступает момент, когда двумерная неустойчивость переводит процесс в спиновый режим. Развитию двумерных возмущений, по-видимому, способствует и сплошность среды. Сгоревшие в автоколебательном режиме образцы полностью или частично расслоены, в то время как образцы, сгоревшие в спиновом режиме, компактны.

Влияние абсолютной температуры плавления легкоплавкой добавки на характер неустойчивости проявляется на длительности перехода от автоколебательного режима к спиновому. Так, если на системе $Ti + 2B$, разбавленной Al , автоколебания существуют в широкой области разбавления (при этом процесс протекает без видимых поперечных возмущений фронта), то на этой же системе с добавками Si и Fe пульсации фронта, едва возникнув, сменяются пульсациями отдельных его участков и приводят к развитию поперечных возмущений. Таким образом, чем выше температура плавления добавки, тем раньше кристаллизация выводит систему из депрессии и тем самым быстрее возникает двумерная неустойчивость.

Авторы выражают благодарность Б. Ш. Браверману за помощь в проведении рентгенографического исследования и Е. А. Некрасову за участие в обсуждении работы.

*Поступила в редакцию
23/IV 1980*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1973, 208, 4.
2. И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов и др. ФГВ, 1974, 10, 1.
3. В. М. Шкиро, Г. А. Нерсисян. ФГВ, 1978, 14, 1.
4. А. К. Филоненко, В. И. Вершинников. ФГВ, 1975, 11, 3.
5. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1974, 7, 1.
6. Т. П. Ивлева, А. Г. Мержанов, К. Г. Шкадинский. Докл. АН СССР, 1978, 239, 5.
7. Ю. М. Максимов, А. Т. Пак и др. ФГВ, 1979, 15, 3.
8. В. А. Шваб, А. Т. Росляк, Ю. А. Бирюков. Авт. свид. № 542574, Бюл. изобрет., 1977, 2.
9. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М.: Наука, 1967.
10. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1972, 204, 366.
11. Э. И. Максимов, А. А. Байраш. ФГВ, 1969, 5, 1.
12. К. К. Андреев. Термическое разложение взрывчатых веществ. М.: Наука, 1966.
13. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
14. А. П. Алдушин, Т. М. Мартемьянова и др. ФГВ, 1973, 9, 5.