

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

A. G. Merzhanov, V. I. Ratnikov, V. N. Sanin, S. L. Silyakov, V. I. Yuhvid,  
Interpolation diagnostics of microgravity effects on SHS processes under  
artificial  $g$ -conditions,  
*Dokl. Akad. Nauk*, 1997, Volume 353, Number 2, 180–182

<https://www.mathnet.ru/eng/dan50289>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.84

May 24, 2025, 15:37:03



УДК 539.3

## ИНТЕРПОЛЯЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА МИКРОГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ПРОЦЕССОВ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННОЙ ГРАВИТАЦИИ

© 1997 г. Член-корреспондент РАН А. Г. Мержанов, В. И. Ратников,  
В. Н. Санин, С. Л. Силяков, В. И. Юхвид

Поступило 20.08.96 г.

Проблема поведения различных систем в условиях невесомости на борту космического корабля усилила интерес к изучению гравитационно-чувствительных процессов и влиянию искусственной гравитации на их протекание. Одним из таких процессов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [1]. Его исследование в гравитационных и микрогравитационных условиях позволило обнаружить интересные эффекты [2–5].

При обычной схеме исследований изучают характеристики процессов при различных перегрузках ( $n = a/g$ , где  $a$  – искусственно создаваемое ускорение,  $g$  – ускорение силы тяжести) и экстраполируют результаты на условие невесомости ( $n = 0$ ). Для фронтальных процессов типа СВС экспериментальная картина богаче. Взаимная ориентация векторов скорости горения  $U$  и перегрузки  $n$  является дополнительным параметром, влияющим на протекание процесса (векторный фактор).

В работе [4] высказана идея о том, что для фронтальных процессов можно создавать не только положительные, но и отрицательные перегрузки (векторы  $U$  и  $n$  параллельны и направлены в первом случае в одну сторону, во втором в противоположные). Такой подход позволяет свести экстраполяционную задачу (на условия невесомости) к интерполяционной. Для этого необходимо снять две ветви зависимостей характеристик процесса от величины  $n$  при положительных и отрицательных ее значениях, а затем данные проинтерполировать на условие  $n = 0$ , что, несомненно, является более точной процедурой по

сравнению с экстраполяционной. В данном сообщении эта идея реализована экспериментально.

Ранее эксперименты по влиянию искусственной гравитации на СВС процессы проводились в центрифугах, развивающих перегрузки  $n = 50–1000$  [2]. Для решения этой поставленной задачи была создана центрифуга, обеспечивающая более близкий к невесомости интервал перегрузок ( $n = 2–15$ ). Установка состоит из роторной системы, вращающегося плеча (длиной 2 м), исследуемых блоков (или блока с противовесом), видеокамеры (рис. 1) и имеет две характерные особенности. Первая: исследовательский блок прикреплен к плечу центрифуги на шарнире и при вращении принимает наклонное положение, соответствующее вектору суммарного ускорения

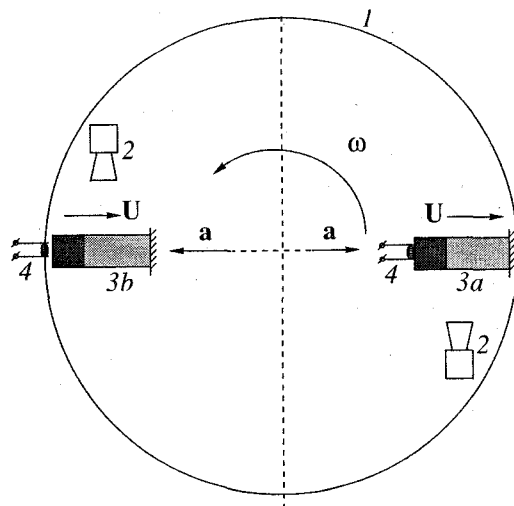


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – центрифуга, 2 – видеокамера, 3а – образец, горящий при положительной перегрузке, 3б – образец, горящий при отрицательной перегрузке, 4 – поджигающая электрическая спираль.

(горизонтальное центробежное ускорение плюс ускорение силы тяжести). Угол наклона дает дополнительную информацию о величине создаваемой перегрузки. Вторая: видеокамера вращается вместе с исследовательским блоком (при меньшем радиусе) и позволяет проводить непрерывную видеосъемку.

Для исследования была выбрана система Ti + 0.8C, в которую вводились добавки 15 мас.% Ni или Al или Ni + Al и 2 мас.% Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> · 10H<sub>2</sub>O (бура).

В экспериментах, проведенных в условиях положительной гравитации (n = 1) [5], было показано, что система Ti + 0.8C с металлическими добавками горит стационарно с малыми изменениями объема образца и является удобной моделью для исследований. Введение газифицирующих добавок буры в небольших количествах приводит к удлинению образцов за счет порообразования в продуктах горения [3, 5]. Векторный эффект проявляется в изменении скорости горения (слабо), удлинении образцов при горении и увеличении пористости конечного продукта (сильно).

В наших экспериментах сжигали прессованные цилиндрические образцы диаметром 8.5 мм, массой 3 г и плотностью 2.4–2.6 г/см<sup>3</sup>. Характеристики исходных образцов и составов продуктов синтеза приведены в табл. 1.

В опытах измеряли скорость горения (по перемещению движущегося светящегося фронта), относительное изменение длины и конечную пористость образца. Относительное удлинение определяли после завершения горения в остывших образцах как

$$\varepsilon = \frac{L_k - L_0}{L_0},$$

где  $L_0$  и  $L_k$  – соответственно начальная и конечная длина образца. Диаметр образцов практически не меняется. Конечную пористость рассчитывали по формуле

$$P_k = 1 - \frac{\rho_k}{\rho_n},$$

где  $\rho_k$  – плотность конечного образца,  $\rho_n$  – пикнометрическая плотность конечного продукта (экспериментальная).

Результаты эксперимента в центрифуге приведены на рис. 2. Анализ экспериментальных данных позволяет установить следующее.

1. В исследуемом интервале ( $-5 < n < 6$ ) горение стационарно – мгновенная скорость горения постоянная по длине образца.

2. При переходе из области положительных перегрузок в область отрицательных  $U$  уменьшается, а  $\varepsilon$  и  $P_k$  увеличиваются.

3. Наибольшее значение  $U$  наблюдается для добавки Ni + Al (за счет дополнительного тепло-

Таблица 1

Состав добавок	Начальная высота таблеток, см	Начальная пористость таблеток, %	Фазовый состав продуктов горения
Ni	2.05	51	TiC <sub>x</sub> , Ni <sub>3</sub> Ti
Ni + Al	2.13	48	TiC <sub>x</sub> , Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> , TiAl
Al	2.17	44	TiC <sub>x</sub> , Al, TiAl

Таблица 2

-n	Число фрагментов/масса фрагментов (г) для образцов с добавками		
	Ni	Al	Ni + Al
1	0	2/1.50	4/0.75
2	0	2/1.50	4/0.75
3	3/1.00	2/1.40	5/0.60
4	4/0.75	–	7/0.40
5	5/0.60	–	8/0.35
6	–	–	–
7	–	–	–
8	7/0.40	5/0.60	–
9	–	–	–
10	10/0.30	6/0.50	–

Таблица 3

Добавки	U, см/с	$\varepsilon$ , %	$P_k$
Al	0.45	1.5	77
	0.46	1.5	78
Ni	0.6	1.2	78
	0.55	1.2	78
Ni + Al	0.8	1.2	76
	0.9	1.1	75

Примечание. Над чертой – интерполяционные данные, под чертой – ортогональный векторный эксперимент.

выделения). Влияние природы добавок на зависимость  $\varepsilon$  и  $P_k$  от  $n$  более сложное.

Эксперименты показывают, что гравитационное сжатие зоны горения ( $n > 0$ ) увеличивает скорость горения, а также уменьшает относительное удлинение и пористость конечного образца. Растяжение зоны горения ( $n < 0$ ) действует в противоположную сторону.

Кроме того, в экспериментах было отмечено, что при достаточно большой отрицательной перегрузке происходит поочередный отрыв фрагментов образца по мере продвижения фронта

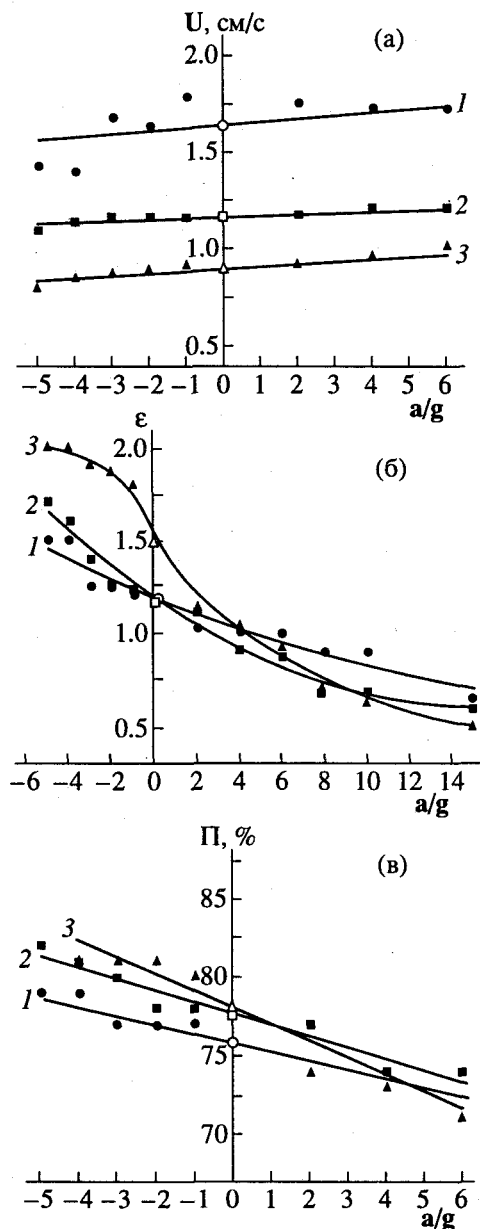


Рис. 2. Влияние перегрузки  $n$  на среднюю линейную скорость горения (а), относительное удлинение (б) и пористость (в) таблетки. Добавки: 1 - Ni + Al; 2 - Ni; 3 - Al; O, □, Δ - интерполяционные точки.

горения. Масса фрагментов и их количество зависят от величины перегрузки и вида добавки. Отрыв фрагментов происходит за фронтом горения и не приводит к изменению характера и скорости горения.

Очевидно, что способность к деформации исходный образец приобретает в волне горения, где происходят образование жидких фаз и газификация буры. Причем деформация протекает под действием двух сил, возникающих при фильтрации газов и воздействии перегрузки. Направления этих сил совпадают при отрицательной пере-

грузке и противоположны при положительной перегрузке.

В табл. 2 приведены данные по параметрам оторванных фрагментов образцов. Эти данные позволяют сделать грубую оценку предела прочности на разрыв горящих образцов по формуле

$$\sigma = \frac{mng}{S},$$

где  $m$  - масса оторванного фрагмента,  $S$  - площадь поперечного сечения образца. Оценки показывают, что  $\sigma = 520$  Па (в случае добавки никеля),  $\sigma = 700$  Па (алюминия),  $\sigma = 280$  Па (никель с алюминием).

При оценке верхнее и нижнее значение  $mng$  отбрасывали, а оставшиеся значения усредняли.

Главный результат сообщения - получение интерполяционных данных. Их значения отмечены на рис. 2 и будут проверены при проведении микрогравитационных экспериментов.

В данном сообщении сделана удачная попытка проверить интерполяционные данные в лабораторных условиях. С этой целью был проведен эксперимент (табл. 3) с ортогональным направлением векторов  $U$  и  $g$  (горизонтально расположенный образец в исследовательском блоке центрифуги при отсутствии вращения). Полагалось, что в этом случае гравитационные сжимающие и растягивающие напряжения в зоне горения из-за малости диаметра образца отсутствуют.

В заключение подчеркиваем, что в данном сообщении не ставились задачи исследования пористой структуры и свойств продуктов горения, а также получения материалов с максимальной пористостью.

Работа выполнена в рамках проекта № 920/13-5208/95 программы сотрудничества РКА - НАСА и проекта Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-03-32629а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержанов А.Г., Боровинская И.П. // ДАН. 1972. Т. 204. № 2. С. 366-369.
2. Merzhanov A.G., Yukhvid V.I. // Proc. I US-Japanese Workshop on Combustion Synthesis, Tokyo, Japan, 1990. P. 1-22.
3. Штейнберг А.С., Щербаков В.А., Мартынов В.В. и др. // ДАН. 1991. Т. 318. № 2. С. 337-341.
4. Merzhanov A.G. // Proc. III Intern. Microgravity Combustion Workshop. Cleveland (Ohio), 1995. P. 159-164.
5. Merzhanov A.G. // Proc. II Europ. Symp. Fluids in Space. Naples, 1996. P. 19.