

Безразмерный критический размер канала (или критическое число Михельсона $Mi_{ад}^*$) в случае $k_{ин} \ll 1$ находится из выражения

$$Mi_{ад}^* = \frac{(n+1)e}{\beta} k_{ин},$$

а при $k_{ин} \gg 1$

$$Mi_{ад}^* = \mu_{1n} \sqrt{2e/\beta}.$$

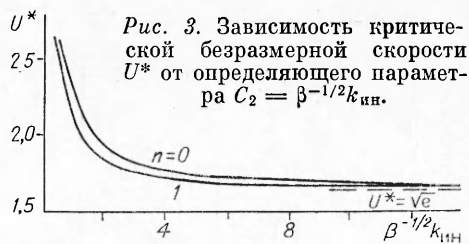


Рис. 3. Зависимость критической безразмерной скорости U^* от определяющего параметра $C_2 = \beta^{-1/2} k_{ин}$.

Отсюда следует, что критические размеры в зависимости от геометрии канала могут различаться от двух

$$d_{ц}^*/d_{пл}^* = 2$$

при малых теплопотерях, до полутора раз

$$d_{ц}^*/d_{пл}^* = \mu_{11}/\mu_{10} \approx 1,53$$

при сильной теплоотдаче ($d_{ц}^*$ и $d_{пл}^*$ — критический размер цилиндрического и плоского каналов).

Выводы настоящей работы соответствуют численным расчетам работ [8, 9] и приведенным в [8] результатам эксперимента в системе PbO_2-WO_2 .

Таким образом, теоретически рассмотрен вопрос о пределах существования стационарного режима горения безгазовых составов в каналах с массивными металлическими стенками, когда теплопотери очень велики. С помощью осреднения с весом поперечного распределения температуры получены оценки критических значений определяющих параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11, 1, 159.
2. С. С. Рыбанин, С. Л. Соболев. Докл. АН СССР, 1983, 269, 6, 1394.
3. А. М. Гришин, В. М. Фомин. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука, 1984.
4. Т. П. Ивлева, П. М. Кришеник, А. Г. Мержанов и др. Хим. физика, 1983, 2, 9, 1259.
5. С. Л. Али, Р. Б. Симпсон, К. Э. Германс. РТК, 1979, 17, 1, 66.
6. S. L. Aly, C. E. Hermance. Comb. Flame, 1984, 40, 2, 173.
7. А. И. Вольперт, С. И. Худяев. Анализ в классах разрывных функций и уравнения математической физики. М.: Наука, 1975.
8. В. В. Александров, А. А. Давыденко, А. Ф. Еремин и др. ФГВ, 1984, 20, 6, 79.
9. В. В. Александров, А. А. Давыденко, Ю. А. Коваленко и др. ФГВ, 1987, 23, 2, 70.

Поступила в редакцию 12/VI 1986,
после доработки — 1/XI 1986

ГОРЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

В. А. Андреев, Е. А. Левашов, В. М. Мальцев, Н. Н. Хавский
(Москва)

Многокомпонентные гетерогенные системы в ряде случаев горят через стадию плавления легкоплавких компонентов смеси и последующего капиллярного растекания расплавленных частиц по микропорам, образованным тугоплавким компонентом [1]. В качестве внешнего воздействия, позволяющего целенаправленно влиять на кинетику горения в работах [2—6] использовалось ультразвуковое поле (УЗ-поле). Так, в [2] отмечено влияние УЗ-поля на капиллярное растекание титана в процессе горения, а в [3] показано воздействие ультразвуковых колебаний на горение системы Ti—В—Fe. В [4—6] исследовалось влияние УЗ-поля на горение системы Ti—С в диффузионном режиме.

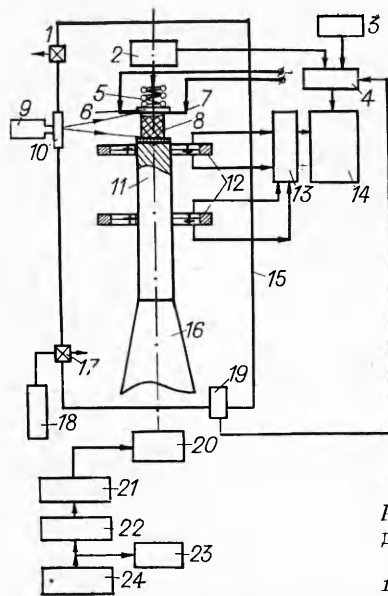


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования воздействия ультразвукового поля на процесс горения многокомпонентных систем.
 1 — выпускной кран; 2 — индукционный датчик усилия прижатия; 3 — блок питания; 4 — тензостанция ИД-2И; 5 — пружина; 6 — прокладка; 7 — поджигающая спираль; 8 — образец; 9 — фоторегистратор ФР-11; 10 — смотровое окно; 11 — излучающий и измерительный волновод; 12 — электродинамический бесконтактный датчик; 13 — согласующее устройство Ф023; 14 — шлейфовый осциллограф Н-117; 15 — бомба постоянного давления; 16 — конический концентратор; 17 — выпускной кран; 18 — газобаллонная система; 19 — индукционный датчик типа ДД-10; 20 — магнитострикционный преобразователь ПМС-15А-18; 21 — ультразвуковой генератор УЗГ-2-10; 22 — генератор УЗГ-3-0,4; 23 — частотомер; 24 — генератор сигналов.

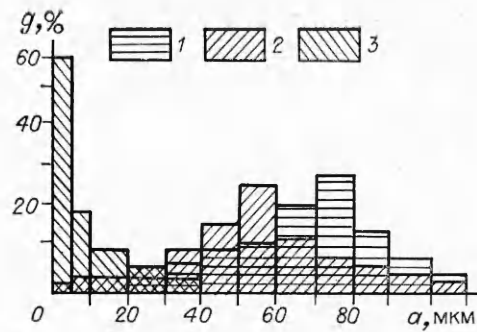


Рис. 2. Гистограммы конгломератов никеля в исходных образцах с разным содержанием никеля в смеси.
 1 — 50% Ni + 50% (Ti + C); 2 — 20% Ni + 80% (Ti + C); 3 — 5% Ni + 95% (Ti + C).

Цель настоящей работы — изучение зависимости скорости горения систем Ti—C—Ni и Ti—C—Ni—Mo, включающих легкоплавкий инертный компонент, от параметров ультразвукового поля.

В экспериментах использовались следующие компоненты: титан ПТМ (< 100 мкм) со средним размером частиц 50 мкм и чистотой 99,82%, никель ПНК чистотой 99,91%, молибден (< 10 мкм) чистотой 99,87%, ламповая сажа ПМ-16Э. В стехиометрическую смесь титана с углеродом вводились никель в количестве 5, 20 и 50% (по массе) или смесь никеля с молибденом с общей массовой долей 20 и 30%. Содержание молибдена в связке составляло 27%. Шихта готовилась в шаровой мельнице 10 ч, после чего в нее вводили органический пластификатор¹ с целью улучшения прессуемости и акустических свойств вещества [6]. Образцы диаметром и высотой 20 мм прессовали до относительной плотности 63%.

Для проведения исследований создана установка, блок-схема которой представлена на рис. 1. Амплитуда колебаний и вводимая в образец акустическая мощность определялась специальными электродинамическими датчиками 12 кольцевого типа [5, 7], установленными в узле и пучности стоячей волны. Частота воздействия выбрана равной 18 кГц. Скорость горения u_r рассчитывалась по трем методикам: с помощью фоторегистратора 9, по газовыделению датчиком давления 19, по методу бегущей волны [7]. Величину u_r определяли как среднюю из четырех независимых измерений с погрешностью 5%. Исходные и сгоревшие при давлении аргона 10 атм образцы исследовали металлографическим, электронно-микроскопическим и фрактографическим методами.

Фрактографические исследования исходных прессованных образцов показывают, что никелевые частицы в процессе смешения шихты образуют конгломераты, характерный размер которых возрастает с уменьшением размера частиц никеля и увеличением его доли в шихте. На

¹ Количество пластификатора не превышало 0,4% и по сравнительным экспериментальным данным не влияло на скорость горения и структуру конечного продукта.

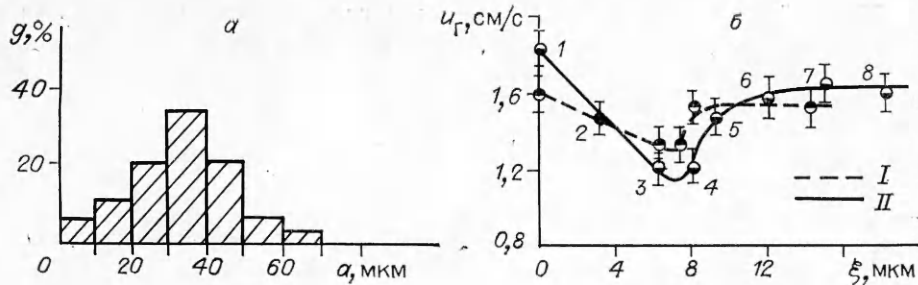


Рис. 3. Гистограмма конгломератов никеля с размером частиц менее 20 мкм (а) и зависимость скорости горения от амплитуды ультразвукового поля (б) при различных дисперсностях частиц никеля: I — менее 20 мкм; II — 63 ÷ ÷ 100 мкм. Состав с 20% Ni.

рис. 2 и 3, а представлены распределения конгломератов по размерным группам. При совпадении дисперсности никеля и горючего эффект конгломерации не обнаруживается. Таким образом, среднестатистический размер конгломератов в шихте может существенно превышать дисперсность используемого никелевого порошка.

Зависимость скорости горения рассматриваемых систем от амплитуды ультразвуковых колебаний ξ характеризуется кривыми, показанными на рис. 4, а. Видно, что увеличение амплитуды вплоть до некоторых пороговых значений ξ_* приводит к уменьшению u_r , затем наблюдается возрастание скорости горения, не превышающее значение u_r в отсутствие ультразвукового поля. Рост доли металла уменьшает u_r , при этом ξ_* возрастает. Замена части никеля молибденом также увеличивает ξ_* .

Дисперсность частиц связки также оказывает влияние на величину u_r (см. рис. 3, б). Увеличение размеров частиц никеля приводит к возрастанию скорости горения в отсутствие ультразвукового поля. При этом в составах с крупными частицами или конгломератами никеля эффект воздействия ультразвука на скорость горения оказывается большим. Этот эффект можно оценить по наклону зависимости относительно уменьшения скорости горения от ξ .

Количественные характеристики пористости конечных продуктов (процент площади, занятой порами) показаны на рис. 4, б. Видно, что зависимость Π (ξ) аналогична зависимости $u_r = f(\xi)$.

При воздействии поля на волну горения представляется возможным выделить стадию влияния УЗ-колебаний на капиллярное растекание легкоплавких компонентов в зоне прогрева, которая является ведущей.

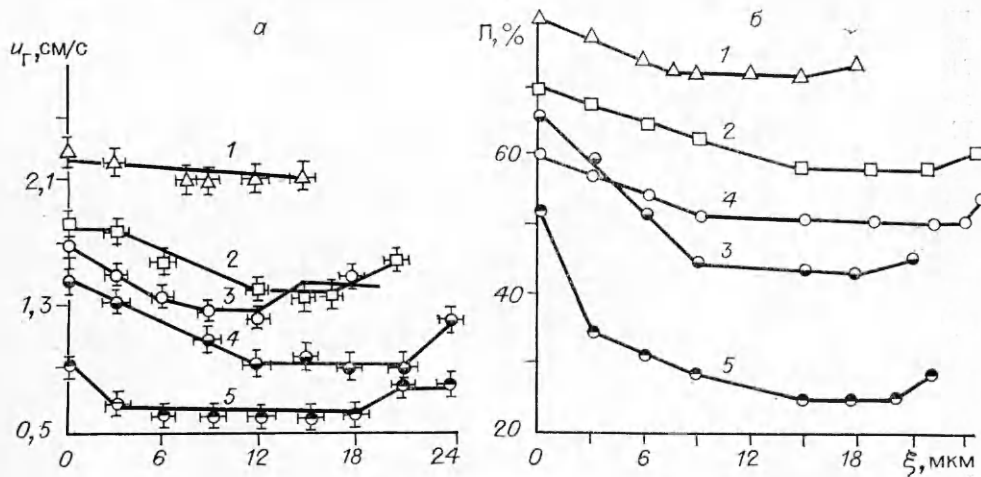


Рис. 4. Зависимости $u_r(\xi)$ (а) и $\Pi(\xi)$ (б) в образцах с различным содержанием металлической связки.

1 — 5% Ni; 2 — 20% (Ni + Mo); 3 — 20% Ni; 4 — 30% (Ni + Mo); 5 — 50% Ni.

Краевой угол смачивания θ в системе расплав инертного металла — тугоплавкий окислитель определяет степень влияния более легкоплавкого компонента на капиллярное растекание горючего. Когда $\theta < 90^\circ$, инертный металл (Ni) может препятствовать полному растеканию реагента (Ti). Это приведет к уменьшению реакционной поверхности (никель блокирует часть реакционноспособной поверхности углерода). Данные рассуждения справедливы для относительно малопористых систем. Соотношение скорости капиллярного растекания этих компонентов определяет скорость и полноту взаимодействия реагентов.

Воздействие, ускоряющее капиллярное растекание частиц или конгломератов никеля, должно привести к снижению u_r . В поле УЗ-колебаний такое воздействие проявляется в изменении свойств жидкости, а именно в возможном снижении вязкости [8] и поверхностного натяжения на границе раздела твердое вещество — жидкость [9]. Данные работ [8, 10] показывают, что изменение θ от начального значения в отсутствие УЗ-поля тем больше, чем больше начальный краевой угол смачивания. Если для Ti $\theta \approx 0$, а для Ni $\theta \approx 60^\circ$ [11], то эффект уменьшения θ в УЗ-поле для никеля будет больше.

Введение в исходную смесь вместо Ni, расплав которого образует на графитовой подложке краевой угол смачивания $\theta > 90^\circ$, должно усилить эффект воздействия ультразвукового поля на скорость горения. Такие эксперименты проведены путем замены Ni порошком Si, размеры частиц которой $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ см, пористость 0,38, массовая доля в смеси 0,2, давление 10 атм (Аг). Изменение амплитуды колебательных смещений от 0 до 6 мкм привело к значительному уменьшению u_r (от 1,4 до 0,6 см/с соответственно). Следовательно, эффект уменьшения u_r тем больше, чем хуже смачиваемость в системе инертный легкоплавкий компонент — тугоплавкий окислитель. Данное предположение согласуется с [10, 12], где, в частности, показано, что ультразвуковое поле может перевести несмачиваемую систему в смачиваемую.

При относительно малых по сравнению с размером частиц Ti частицах Ni характерное время их капиллярного растекания будет меньше, так как характерная глубина капиллярного проникновения расплава l при полном растекании частицы связана с размером этой частицы R и пористостью смеси П: $l = R/3П$. Поэтому при постоянстве массовой доли никеля в смеси ультразвуковой эффект снижения u_r для крупных частиц Ni должен быть больше, чем для мелких (см. рис. 3, б). С ростом массовой доли инертного металла происходит рост конгломератов никеля. Это приводит к увеличению эффекта воздействия УЗ-поля.

Экстремальный характер зависимостей, возможно, связан с расслоением горящих образцов в области максимальных термонапряжений между исходной холодной шихтой и зоной максимального тепловыделения [13]. Увеличение амплитуды колебаний приводит к росту звуковых давлений, которые совместно с термонапряжениями могут привести к нарушению сплошности. При этом повышение количества жидкой фазы

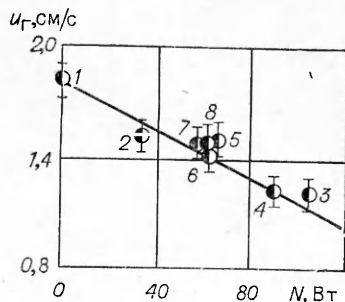


Рис. 5. Зависимость скорости горения смеси с 20% Ni от вводимой акустической мощности ($R_{Ni} = 63 \div 100$ мкм).

в горящем образце должно увеличивать прочность шихты в области максимальных термонапряжений. Действительно, из рис. 4 видно, что ξ_* с ростом доли Ni в шихте увеличивается. Молибден, введенный в шихту, в зоне прогрева частично растворяется в расплаве никеля, образуя более прочную композицию [14]. Замена части никеля молибденом увеличивает ξ_* . С момента расслоения ухудшаются акустические свойства образца, т. е. уменьшается вводимая в горящий образец акустическая мощность N при постоянстве амплитуды колебаний на излучающей поверхности волновода.

Уменьшение акустической мощности

повышает u_r . На рис. 5 показана зависимость $u_r(N)$, имеющая линейный характер (точки 1—8 соответствуют рис. 3, б).

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Некрасов, Ю. М. Максимов, М. Х. Зиятдинов и др. ФГВ, 1978, 14, 5, 26.
2. Ю. М. Максимов, А. Г. Мержанов, А. И. Кирдяшкин. Проблемы технологического горения. Т. 1. Кинетика, термодинамика, механизм и теория горения. Черногловка, 1981.
3. Ю. М. Максимов, А. И. Кирдяшкин, А. Г. Мержанов и др. ФГВ, 1984, 20, 6, 83.
4. В. А. Селезнев, С. В. Писковский, В. М. Мальцев и др. VII Семинар по электрофизике горения. Тез. докл. Караганда, 1984.
5. М. Н. Дубровин, Е. А. Левашов, Н. Н. Хавский и др. Первый Всесоюз. симпозиум по макроскопической кинетике и химической газодинамике. Тез. докл., т. II, ч. 1. Черногловка, 1984.
6. В. М. Мальцев, С. В. Писковский, В. А. Селезнев. Хим. физика, 1984, 3, 12, 1750.
7. М. Н. Дубровин, Е. А. Левашов, Н. Н. Хавский. Всесоюз. научно-техническое совещание «Опыт применения ультразвуковой техники и технологии в машиностроении». Тез. докл., ч. II. М., 1985.
8. В. А. Лобунов, Н. И. Данилович. Физика и химия обработки материалов, 1976, 4, 75.
9. И. И. Теумин. Проблемы металловедения и физики металлов. Вып. 7. М.: Металлургиздат, 1962.
10. Е. А. Антонова, С. А. Семенов. Тр. 9-го Всесоюз. совещания по жаростойким покрытиям. Л., 1981.
11. Ю. В. Найдич. Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. Нальчик, 1965.
12. П. П. Прохоренко, Н. В. Дежгунов, Г. Е. Коновалов. Ультразвуковой капиллярный эффект. Минск: Наука и техника, 1981.
13. Ю. Г. Дорофеев. Горячее прессование порошковых материалов. М.: Металлургия, 1977.
14. В. И. Третьяков. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1976.

Поступила в редакцию 27/II 1986,
после доработки — 8/X 1986

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ГОРЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ СИСТЕМ

Г. И. Карякина
(Черногловка)

В практике горения многокомпонентных систем с неорганическими реагентами, в частности, в условиях сгорания их на воздухе при атмосферном давлении часто встречаются случаи недогорания горючих и неполного использования окислителя при работе с реактивами разной степени чистоты, дисперсности, неоднородности гранулометрического состава и др. В результате в процессе сгорания составов с разными марками реагентов образуются неоднородные продукты.

Задача работы — исследование влияния перечисленных выше физико-химических факторов на неполноту сгорания алюминийсодержащих сложных систем в широкой области концентраций их компонентов, выявление областей неустойчивого горения, что важно для оптимизации полезного эффекта этих смесей.

Для решения поставленной задачи исследована сложная система



которая представляет собой комбинацию двухкомпонентных составов: трудноподжигаемого алюмотермита (температура вспышки $t_b = 1000 \div 1300^\circ\text{C}$) и легкоподжигаемого карбидобихроматного состава ($t_b = 700^\circ\text{C}$).

Образцы для исследований готовили растиранием порошкообразных смесей в агатовой ступке и прессованием при давлении 100 кг/см². Таблетки диаметром 10 и высотой 10 мм поджигали на воздухе раскаленной спиралью под химическим стаканом емкостью 2 л. Кривые зависимости скорости горения u сложных систем от процентного содержания термита g представлены на рис. 1. Каждой точке кривой соответ-