

## НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПИНОВОГО ОЧАГА ГОРЕНИЯ И ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В НЕМ

А. К. Филоненко

Институт структурной макрокинетики РАН, 142432 Черногловка

Исследованы прессованные из порошка титана образцы, сгоревшие в атмосфере азота. Обнаружены каналы под поверхностью образцов, сгоревших в спиновом режиме. Проведена оценка размера спинового очага горения, и определено влияние давления азота в диапазоне  $100 \div 1800$  Торр на размер очага. Получены данные по степени азотирования металла и фазовому составу слоя, где проходил спиновый очаг, и других слоев образца в зависимости от их расстояния от поверхности.

Для спинового режима горения характерен очаг химической реакции, имеющий вид ярко светящегося пятна, которое движется вдоль прогретого слоя еще не сгоревшего вещества. В случае горения цилиндрического образца с торца такой очаг движется по образующей цилиндра вдоль оси образца по спирали. Как показали наблюдения, направление движения очага (вправо, влево) произвольно. Очагов может быть несколько, движущихся друг за другом или навстречу [1, 2].

После того как спиновый режим горения был обнаружен [1], основное внимание исследователи обращали на области существования спинового горения, его динамические характеристики (скорость движения очага  $U_{\text{сп}}$ , частота спинового горения  $\nu$ , шаг спина  $S = U/\nu$ ), на связь средней скорости горения  $U$  со спиновой  $U_{\text{сп}}$  и на выявление параметров, влияющих на эти характеристики. Каких-либо данных о самом очаге в настоящее время практически нет.

В данной работе получены косвенные сведения об очаге спинового горения при исследовании образцов, сгоревших в спиновом режиме. Рассматриваются цилиндрические образцы диаметром 10 мм, прессованные из порошка титана до плотности  $\rho = 2 \text{ г/см}^3$ , сгоревшие в атмосфере азота. По внешнему виду образцы, сгоревшие в спиновом или стационарном режиме, практически не отличаются. На образцах, сгоревших в спиновом режиме, иногда можно наблюдать с трудом различимую более темного цвета полоску — след от прохождения очага спинового горения. Этот след как бы нарисован на гладкой поверхности образца. (Это не касается термических систем, при спиновом

горении которых наблюдалось изменение рельефа поверхности [3]). Оказалось, что внутренние слои образца, сгоревшего в спиновом режиме, претерпевают существенные изменения. На рис. 1 показан внешний вид сгоревших образцов в спиновом режиме после механической очистки от более рыхлого наружного слоя. Для сравнения приведен необработанный образец. Образцы 1 и 8 сгорали в пограничных областях: соответственно вблизи области, где горение невозможно, и вблизи области, где горение стационарное [4]. Первый, начав гореть в спиновом режиме, погас. Его нижняя часть не горела и при механической обработке рассыпалась. Борозды, наблюдаемые на образцах, сгоревших при более низких давлениях (см. рис. 1, 1–4), имеют хорошо сформированный спиралеобразный вид. При повышении давления они вырождаются в рифленую поверхность с обрывистыми, не делающими полного оборота витками (см. рис. 1, 5–8), что соответствует наблюдаемому многоочаговому хаотичному спиновому режиму, который при еще большем давлении переходит в стационарный.

Проведено сравнение шагов спина, измеренного на сгоревшем образце (расстояние между ближайшими витками,  $S_{\text{и}}$ ) и полученного из фоторегистрограмм процесса ( $S_{\text{ф}}$ ). Эти данные при разных давлениях азота приведены на рис. 2, где помимо значений  $S_{\text{ф}}$ , полученных в настоящей работе, нанесены значения  $S_{\text{и}}$  из работ [4, 5]. Из рисунка видно, что значения  $S_{\text{и}}$  и  $S_{\text{ф}}$  при  $p \lesssim 800$  Торр совпадают. Поэтому можно утверждать, что по крайней мере в этом диапазоне давлений именно очаг спинового горения, из визуального наблюдения кото-

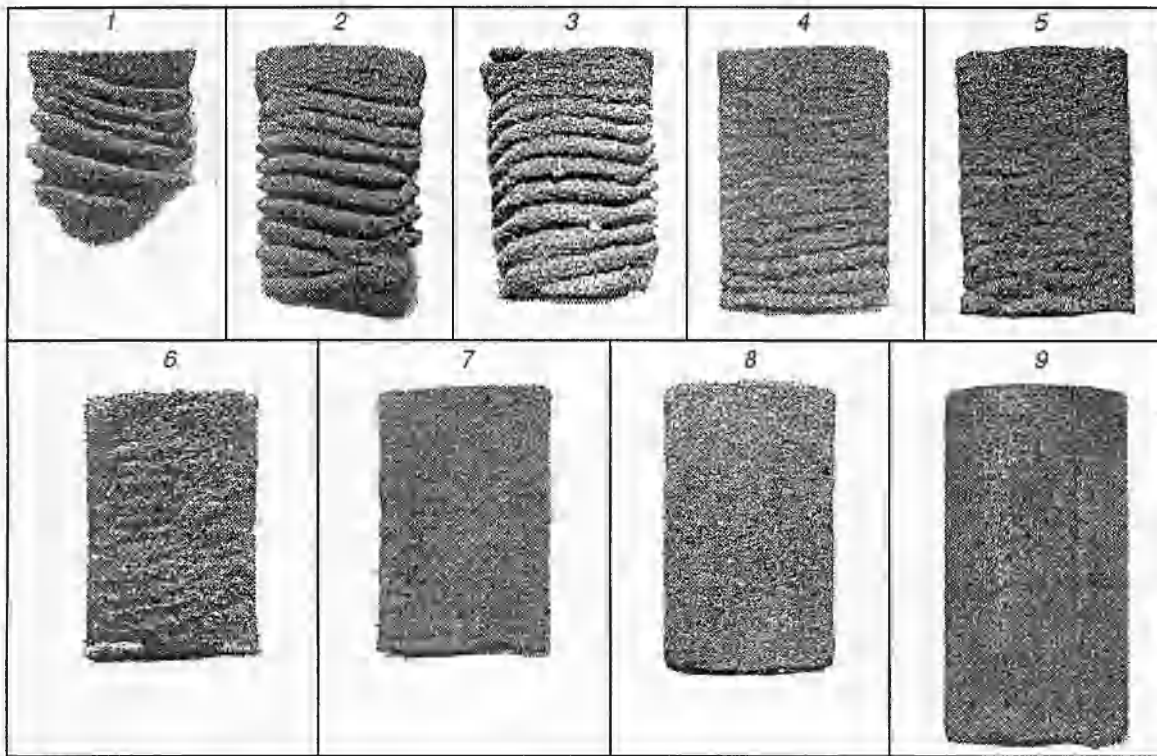


Рис. 1. Фотографии сгоревших в спиновом режиме образцов после обработки (1-8):

$p = 100$  (1), 150 (2), 200 (3), 400 (4), 600 (5), 800 (6), 1000 (7), 1800 Торр (8), 9 — необработанный образец, сгоревший в спиновом режиме

рого получена величина  $S_{\text{ф}}$ , вызывает структурные изменения поверхности образца в виде витков с шагом  $S_{\text{и}}$ .

Зная путь прохождения очага по поверхности, можно провести дополнительное исследование сгоревшего образца. На рис. 3 схематично представлен разрез сгоревшего образца радиусом  $r$ . В его механической структуре различаются следующие образования, условно названные слоями А, Б, В, Г. Слой А — легко отделяемый наружный слой сгоревшего порошка, после снятия которого образец имеет вид, представленный на рис. 1 (1-8). Слой Б — «нарезка» из спеченого сгоревшего порошка, находящаяся под поверхностью на расстоянии  $d_1 - d_2$ , где  $d_1$  — глубина проникновения спинового очага горения в образец,  $d_2$  — толщина слоя. Несмотря на идентичность структур А и Б по параметру  $S_{\text{и}}$  очаг спина проходит, вероятно, в слое А, поскольку он более открыт проникновению азота извне при поверхностном горении. Слой В находится под «нарезкой» и кончается там, где желтый цвет сгоревшего порошка становится серым. Слой Г — серый слой

порошка, примыкающий к оси образца.

Размер очага спинового горения характеризуется шириной шага  $S_{\text{и}}$  и глубиной проникновения в образец  $d_1$ . Из рис. 2 видно, что обе величины уменьшаются с ростом давления. Что касается зависимости  $S_{\text{и}}(p)$ , то ее характер соответствует выражению  $S = a/U$  [6], где  $a$  — температуропроводность металла, а значение  $U$ , как известно, с ростом давления увеличивается [5]. Вероятно, и глубина проникновения очага в образец пропорциональна ширине прогретого слоя, образуемого очагом, движущимся по поверхности со скоростью  $U_{\text{сп}}$ , и подчиняется той же закономерности:  $d_1 \sim a/U_{\text{сп}}$ , где  $U_{\text{сп}} = 2\pi r\nu$ . Так как частота спинового горения  $\nu$  при увеличении давления растет [5], значение  $d_1$  уменьшается.

Таким образом, давление газового компонента (азота) влияет на размер спинового очага горения опосредованно, через скорость горения. При непосредственном влиянии давления на размеры очага, очевидно, эффект был бы противоположным, так как с ростом давления усилилась бы фильтрация газа сквозь поры и

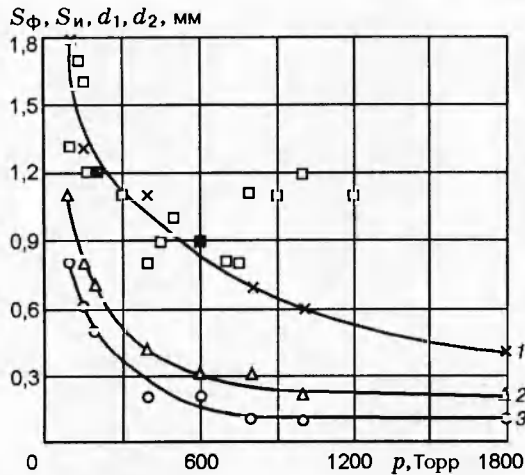


Рис. 2. Зависимость характерных размеров спиновоего очага горения от давления азота:

1 — шаг спина, измеренный на сгоревших образцах ( $S_n$ ,  $\times$ ) и полученный из фоторегистрограмм ( $S_f$ ,  $\square$ ); 2 — глубина проникновения спиновоего очага горения в образец ( $d_1$ ); 3 — толщина слоя Б ( $d_2$ )

увеличилась бы глубина проникновения очага горения в образец.

Возвращаясь к данным, представленным на рис. 2, и делая некоторые предположения, можно объяснить значительное (примерно в два раза) расхождение значений  $S_f$  и  $S_n$  при  $p > 800$  Торр. Такое возможно, если на этом участке возникает двухочаговый (двухголовый) спин, фиксируемый как одноголовый из-за ограниченной возможности методики или сложности строения двухочагового спина. (Например, два сходящихся или расходящихся очага, движущихся в противоположных направлениях, воспринимаются как один при фоторегистрации [7] с одной стороны образца, обращенной к прибору). В этом случае фиксируемая частота спина  $\nu_f$  в два раза меньше истинной  $\nu_n$  ( $\nu_f = \nu_n/2$ ), а следовательно, и  $S_f = U/\nu_f = 2U/\nu_n = 2S_n$ .

Многоголовый спин наблюдался ранее, например в [1], в виде нескольких очагов горения движущихся в одном или разных направлениях. Возможность появления многоголового спина и в связи с этим кратное увеличение его частоты теоретически рассмотрены в работах [6, 8]. Однако подробно эти вопросы не исследовались, и предыдущие рассуждения об образовании двухголового спина всего лишь гипотеза.

Представляет интерес сравнение интенсивности процесса горения в слое, где прошел

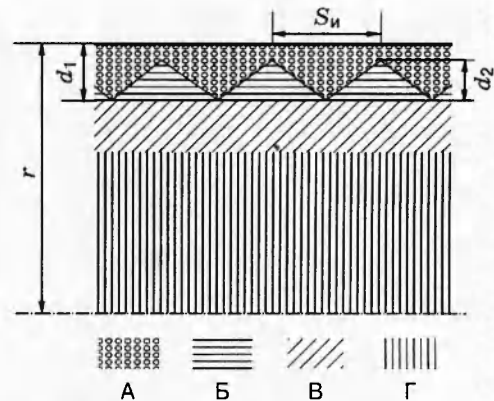


Рис. 3. Схема разреза фрагмента образца, сгоревшего в спиновом режиме:

соотношение размеров слоев соответствует  $p = 100$  Торр

спиновоего очаг (см. рис. 3, слой А), и в соседних слоях образца. Показателем интенсивности может служить степень азотирования металла в сгоревшем образце. В таблице приведены данные химического анализа содержания азота в слоях образца радиусом  $r = 5,1$  мм при давлении азота  $p = 400$  Торр.

Как видно из таблицы, массовое содержание азота в образце по мере удаления от поверхности уменьшается и даже на поверхности не достигает максимально возможного (22,6%, в расчете на образование стехиометрического нитрида титана). Содержание азота в слое Б, фиксирующем границу между витками спиновоего очага, практически такое же, как в слое А, где очаг прошел. (Небольшая разница в содержании азота в слоях А и Б близка к методической ошибке применяемого метода химического анализа). Вероятно, это связано с тем, что слой Б, хотя и состоит из участков, разграничивающих спиновоего очаги, подвергается прогреву и азотированию дважды: предыдущим и последующим витками спина. Во всех слоях содержится непрореагировавший титан: от 20 до 65% по мере приближения к оси образца. Рентгенофазовый анализ слоев А — Г показал, что

Слои	Азот, %	Толщина слоя, мм
А	16	0,4
Б	17	0,2
В	10	1,0
Г	6	3,5

они состоят из титана и нитрида титана.

### ВЫВОДЫ

1. Выявлены механические изменения поверхностного слоя сгоревшего вещества, являющиеся следствием прохождения спинового очага горения.

2. Дана оценка размера спинового очага горения и влияния на него давления азота.

3. Проведено сравнение интенсивности процессов горения в спиновом очаге и окружающих его слоях по степени азотирования металла.

Благодарю сотрудников лабораторий химического и рентгенофазового анализа за помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (код проекта 355).

### 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.
2. Филоненко А. К., Вершинников В. И. Закономерности спинового горения титана в азоте // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 3. С. 353.
3. Струнина А. Г., Дворянкин А. В. Влияние тепловых факторов на закономерности неустойчивого горения безгазовых систем // Докл. АН СССР. 1981. Т. 260, № 5. С. 1185.
4. Филоненко А. К. Влияние плотности на пределы и закономерности спинового горения титана в азоте // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 1. С. 53.
5. Филоненко А. К. Спиновое горение титана при пониженном давлении // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 6. С. 41.
6. Новожилов Б. В. К теории поверхностного спинового горения // Докл. АН СССР. 1992. Т. 326, № 3. С. 485.
7. Бахман Н. Н., Беляев А. Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. М.: Наука, 1967. С. 127.
8. Новожилов Б. В. Двумерное приближение в теории поверхностного спинового горения // Докл. РАН. 1995. Т. 341, № 1. С. 69.

*Поступила в редакцию 28/II 1997 г.*