

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ НА ПРЕДЕЛЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ СПИНОВОГО ГОРЕНИЯ ТИТАНА В АЗОТЕ

УДК 536.36

А. К. Филоненко, В. В. Барзыкин

Институт структурной макрокинетики РАН,
142432 Черноголовка

Экспериментально определена область спинового горения в системе координат давление азота (100–1800 Торр) — плотность сжигаемых образцов (2,0–3,3 г/см³). Исследовано влияние плотности образцов при различном давлении азота на характеристики спинового горения (скорость, частота, шаг). Впервые наблюдался переход спинового режима горения в стационарный с уменьшением скорости горения.

В работе [1] впервые описано спиновое горение, наблюдавшееся при сжигании пористых образцов гафния, циркония и титана в смеси азота с аргоном при давлении несколько десятков атмосфер. После открытия спинового горения систем металл — азот оно наблюдалось также в безгазовых системах [2, 3], термитах [4, 5] и смеси никеля с кремнием [6]. Появились теоретические работы [7–13], которые подтвердили это явление и прогнозировали ряд его особенностей. Однако по-прежнему ощущается недостаток экспериментальных данных, характеризующих этот интересный вид нестационарного горения. Один из важнейших параметров, влияющих на теплофизику горения и сопровождающие его фильтрационные процессы, — плотность твердой фазы, по которой распространяется горение.

В опытах использовались цилиндрические образцы диаметром 10 и высотой 15 мм, спрессованные из порошка титана. Плотность образцов ρ варьировалась в диапазоне $(2,0 \div 3,3) \pm 0,05$ г/см³. Образцы сжигались в герметичном сосуде в среде азота при давлении $p = 100 \div 1800$ Торр. Цилиндры устанавливались в сосуде вертикально и поджигались с торца раскаленной электрической спиралью. Фоторегистрация процесса горения и наблюдение за ним проводились через прозрачные окна в сосуде. Измерялись основные параметры изучаемого процесса: скорость горения вдоль оси образца $u = l/t$, частота спинового горения $\nu = n/t$ (частота вращения очага горения на цилиндрической поверхности), шаг спина $s = u/\nu$ (расстояние между соседними витками спинового очага горения). Здесь t — время горения образца длиной l , а n — количество оборотов спинового очага вокруг оси образца за время t .

Регистрация процесса горения на движущуюся горизонтальную фотопленку позволяла получать данные о режиме горения (стационарный или спиновый) и о всех его характеристиках. Предел горения (условия, при которых горение не распространяется) определялся по внешнему виду поджигаемого образца, который в таком случае сгорал не до конца. Шаги изменения плотности и давления составляли соответственно 0,1–0,3 г/см³ и 100–200 Торр.

В результате проведенных экспериментов определена область спинового горения в системе координат давление азота — плотность сжигаемых образцов титана (рис. 1, область

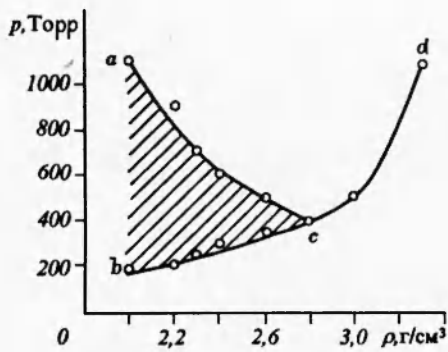


Рис. 1

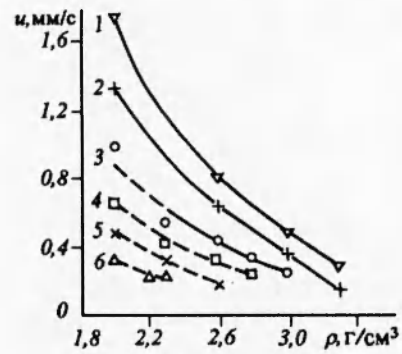


Рис. 2

Рис. 1. Область спинового горения

Рис. 2. Зависимость скорости горения от плотности сгорающих образцов.

p , Торр: 1 — 1800, 2 — 1100, 3 — 700, 4 — 400, 5 — 300, 6 — 200; --- — спинового горения, — — — стационарного горения

abc). Вне этой области горение или невозможно, или протекает в стационарном режиме. Граница bc , ниже которой горение невозможно, составляет нижний предел спинового горения, граница ac , выше которой горение стационарно, — верхний предел. Видно, что область спинового горения с ростом плотности сужается и при $\rho > 2,8$ г/см³ спиновый режим горения не реализуется.

Выше границы cd горение похоже на стационарное (по крайней мере, очаги спинового горения отсутствуют), а ниже этой линии фронт горения не распространяется. Есть основания полагать, что стационарный режим вблизи границы обладает рядом особенностей. Такой процесс, впервые наблюдавшийся при горении титана в смеси азота с аргоном или гелием [14], внешне отличающийся низкой скоростью, широкой зоной горения и сравнительно слабой светимостью, назван «тлеющим горением». Он требует более тщательного исследования. Результаты измерений скорости и частоты спинового горения в зависимости от плотности представлены на рис. 2 и 3. На рис. 4 показано изменение шага спина λ при увеличении плотности сгорающего образца и разных давлениях азота. Значения λ получены с использованием данных рис. 2 и 3. Наибольшие значения плотности для каждой прямой на рис. 4 соответствуют граничным условиям спинового режима, когда при дальнейшем увеличении плотности горение или невозможно (линии 1–3), или переходит в стационарное (линии 4, 5).

В работах [3, 5, 6, 14–17] показано, что переход от стационарного к спиновому режиму связан с относительным увеличением теплотеря из фронта горения по сравнению с тепловыделением в нем под влиянием таких факторов, как изменение диаметра образца, разбавление твердого и газообразного компонентов инертными добавками, понижение давления азота и начальной температуры процесса. Дальнейшее воздействие в том же направлении в спиновом режиме наравне с уменьшением скорости и частоты спинового горения вызывало также увеличение шага спинового горения, и в конце концов наступали условия, когда горение становилось невозможным. Таким образом, спиновый режим предшествовал погасанию образца. Как оказалось, влияние плотности на режим горения и его характеристики обладает рядом интересных особенностей, речь о которых пойдет ниже.

Как видно из рис. 1, рост плотности неоднозначно влияет на изменение спинового

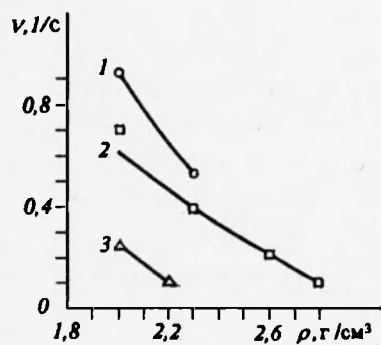


Рис. 3

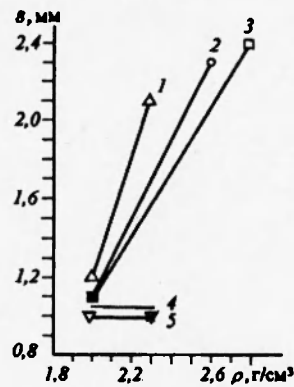


Рис. 4

Рис. 3. Зависимость частоты спигового горения от плотности сгорающих образцов.

p , Торр: 1 — 700, 2 — 400, 3 — 200

Рис. 4. Зависимость шага спигового горения от плотности сгорающих образцов.

p , Торр: 1 — 200, 2 — 300, 3 — 400, 4 — 700, 5 — 600

горения. При давлении $p > 400$ Торр (см. рис. 1, участок ac) увеличение ρ переводит спиновый режим в стационарный, а при $p < 400$ Торр (участок bc) происходит погасание образца. При этом в обоих случаях характер изменений скорости (см. рис. 2) и частоты спигового горения (см. рис. 3) одинаков: они уменьшаются с ростом ρ . Как видно из рис. 4, этого нельзя сказать о шаге спигового горения. В области $p \leq 400$ Торр, где рост плотности ведет к прекращению горения, шаг спина возрастает (см. рис. 4, линии 1-3), а при $p > 400$ Торр, где с ростом ρ происходит переход спигового горения в стационарное, шаг спина не меняется (см. рис. 4, линии 4, 5).

Так как $s = u/v = \pi du/v$, где v — линейная скорость движения очага горения поперек образца диаметром d , то при постоянном d шаг спина является характеристикой отношения скорости горения вдоль оси образца к поперечной скорости. Это значит (учитывая, что при увеличении ρ уменьшается u), что в случае $p < 400$ Торр рост ρ гораздо сильнее влияет на поперечную скорость, чем при $p > 400$ Торр, когда влияние ρ на u и v примерно одинаковое.

Переход спигового горения в стационарное при увеличении плотности образца имеет еще одну особенность, не наблюдавшуюся ранее при аналогичных переходах под влиянием других параметров. Такой переход происходит при уменьшении средней скорости горения (см. рис. 2, кривая 3). Особенности смены режимов горения при изменении ρ помогают понять сравнение периода спигового горения и характеристического времени прогрева образца до его оси, которое сделано в [16] для спигового режима горения

$$t_s/2 < (d/2)^2/a, \quad (1)$$

где $t_s = 1/\nu$ — период спигового горения; $a = \lambda/c\rho$ — температуропроводность; $\lambda = 2\lambda_c\rho/(3\rho_c - \rho)$ [18] и c — теплопроводность и теплоемкость образца соответственно; λ_c , ρ_c — теплопроводность и плотность беспористого материала, в данном случае титана.

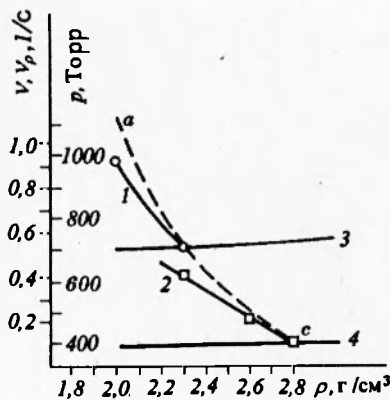


Рис. 5. Зависимости частоты спиновое горения и его верхней границы по давлению от плотности: 1, 2 — эксперимент; 3, 4 — расчет по формуле (2); p , Торр: 1, 3 — 700, 2, 4 — 400; ac — верхняя граница спиновое горения по давлению (см. рис. 1)

Подставляя t_s , a , λ в (1), получим условие для частоты спиновое горения образца:

$$\nu > 4\lambda_c / cd^2 (3\rho_c - \rho) = \nu_s. \quad (2)$$

При спиновом режиме горения $\nu_\rho < \nu$. Как показали опыты (см. рис. 3), с ростом плотности частота спиновое горения уменьшается, а согласно (2) предельная (минимальная) частота ν_ρ увеличивается, и могут создаться условия, при которых $\nu \simeq \nu_\rho$, что способствует переходу спиновое горения в стационарное. Поскольку такой переход происходит при повышении плотности, то он также сопровождается снижением скорости горения.

На рис. 5 приведены данные расчета ν_ρ по формуле (2) и экспериментальные результаты для частоты спиновое горения в условиях перехода его в стационарное (рис. 5, кривая 2), подтверждающие эти рассуждения¹.

При сравнении кривых 3 и 4 (см. рис. 5) видно, что эффективная теплопроводность во фронте горения с повышением давления должна значительно (в ~ 7 раз) возрасти. Это качественно соответствует тому, что в условиях фильтрационного горения повышение давления вызывает интенсификацию процесса теплопередачи во фронте горения пористого образца. Важно не столько количественное совпадение условий перехода спиновое горения в стационарное при увеличении плотности, сколько качественное его объяснение.

Повышение нижнего предела спиновое горения (см. рис. 1, линия bc) с ростом плотности выглядит естественно, так как этот предел связан прежде всего с недостатком азота во фронте горения. Рост давления (повышение нижнего предела) компенсирует снижение доставки азота в реакционную зону, которое наступает при снижении пористости образца. Что касается верхнего предела спиновое горения (см. рис. 5, линия ac), остается предположить, что влияние давления на тепло- и массоперенос в пористом образце сильнее, чем на скорость спиновое горения. Иными словами, при росте давления значение ν_ρ увеличивается гораздо больше, чем ν (см. рис. 5).

Работа выполнена при частичной поддержке Международного научного фонда (грант NL 6000).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г., Филоненко А. К., Боровинская И. П. Новые явления при горении конденсированных систем // Докл. АН СССР. 1973. Т. 208, № 4. С. 892.

¹При расчете ν_ρ использовались данные справочника [19].

2. Азатян Т. С., Мальцев В. М., Мержанов А. Г., Селезнев В. А. Некоторые закономерности горения смеси титана с кремнием // *Физика горения и взрыва*. 1979. Т. 15, № 1. С. 43–49.
3. Максимов Ю. М., Пак А. Т., Лавренчук Г. В. и др. Спиновое горение безгазовых систем // *Физика горения и взрыва*. 1979. Т. 15, № 4. С. 156–159.
4. Ермаков В. И., Струнина А. Г., Барзыкин В. В. Экспериментальное исследование процесса зажигания безгазовых систем волной горения // *Физика горения и взрыва*. 1976. Т. 12, № 2. С. 211–217.
5. Дворянкин А. В., Струнина А. Г., Мержанов А. Г. Некоторые закономерности спинового режима горения термитов // *Физика горения и взрыва*. 1982. Т. 18, № 2. С. 10–16.
6. Zhang S., Muniz Z. A. Spin combustion in the nickel–silicon system // *J. of Material Sci.* 1992. N 27. P. 5789.
7. Ивлева Т. П., Мержанов А. Г., Шкадинский К. Г. Математическая модель спинового горения // *Докл. АН СССР*. 1978. Т. 239, № 5. С. 1086.
8. Алдушин А. П., Зельдович Я. Б., Маломед Б. А. К феноменологической теории спинового горения // *Докл. АН СССР*. 1980. Т. 251, № 5. С. 1102.
9. Sivashinsky G. On spinning propagation of combustion waves // *SIAM J. Appl. Math.* 1981. V. 40, N 3. P. 432.
10. Вольперт В. А., Вольперт А. И., Мержанов А. Г. Применение теории бифуркаций к исследованию спиновых волн горения // *Докл. АН СССР*. 1982. Т. 262, № 3. С. 642.
11. Margolis S. B., Kapfer H. G., Zeaf G. K., Matkowsky B. J. Bifurcation of pulsating and spinning reaction front in condensed two-phase combustion // *Combust. Sci. Tech.* 1985. N 44. P. 127.
12. Booty M. R., Margolis S. B., Matkowsky B. J. Interaction of pulsating and spinning waves in condensed phase combustion // *SIAM J. Appl. Math.* 1986. N 46. P. 801.
13. Новожилов Б. В. К теории поверхностного спинового горения // *Докл. АН СССР*. 1992. Т. 326, № 3. С. 485.
14. Филоненко А. К., Вершинников В. И. Закономерности спинового горения титана в азоте // *Физика горения и взрыва*. 1975. Т. 11, № 3. С. 353–362.
15. Филоненко А. К. Спиновое горение титана при пониженном давлении // *Физика горения и взрыва*. 1991. Т. 27, № 6. С. 41–44.
16. Филоненко А. К. Влияние теплотерь на режим и параметры горения титана в азоте // *Физика горения и взрыва*. 1994. Т. 30, № 4. С. 42–46.
17. Ермаков В. И., Струнина А. Г., Барзыкин В. В. Экспериментальное исследование влияния теплотерь на процесс зажигания безгазовых систем волной горения // *Физика горения и взрыва*. 1978. Т. 14, № 6. С. 36–44.
18. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974.
19. Кей Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. М.: Физматгиз, 1962.

*Поступила в редакцию 14/III 1995 г.,
в окончательном варианте — 29/V 1995 г*