

метров. При малых, но конечных значениях δ обе ветви решения могут быть немонотонными, причем условие немонотонности, как и в случае внутренней подачи, имеет вид $Z > e$ (см. рис. 7, 1).

Для цилиндрического реактора с внешней подачей при увеличении δ характерно отделение изолированной ветви в зависимости $\rho(\alpha)$. При дальнейшем росте δ изолированная ветвь стягивается в точку и исчезает (см. рис. 7, 3—5). Наличие изолированной ветви определяется размерами реактора. Если рассмотреть скорость подачи, для которой температура горения мала, то при больших r_1 , т. е. при малых δ , стационарный режим будет существовать, поскольку время пребывания реакционной смеси в реакторе велико и она вся успевает прореагировать. При уменьшении r_1 (увеличении δ) время пребывания реакционной смеси в реакторе уменьшается и из-за низкой температуры горения она не успевает прореагировать. Таким образом, появляется интервал величин α , для которых стационарные режимы отсутствуют. При фиксированном значении внешнего радиуса уменьшение скорости подачи приводит к появлению стационарных режимов из-за увеличения времени пребывания реакционной смеси в реакторе, а рост скорости подачи — из-за увеличения температуры горения и, следовательно, скорости химической реакции.

Для сферического реактора с внешней подачей найдено распределение температуры в реакторе

$$T(r) = \begin{cases} T_r, & r_0 < r < R, \\ T_r - q + q \exp\left(\frac{u}{\kappa} \frac{r_1^2}{r} - \frac{u}{\kappa} \frac{r_1^2}{R}\right), & R < r < r_1, \end{cases}$$

где температура горения

$$T_r = T_n + q - q \exp\left(\frac{u}{\kappa} r_1 - \frac{u}{\kappa} \frac{r_1^2}{R}\right),$$

и получено уравнение для радиуса фронта

$$\rho = \sqrt{\alpha} \exp\left\{\frac{Z}{2} \exp\left[\frac{\alpha}{\delta} \left(1 - \frac{1}{\rho}\right)\right]\right\}.$$

Анализ этого уравнения показал, что качественное поведение зависимости $\rho(\alpha)$ такое же, как для цилиндрического реактора с внешней подачей. Здесь также в зависимости $\rho(\alpha)$ могут иметь место немонотонность, неединственность и отделение изолированной ветви.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Франк-Каменецкий Д. А. ЖФХ, 1938, 12, 1, 100.
2. Хайкин Б. И., Руманов Э. Н. ФГВ, 1975, 11, 5, 671.
3. Манелис Г. Б., Смирнов Л. П. ФГВ, 1976, 11, 3, 354.
4. Бабаджанян А. С., Вольперт В. А., Вольперт Вл. А. и др. Фронтальные режимы протекания экзотермической реакции в сферических и цилиндрических реакторах. Препринт ОИХФ.— Черноголовка, 1986.

Поступила в редакцию 28/IX 1987

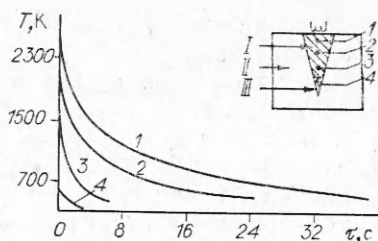
БЕЗГАЗОВОЕ ГОРЕНИЕ В СИСТЕМЕ ТИТАН — УГЛЕРОД — НИКЕЛЬ

А. С. Рогачев, В. М. Шкиро, И. Д. Чаусская, М. В. Швецов
(Черноголовка)

Анализ публикаций последних лет в области безгазового горения показывает возросший интерес к детальному механизму взаимодействия компонентов в волне горения. Поиски путей получения принципиально

Рис. 1. Схема получения образцов из смеси 80 % (Ti + C) + 20 % Ni с погашенным фронтом горения и экспериментальные термограммы.

Расстояние термопара до передней границы погашенного фронта горения, мм: 1 — 33,5, 2 — 22, 3 — 6,5, 4 — термопара в зоне прогрева. I — продукт; II — медь; III — шихта.



новой информации о механизме данного процесса выразились в использовании ряда современных физических методов. В работах [1, 2] применен рентгенофазовый анализ с использованием синхротронного излучения, который позволил проследить за динамикой фазообразования непосредственно в волне горения. Интересные попытки создать адекватную модель взаимодействия частиц в зоне реакции с использованием электронно-лучевого нагрева частицы на подложке сделаны в [3, 4]. Следует, однако, отметить, что применимость результатов, полученных, по-существу, на двумерных моделях, к описанию реальных процессов в волне горения до настоящего времени не доказана. В ряде публикаций разрабатываются методики получения и исследования погашенных образцов с закаленными промежуточными продуктами реакции горения. Для этого горячий образец сбрасывают в жидкий аргон [5] либо же частично погружают исходный образец в жидкий аргон, после чего поджигают [6]. Во всех случаях удается получить образцы с «застывшей» волной безгазового горения, пригодные для исследований методами металлографического, рентгенофазового, микронзондового анализов. В то же время существующие методы закалки в жидком аргоне нельзя признать совершенными, поскольку они не позволяют контролировать ни скорость остывания закаливаемых областей, ни скорость горения.

В настоящей работе использована усовершенствованная методика получения образцов с погашенным фронтом безгазового горения, которые именуется в дальнейшем ОПФ, в сочетании с традиционными методами исследования закономерностей и механизма горения.

Методика эксперимента. Исследовалось горение в системе титан — углерод — никель. Для приготовления реакционных смесей использовались полидисперсные порошки промышленных марок: титан ПТС, сажа ПМ-15, никель ПНЭ-1, а также отдельные фракции этих порошков. Закономерности горения изучались на образцах диаметром 20 и высотой 30 мм. Горение происходило в бомбе постоянного давления в среде аргона при давлении 1 МПа. Волна безгазового горения в исследуемом образце инициировалась поджигающей таблеткой высотой 5 мм, которая, в свою очередь, поджигалась накаливаемой вольфрамовой спиралью. В качестве инициирующего состава использовалась стехиометрическая смесь титана с углеродом.

Скорость горения определялась при помощи фоторегистратора ФР-11, температура измерялась вольфрам-рениевыми термодарами ВР5/ВР20 диаметром 100—200 мкм. Скорость и температура горения образцов, проявивших тенденцию к увеличению своей высоты в процессе горения, определялись с помощью ограничительных колец, обеспечивающих постоянство высоты образцов.

Процедура приготовления ОПФ включает в себя гашение самораспространяющегося процесса и быстрое охлаждение сгоревшей части образца для того, чтобы прервать процессы догорания и рекристаллизации. Реакционная шихта помещалась в клинообразный вырез массивного медного блока (рис. 1). Горение, инициированное у основания клина, протекало в условиях больших теплопотерь в массу блока. По мере продвижения волны горения в узкую часть клина удельные теплопотери на 1 г реакционной смеси возрастали, что приводило к погашению образца. С этой точки зрения данная методика аналогична применяемой

для определения критического диаметра при горении порохов [7]. Однако использование рассматриваемой методики для безгазовых составов позволяет не только прекратить горение практически любой смеси, но и закалить продукты горения. На рис. 1 условно показаны места расположения термопар ВР5/ВР20 с диаметром 100 мкм, которые непрерывно регистрировали температуру горения и закалки. Термограммы записывались на ленте светолучевого осциллографа Н115. Из рис. 1 видно, что темп остывания той области образца, в которой происходит гашение фронта, достигает нескольких тысяч градусов за секунду. Таким образом, используемая методика позволяет останавливать происходящие в зонах прогрева, реакции и догорания процессы, характерные времена которых составляют десятые доли секунды и более.

Применение любого метода гашения и закалки для изучения процессов в волне горения неизбежно вызывает вопрос о том, насколько существенны искажения, внесенные в структуру волны горения, микроструктуру и фазовый состав продуктов самим процессом закалки. Это в полной мере относится и к методике, используемой в данной работе. Поэтому результаты исследования ОПФ рассматриваются далее во взаимосвязи с традиционными экспериментами по горению, а также со структурой и фазовым составом конечных (незакаленных) продуктов. Такой подход не дает исчерпывающего ответа на поставленный вопрос, но позволяет избежать серьезных ошибок в интерпретации результатов, полученных с помощью закалки.

Образцы с погашенным фронтом горения исследовали методами химического и рентгенофазового анализов, растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа. Для проведения послойного химического анализа образцы разрезали на слои, параллельные фронту горения, полученные фрагменты растирали в агатовой ступке до размера частиц менее 50 мкм. Рентгенофазовый анализ осуществлялся на дифрактометре ДРОН-2. Микроструктура и концентрационная структура ОПФ исследовались с помощью рентгеновского микроанализатора JSXA-733, при этом изучались как изломы образцов, так и шлифы, приготовленные путем механической полировки алмазными пастами. Фотографии микроструктур и полуколичественная информация о распределении элементов были получены в растровом режиме работы микроанализатора. Количественный рентгеновский микроанализ проводился при ускоряющем напряжении 15 кВ в автоматическом режиме по программе MZAFM, входящей в математическое обеспечение прибора JSXA-733. Локальность микроанализа [8] составляла 3,4 мкм для зерен карбида титана и 1,8 мкм для никеля. Непосредственное наблюдение формы карбидных зерен проводилось на образцах с предварительно удаленной (путем глубокого травления) связкой.

Экспериментальные результаты. На рис. 2 представлены зависимости скорости и максимальной температуры горения от массового содержания никеля (α) в реакционной смеси. Постоянство максимальной температуры в диапазоне $\alpha = 0 \div 10\%$ объясняется, по-видимому, частичным плавлением карбида титана TiC_x . В то же время ведущая температура горения, очевидно, падает по мере добавления никеля, так как скорость горения в указанном диапазоне уменьшается относительно быстро. В диапазоне $\alpha = 40 \div 50\%$ Ni проходит граница стационарного горения. Образцы, содержащие 50% Ni, горят в автоколебательном режиме, а 60% — в спиновом. Спиновое горение протекает при температуре плавления наиболее легкоплавкого компонента — никеля (1728 К).

Для горения образцов, содержащих никель, характерно наличие широкой области догорания. Как правило, температура образца держится вблизи максимальной 2—5 с, после чего происходит нормальное остывание. Образцы без Ni (в том числе поджигающие таблетки) остывают значительно быстрее, несмотря на более высокую максимальную температуру. Это подтверждается не только сравнением термограмм, но и непосредственными визуальными наблюдениями: интенсивное свечение

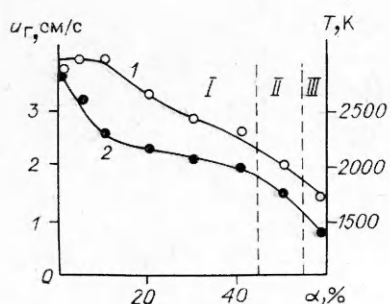


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры горения (1) и скорости (2) от содержания никеля в шихте (α).

I, II, III — области стационарного, автоколебательного и спинового горения.

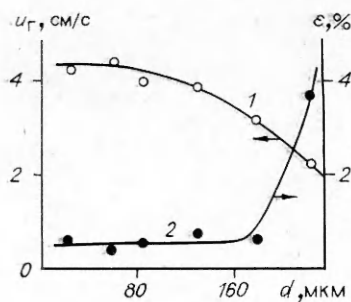


Рис. 3. Зависимость скорости горения (1) и степени недогорания ϵ (2) от размера частиц титана.

Смесь: 80 % (Ti + C) + 20 % Ni.

продуктов горения системы Ti + C + Ni продолжается несколько секунд после полного прекращения свечения поджигающего образца, приготовленного из стехиометрической смеси титана с углеродом.

Поскольку исследуемый состав горит с широкими зонами, то скорость горения должна существенно зависеть от размеров частиц исходных реагентов. Зависимости $u_r(d)$ и $\epsilon(d)$ представлены на рис. 3. Значения u_r падают с ростом d , однако недогорание заметно возрастает лишь при $d > 200$ мкм. Это также свидетельствует о том, что заметные части титана и углерода дореагируют после прохождения фронта горения, т. е. в зоне догорания.

Необходимо отметить, что величина u_r на основе узких фракций титанового порошка (см. рис. 3) выше, чем смеси аналогичного химического состава на основе исходного полидисперсного порошка титана ($u_r \approx 2$ см/с, см. рис. 2). Используемый в работе порошок марки ПТС содержит более 70 % (по массе) частиц с размером менее 50 мкм, следовательно, низкую скорость горения нельзя объяснить увеличением среднего размера частиц Ti. Данный экспериментальный факт проверен следующим образом. Из отдельных фракций, взятых в соответствующих пропорциях (согласно их исходному содержанию в порошке ПТС), был вновь замешан полидисперсный порошок титана и на его основе приготовлена шихта. Оказалось, что $u_r = 2$ см/с. Таким образом, на значение u_r влияет не только средний размер частиц порошка титана, но и распределение частиц по размерам, так как практически любой реальный порошок полидисперсный.

Как показали исследования микроструктуры образцов с погашенным фронтом горения, взаимодействие реагентов начинается после появления металлического расплава, который обволакивает частицы сажи. Согласно результатам микроанализа, этот расплав содержит Ti и Ni, причем состав расплава в зоне реакции не является величиной постоянной или функцией какой-либо одной переменной (например, времени). В разных точках зоны реакции образуются расплавы различного состава, соответствующего конкретной обстановке в данном микрообъеме вещества и отражающего гетерогенное строение исходной смеси порошков. Зачастую в зоне реакции системы Ti + C + Ni можно обнаружить наряду с непрореагировавшими частицами Ti и Ni интерметаллические фазы и структурные составляющие эвтектического типа. Однако изучение морфологии упомянутых фаз показывает, что они образовались при кристаллизации металлического расплава уже в процессе закалки.

Характерная микроструктура зоны реакции и распределение элементов показаны на рис. 4. Особенность начальных стадий взаимодействия реагентов состоит в том, что плавящийся никель растекается по частицам Ti. В результате этого многие титановые частицы в зоне реакции покрыты слоем никелевого расплава (рис. 4). Возможно, это одна из причин отсутствия следов твердофазного взаимодействия (т. е. кар-

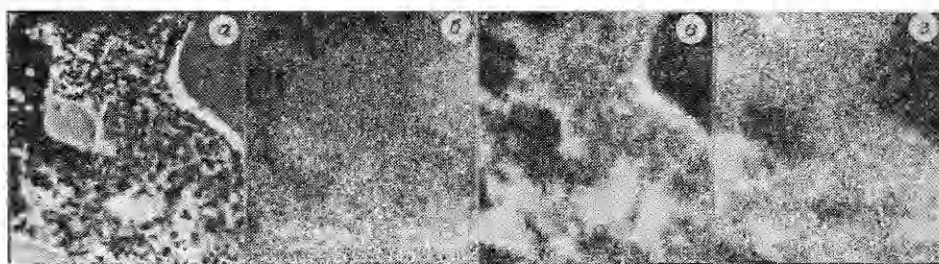


Рис. 4. Характерная микроструктура и распределение элементов в зоне реакции. $\times 2300$.

а) микроструктура; б) распределение Ti; в) Ni; г) С. Структурные составляющие: 1 — частица титана, 2 — слой никеля, 3 — мелкодисперсная смесь частиц углерода (черные), карбида титана (серые) и титаноникелевого расплава (светлые прослойки).

бидных пленок на поверхности частиц Ti) в исследованной системе.

Продукт реакции горения — карбид титана — образуется в пространстве между металлическими частицами, заполненном суспензией частиц сажи в титаноникелевом расплаве. По мере протекания реакции карбидообразования доля сажевых частиц в суспензии уменьшается, а доля карбидных частиц — растет. В результате формируется гетерогенная среда, состоящая из округлых частиц (зерен) карбида титана, окруженных металлическим расплавом. Минимальный размер карбидных зерен, которые удалось зафиксировать закалкой, сопоставим с размерами частиц сажи. Как правило, диаметр частиц карбида титана в зоне реакции не превышает 1 мкм.

Уже в зоне реакции начинается быстрый рост карбидных зерен, который продолжается при догорании. В течение нескольких секунд диаметры зерен достигают 4—5 мкм. На рис. 5 представлены микрофотографии, показывающие изменение формы и размера частиц карбида титана в зоне догорания (для наглядности никелевая фаза удалена травлением).

Изменение среднего состава твердых частиц продукта, а также металлического расплава в зоне догорания характеризуется зависимостями, показанными на рис. 6. Видно, что на стадии догорания происходит относительно небольшое дополнительное науглероживание карбида титана по сравнению с присущей ему широкой областью гомогенности. Следует заметить также, что кривая 2 на рис. 6 отражает изменение среднего состава металлического расплава. В процессе закалки расплав кристаллизуется с образованием различных фаз системы Ni + Ti, которые удается идентифицировать с помощью микроанализа. Поскольку нали-

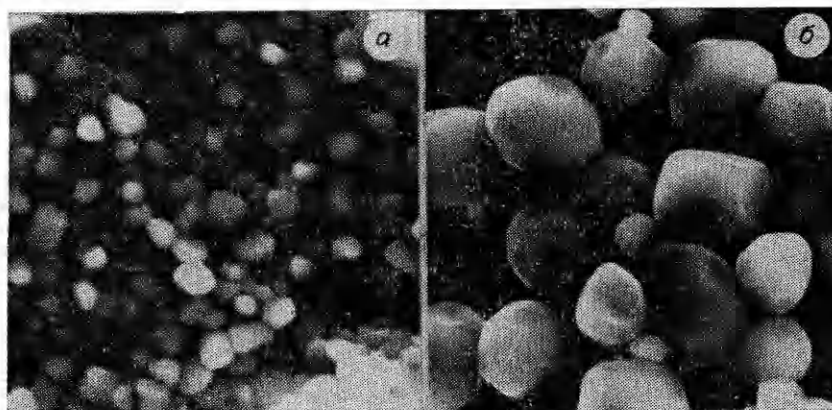
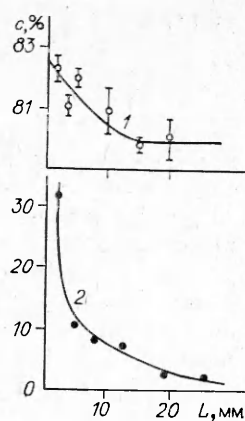


Рис. 5. Карбидные зерна в зоне догорания: на расстоянии 1,5 (а) и 35 мм (б) от передней границы погашенного фронта горения. $\times 4000$.

Рис. 6. Изменение массовой концентрации титана в карбидных зернах, по данным рентгеновского микроанализа (1), и в связке, по данным химического анализа (2). L — расстояние от передней границы погашенного фронта горения.



чие нескольких фаз затрудняет определение среднего состава исходного расплава на основе данных микроанализа, было целесообразно использовать для построения зависимости на рис. 6 результаты послойного химического анализа.

Участие расплавов титана и карбида титана в никеле во всех основных процессах, происходящих в зонах реакции и догорания, позволяет предположить, что никель оказывает существенное влияние на конечный состав продуктов горения, несмотря на то, что этот металл сам практически не растворяется в карбиде титана и не образует с ним тройных соединений. Это предположение подтверждается результатами исследования конечных продуктов горения в системе $Ti + C + Ni$, представленными в таблице. Общая закономерность состоит в том, что добавка Ni приводит к смещению состава карбида титана ближе к стехиометрии по сравнению с соотношением Ti/C в исходной реакционной смеси.

Исследование продуктов горения показывает также, что между составом связки и карбидных зерен существует однозначная и жесткая зависимость, ее необходимо учитывать при разработке новых металлов на основе системы титан — углерод — никель, получаемых в режиме горения.

Обсуждение результатов. Рассмотрим во взаимосвязи факт зависимости скорости горения от распределения по размерам частиц титана и результаты исследования микроструктуры зоны реакции (в ОПФ). Наиболее вероятным объяснением уменьшения u_r при использовании полидисперсного порошка может служить предположение о том, что только часть титановых частиц успевает прореагировать в ведущей зоне волны горения, причем часть эта тем больше, чем меньше дисперсия частиц по размерам. Влияние гетерогенности реакционной среды на закономерности горения изучено экспериментально в [9], а теоретически — в [10]. В [10] показано, что в случае одномодального распределения частиц (с одним максимумом) горение протекает в режиме узких зон и весь реагент расходуется при реакции. Появление широкой области догорания возможно в том случае, когда существуют два характерных размера

Зависимость фазового состава продуктов горения от состава горючей смеси в системе $Ti + C + Ni$

Состав горючей смеси	Содержание никеля в шихте, %	Фазовый состав продуктов	
		карбид	связка
$Ti + 0,94C$	15,7	$TiC_{0,99}$	$TiNi_{7,4}^*$
$Ti + 0,87C$	11,0	$TiC_{0,92}$	$TiNi_3$
$Ti + 0,84C$	7,6	$TiC_{0,93}$	$TiNi_3, TiNi$
$Ti + 0,84C$	10,0	$TiC_{0,9}$	$TiNi_3$
$Ti + 0,80C$	4,0	$TiC_{0,87}$	$TiNi$
$Ti + 0,76C$	0	$TiC_{0,73}$	—
$Ti + 0,67C$	10,0	$TiC_{0,79}$	$TiNi$
$Ti + 0,50C$	10,0	$TiC_{0,71}$	$TiNi, Ti_2Ni$

* Усредненный состав: по-видимому, смесь γ -твердого раствора на основе никеля с мелкодисперсными включениями фазы $TiNi_3$.

(бимодальное распределение), отношение которых

$$\frac{l_2}{l_1} \geq \sqrt{\frac{EQ}{cRT_r^2}}, \quad (1)$$

где E — энергия активации; Q — тепловой эффект реакции горения; c — теплоемкость; T_r — температура горения. Для реальных систем условие (1) означает, что характерный размер l_2 должен в несколько раз превышать l_1 . В [10] отмечается также, что бимодальность не обязательно должна быть присуща исходному металлическому порошку, а может возникнуть вследствие капиллярного растекания.

По-видимому, именно последний случай реализуется в наших экспериментах. Действительно, распределение размеров частиц титанового порошка всегда имело один максимум (по результатам рассева на ситах). В то же время характерный размер гетерогенности твердо-жидкой суспензии, в которой происходит образование продукта, на 1–2 порядка меньше, чем размер металлических частиц. Условие (1), таким образом, оказывается выполненным.

Необходимо отметить, что если предложенное объяснение справедливо, процесс горения исследованной системы лимитирует стадия плавления и растекания металлических частиц. Наиболее крупные частицы могут оставаться непроореагировавшими и даже нерасплавившимися, в то время как более мелкие частицы не только расплавились и перешли в суспензию, а образовали уже конечный продукт горения — зерна TiC. Существование крупных металлических частиц рядом с продуктом горения весьма характерно для зоны реакции ОПФ, примером чего может служить рис. 4.

Рассмотренное выше сосуществование твердых металлических частиц с расплавом на основе тех же металлов и с продуктом горения заставляет предположить тепловую гетерогенность зоны реакции на микроскопическом уровне. Как известно, постулат о тепловой гомогенности реакционной среды лежит в основе теории безгазового горения [11], которая качественно объясняет основные макроскопические закономерности этого процесса. Полученные экспериментальные результаты показывают, что при переходе к исследованию процессов, происходящих в волне горения на микроскопическом уровне, может возникнуть необходимость углубления и изменения существующих представлений о тепловой гомогенности реакционной среды. Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Сопоставление размеров частиц карбида титана в различных областях ОПФ с экспериментальными термограммами (см. рис. 1) позволяет оценить минимальное значение коэффициента диффузии, необходимого для выравнивания концентраций внутри данных частиц, по формуле $D \approx R^2/\tau$, где R — радиус частиц; τ — время существования жидкой фазы (т. е. время, в течение которого температура в данной точке образца превосходит температуру плавления никеля). Оценки дают величину $D \approx (1 \div 1,5) \cdot 10^{-8}$ см²/с, которая не превосходит коэффициент диффузии углерода в карбиде титана ($6 \cdot 10^{-7}$ см²/с при 2500 К, согласно экстраполяции данных [12]). Это объясняет однородность карбидных зерен даже в закаленных продуктах. Причем состав карбидных зерен жестко связан с составом окружающего их расплава. Повышение концентрации титана в расплаве сопровождается отклонением состава зерен от стехиометрического в сторону меньшего содержания углерода. Эта зависимость наблюдается как в образцах с погашенным фронтом (см. рис. 6), так и в конечных продуктах (см. таблицу). Следовательно, уже в зоне догорания устанавливается равновесие как внутри карбидного зерна, так и на границе зерна с расплавом. Поэтому присутствие никеля сильно влияет на состав продукта реакции горения — карбида титана.

Продукт горения (TiC) в системе Ti + C + Ni образуется в результате взаимодействия неоднородного титаноникелевого расплава с части-

цами углеродного материала. Карбид титана образуется в зоне реакции в виде частиц размером менее 1 мкм, которые быстро увеличиваются в зоне догорания. Закономерности горения и микроструктура образцов с погашенным фронтом горения позволяют предположить существование тепловых неоднородностей на микроскопическом уровне в зонах прогрева, реакции и, возможно, в зоне догорания. Присутствие никеля оказывает существенное влияние на закономерности горения и на фазовый состав продуктов.

Авторы благодарят И. П. Боровинскую за внимание к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдырев В. В., Александров В. В. и др. Докл. АН СССР, 1981, 259, 5, 1127.
2. Александров В. В., Корчагин М. А., Толочко Б. П. и др. ФГВ, 1983, 19, 4, 65.
3. Корчагин М. А., Александров В. В. ФГВ, 1980, 16, 6, 72.
4. Корчагин М. А., Александров В. В., Гусенко С. И.— В кн.: Проблемы технологического горения. Т. 1.— Черноголовка, 1981.
5. Шкиро В. М., Боровинская И. П.— В кн.: Процессы горения в химической технологии и металлургии.— Черноголовка, 1975.
6. Шкиро В. М., Доронин В. И., Боровинская И. П. ФГВ, 1980, 16, 4, 13.
7. Андреев К. К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ.— М.: Наука, 1966.
8. Боровский И. Б., Рыдник В. И.— В кн.: Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Вып. 5.— Ленинград, 1969.
9. Боровинская И. П., Мержанов А. Г., Новиков И. П. и др. ФГВ, 1974, 10, 1, 4.
10. Адушин А. П., Хайкин Б. И., Шкадинский К. Г. ФГВ, 1976, 12, 6, 819.
11. Хайкин Б. И.— В кн.: Процессы горения в химической технологии и металлургии.— Черноголовка, 1975.
12. Adesberg J. M., Cadoff L. I. Trans. ASME, 1967, 239, 6, 2158.

*Поступила в редакцию 6/III 1987,
после доработки — 18/VI 1987*

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ БЕЗГАЗОВЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ, ПЕРИОДИЧЕСКИ РАЗБАВЛЕННЫХ ИНЕРТНЫМИ ДОБАВКАМИ

*А. Н. Фирсов, К. Г. Шкадинский
(Черноголовка)*

Обычно характеристики процесса горения исследуются в предположении однородности исходной горючей сплошной среды [1—3] либо некоторой ее упорядоченности. Последнее применяется при изучении смесевых составов. Для них характерна неоднородность на некотором достаточно малом по сравнению с фронтом масштабе. Большая разница между этими микро- и макромасштабами приводит к тому, что многие частицы вещества находятся в похожих условиях и часть из них можно выбрать представителями остальных. Анализ закономерностей горения таких составов отражен в исследовании моделей распространения фронта по периодически упорядоченной среде. Сюда относятся модели типа «сэндвич» [4, 5], ячеистые модели (гетерогенные по составу и гомогенные по температуре) [5, 6], модели среды с однородной пористостью в процессах фильтрационного горения [7] и т. п. Во всех указанных выше примерах стационарный фронт горения представляет собой бегущую волну экзотермического превращения, описываемую автомодельным решением некоторой нелинейной системы уравнений в частных производных.

Неоднородности, препятствующие стационарному перемещению фронта горения, условно можно разделить на два типа. К первому отнесем локализованные неоднородности. Исследования нестационарности,