

САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ (СВС) ТУГОПЛАВКИХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

А.Г. МЕРЖАНОВ, академик РАН; **А.С. РОГАЧЕВ**, д-р физ.-мат. наук; **В.Н. САНИН**, канд. техн. наук; **А.С. СЫЧЕВ**, канд. техн. наук; **В.А. ЩЕРБАКОВ**, д-р физ.-мат. наук; **В.И. ЮХВИД**, д-р техн. наук, проф.

Исследования, проведенные в центробежных установках при повышенных перегрузках, выявили сильное влияние гравитации на все стадии СВС-процесса: горение, формирование химического и фазового составов, макро- и микроструктуры продуктов синтеза. Первое исследование влияния невесомости (микрогравитации, $a = 10^{-2} g$) на СВС-процесс было осуществлено в условиях полета самолета по параболической траектории на примере горения элементной системы $Ti + C + \text{бура}$.

В дальнейшем круг СВС-систем, изученных в условиях микрогравитации, был существенно расширен. До недавнего времени для исследования влияния микрогравитации на СВС-процессы использовали самолеты, шахты и ракеты. Однако ограниченное время состояния микрогравитации препятствовало изучению таких длительных процессов, как формирование фазового состава и микроструктуры продуктов в СВС-процессах. Впервые это ограничение было снято в исследованиях, проведенных авторами настоящей статьи на космической станции «Мир».

В экспериментах по выявлению влияния гравитации и микрогравитации на СВС-процессы были исследованы элементные системы ($Ti+C$, $Ni+Al$, $Ti+C+Ni$, $Ti+C+Ni+Al$ и др.) с плавящимися исходными и промежуточными компонентами, а также системы термитного типа ($NiO+Al$, $NiO+Ni+Al$ и др.) с плавящимися исходными и конечными продуктами горения. Для сопоставления результатов экспериментов проводили в лабораторных условиях при есте-

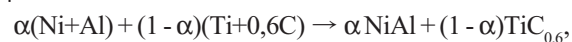
ственной гравитации, высокой искусственной гравитации (на центробежных установках при перегрузках $a = 1 - 1000 g$) и в условиях микрогравитации на космической станции «Мир» ($a = 10^{-2} g$).

ЛАБОРАТОРНЫЕ НАЗЕМНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

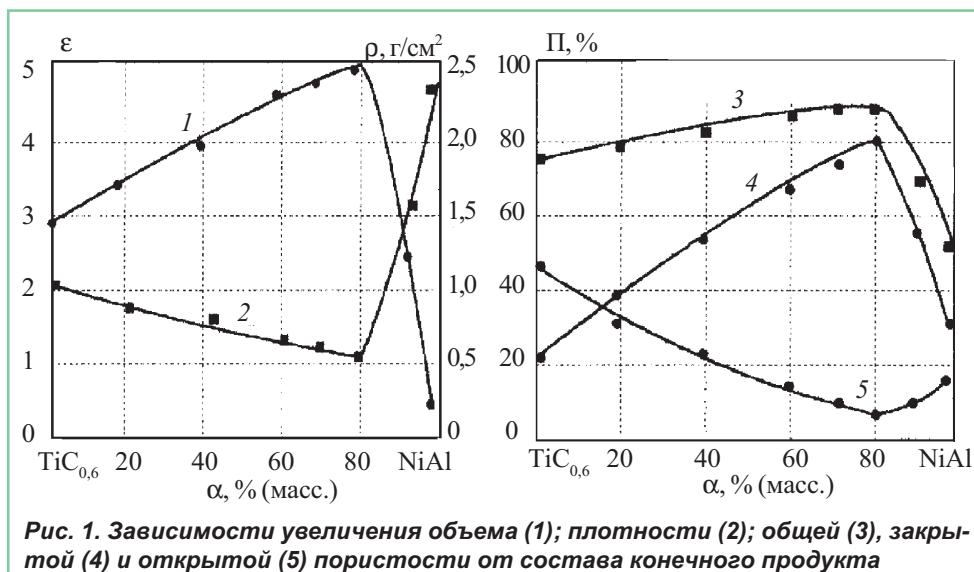
Формирование пористости

под влиянием естественной гравитации

Реакционные смеси готовили с использованием порошков титана (ПТМ), никеля (ПНК-1), алюминия (АСД-4) и сажи (Т804). Состав исходной смеси рассчитывали исходя из следующего уравнения химической реакции:



т.е. в расчете на образование двух продуктов: $TiC_{0,6}$ и $NiAl$. В качестве газифицирующей добавки в смесь вводили тетраборат натрия (бура, $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) с температурой разложения $800^\circ C$. В проведенных экспериментах варьировали: состав реакционной смеси (величину α), содержание газифицирующей до-



бавки, плотность исходного образца и его положение относительно вертикальной оси.

На рис. 1 представлены зависимости увеличения объема (кривая 1) и плотности (кривая 2) конечного продукта от состава реакционной смеси. Видно, что при горении смесей $Ti+0,6C$ и $Ni+Al$ (крайние точки), содержащих 1% газифицирующей добавки, объем конечного продукта увеличивается в первом случае в 3 раза, а во втором – только на 30 - 40%. Плотность пористого образца из карбида титана – $1,0 \text{ г/см}^3$, а алюминида никеля – $2,5 \text{ г/см}^3$. Общая пористость конечных продуктов составляет 75 и 55% соответственно.

В процессе синтеза образуется двухфазный конечный продукт, содержащий $TiC_{0,6}$ и $NiAl$. При оптимальном содержании алюминида никеля – 80% (масс.) – достигается наибольшее увеличение объема ($\epsilon = 5$), а плотность конечного продукта составляет всего $0,58 - 0,6 \text{ г/см}^3$. При этом общая пористость составляет 90%, закрытая – 80%, открытая – 10%. Средний диаметр сферических пор 2 – 3 мм. Отдельные макропоры имеют диаметр 5 – 6 мм. Толщина стенок 0,1 – 0,15 мм.

Максимальное содержание закрытых макропор при массовом соотношении $TiC_{0,6}:NiAl = 1:4$ (см. рис. 1, кривая 4), по-видимому, связано с немонотонным изменением доли жидкой фазы в конечном продукте. Рентгенофазовый анализ показал, что конечный продукт содержит нестехиометрический карбид титана $TiC_{0,6}$ и алюминид никеля $NiAl$. Различие в кристаллических структурах этих соединений предполагает образование эвтектики, состав которой смещен в сторону более легкоплавкого соединения – $NiAl$.

Микроструктуры порового пространства конечных образцов из $TiC_{0,6}$ и $NiAl$ имеют качественное различие. Образец из карбида титана содержит, в основном, открытые макропоры, образованные пластинками толщиной 0,2 - 0,3 мм. Среднее расстояние между пластинками (характерный размер макропор) составляет 1,5 - 2 мм. Алюминид никеля содержит замкнутые поры сферической формы диаметром 0,1 - 0,2 мм.

Геометрические размеры образца зависят от содержания открытых и закрытых макропор. При горении смеси $Ti+0,6C$ образуются, в основном, открытые макропоры. Это приводит к тому, что примесный газ не оказывает расширяющего действия в радиальном направлении, поэтому диаметр образца не изменяется – растет только длина. При синтезе металлокера-

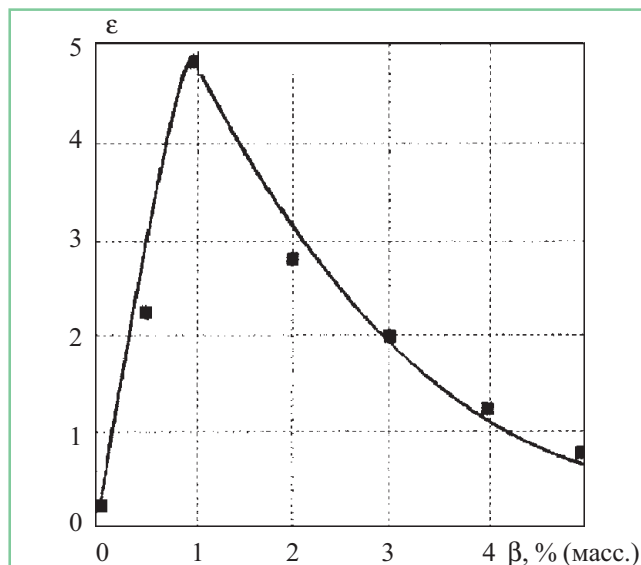


Рис. 2. Зависимость увеличения объема металлокерамического пеноматериала от массового содержания газифицирующей добавки в реакционной смеси

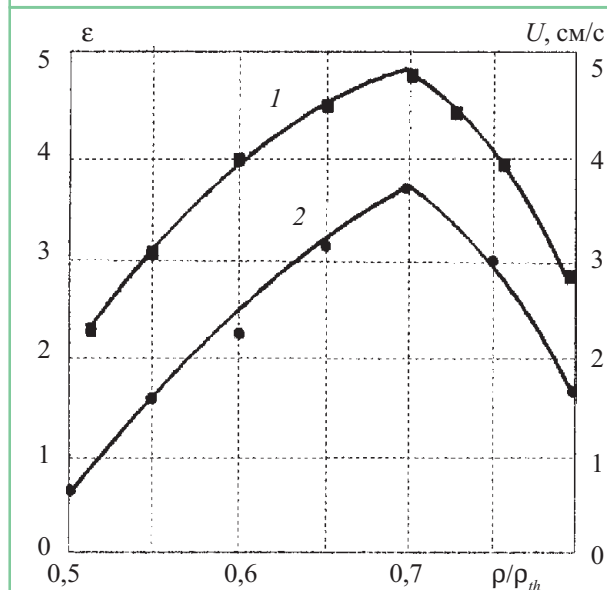


Рис. 3. Зависимости увеличения объема конечного продукта (1) и скорости горения (2) от относительной плотности шихтовой заготовки

мической пены образуются закрытые макропоры. В этом случае образец расширяется как в осевом, так и в радиальном направлении. Диаметр образца в ходе горения увеличивается на 40 - 50%.

Физико-механические характеристики пористых материалов в значительной степени зависят от структуры порового пространства. Пористый карбид титана обладает анизотропными свойствами: предел прочно-

сти при сжатии в осевом направлении $1,1 - 1,5 \cdot 10^{-3}$ МПа, а в радиальном $5,5 - 7,1 \cdot 10^{-3}$ МПа. Керамический пеноматериал проявляет однородные свойства. В осевом и радиальном направлениях предел прочности при сжатии составляет $7,9 - 11,8 \cdot 10^{-2}$ МПа.

Зависимость увеличения объема конечного продукта от содержания в шихте газифицирующей добавки представлена на рис. 2. Видно, что наибольшее увеличение объема происходит при введении в шихту 1% (масс.) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. При концентрации добавки менее 1% эффект ослабевает из-за низкого давления примесных газов в порах конечного продукта, а при концентрации более 1% – возможно, из-за уменьшения деформируемости материала.

На рис.3 представлены зависимости изменения объема конечного продукта (кривая 1) и скорости горения (кривая 2) от относительной плотности исходного образца.

При изменении плотности исходного образца от 0,5 до 0,75 ϵ увеличивается от 2 до 5, а U – от 0,5 до 3,4 см/с. Дальнейшее увеличение плотности шихтовой заготовки приводит к уменьшению объема конечного продукта.

Влияние скорости горения на объем конечного продукта связано с потерями примесного газа из образца. Они происходят как в зоне прогрева, где отсутствует жидкая фаза, так и в зоне реагирования до образования сплошного слоя жидкой фазы. С увеличением скорости горения примесный газ, выделившийся в зоне прогрева, не успевает покинуть образец. Он попадает в зону реагирования, повышая давление газа в пластичном продукте горения. Кроме того, при высокой скорости горения происходит быстрое образование сплошного слоя жидкой фазы, содержащей замкнутые макропоры. Оба процесса приводят к уменьшению потерь примесного газа и усилению эффекта пенообразования.

При синтезе металлокерамического пеноматериала, содержащего карбид титана и алюминид никеля, конечный продукт плавится. Время существования расплава зависит от темпа охлаждения образца. Оно значительно увеличивается в случае плавления конечного продукта. Увеличение количества жидкой фазы и времени ее существования приводит к формированию замкнутых пор сферической формы.

Таким образом, в условиях естественной гравитации получен металлокерамический пеноматериал (с пористостью до 90%).

Эксперименты в центробежных установках. Интерполяционная методика микрогравитационных эффектов

Для фронтальных процессов можно создавать не только положительные (сжимающие), но и отрицательные (растягивающие) перегрузки. Такой подход позволяет свести экстраполяционную задачу (на условия невесомости) к интерполяционной. Для этого необходимо получить 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 экстраполяцией. В данной работе эта идея реализована экспериментально.

Эксперименты по выявлению влияния искусственной гравитации на СВС-процессы проводили в центрифугах, развивающих перегрузки $n = 50 - 1000$. Для решения интерполяционной задачи была создана центрифуга, обеспечивающая более близкий к невесомости интервал перегрузок ($n = 2 - 15$). Установка состоит из роторной системы 1, вращающегося плеча 2 (длиной 2 м), исследовательских блоков 3 (или блока с противовесом) и видеокамер 4 (рис. 4).

Таблица 1

Параметры СВС-процесса и характеристики пористого конечного продукта

Химическая система	Направление вектора скорости горения	Увеличение объема, ϵ	Плотность конечного продукта, ρ , г/см ³	Структура конечного продукта
Ti+0,6C	вниз	3,5-4	0,39-0,48	неоднородная
Ti+0,6C	горизонтально	4,8-5,2	0,34-0,36	однородная
Ti+0,6C	вверх	5,7-6,0	0,29-0,30	разрушение
Ti+0,6C+Ni+Al	вниз	2,5-3,3	1,25-0,88	неоднородная
Ti+0,6C+Ni+Al	горизонтально	4,0-5,0	0,64-0,58	однородная
Ti+0,6C+Ni+Al	вверх	5,3-5,6	0,56-0,53	разрушение

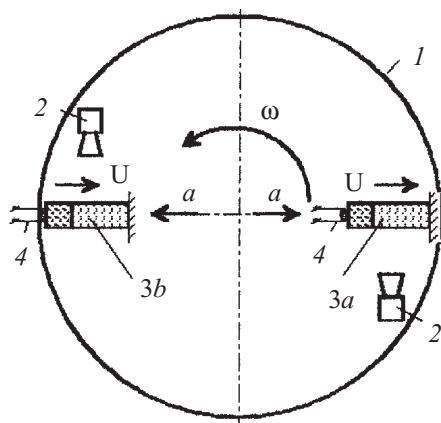


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – центрифуга; 2 – видеокамера; 3 – образцы, горящие при положительной (а) и отрицательной (б) перегрузках; 4 – поджигающая электрическая спираль

Таблица 2

**Характеристики исходных образцов
и составов продуктов синтеза**

Состав добавок	Начальная высота таблеток, см	Начальная пористость таблеток, %	Фазовый состав продуктов горения
Ni	2,05	51	TiC _x , Ni ₃ Ti
Ni+Al	2,13	48	TiC _x , Ni ₂ Al ₃ , TiAl
Al	2,17	44	TiC _x , Al, TiAl

Таблица 3

Параметры оторванных фрагментов образцов

-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	-

Для исследования была выбрана система Ti+0,8C, в которую вводили добавки: 15% (масс.) Ni или Al, или Ni+Al и 2% (масс.) Na₂B₄O₇·10H₂O (бура).

Эксперименты, проведенные в условиях положительной гравитации ($n = 1$), показали, что система Ti+0,8C с металлическими добавками горит стационарно, с малыми изменениями объема образца и является удобной моделью для исследований. Введение газифицирующихся добавок буры в небольших количествах приводит к удлинению образцов за счет порообразования в продуктах горения. Векторный эффект проявляется в изменении скорости горения (слабо), удлинении образцов при горении и увеличении пористости конечного продукта (сильно) (табл.1).

В экспериментах сжигали прессованные цилиндрические образцы диаметром 8,5 мм, массой 3 г и плотностью 2,4 – 2,6 г/см³ (характеристики исходных образцов и составов продуктов синтеза приведены в табл. 2) и измеряли скорость горения (по перемещению движущегося светящегося фронта), относительное изменение длины и конечную пористость образца.

Относительное удлинение определяли после завершения горения в остывших образцах: $\varepsilon = (L_k - L_0)/L_0$, где L_0 и L_k соответственно начальная и конечная длина образца. Диаметр образцов практически не меняется. Конечную пористость рассчитывали по формуле

$$\Pi_k = 1 - \rho_k / \rho_{\Pi},$$

где ρ_k – плотность конечного образца; ρ_{Π} – пикнометрическая плотность конечного продукта (экспериментальная).

Результаты эксперимента в центрифуге приведены на рис.5.

Анализ экспериментальных данных позволяет установить следующее:

- в исследуемом интервале ($-5 < n < 6$) горение стационарно – мгновенная скорость горения постоянная по длине образца;
- при переходе из области положительных перегрузок в область отрицательных U уменьшается, а ε и Π_k увеличиваются;
- наибольшее значение U наблюдается для добавки Ni+Al.

Влияние природы добавок на зависимость ε и Π_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 ($n < 0$) оказывает противоположное воздействие.

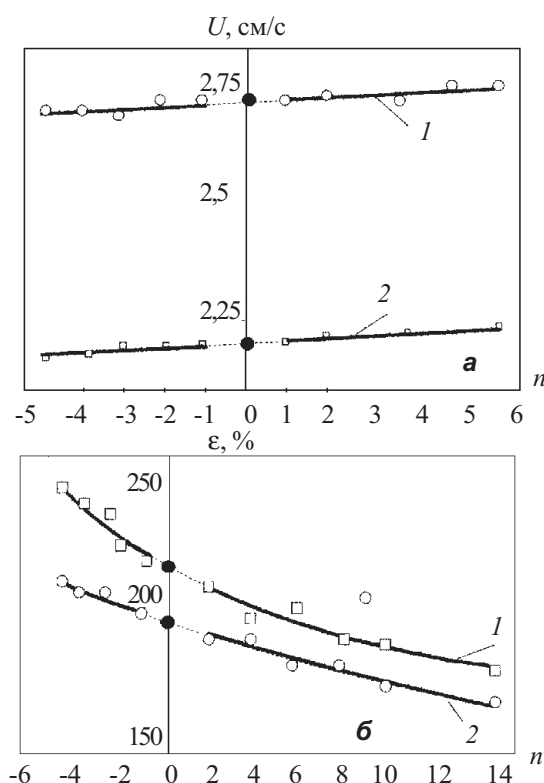


Рис. 5. Влияние перегрузки n на среднюю линейную скорость горения (а) и относительное удлинение (б) системы: 1 – $Ti + 0,8C$; 2 – $(Ti + 0,8C) + 15\% Ni$; • – интерполяционные точки

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

В табл.3 приведены данные по параметрам оторванных фрагментов образцов. Эти данные позволяют сделать грубую оценку предела прочности на разрыв горящих образцов по формуле

$$\sigma = mng/S,$$

где m – масса оторванного фрагмента; S – площадь поперечного сечения образца. Оценки показывают, что $\sigma = 520, 700, 280$ Па соответственно в случаях добавки никеля, алюминия и никеля с алюминием.

Главный результат работы – получение интерполяционных данных. Их значения, отмеченные на рис.5, были проверены при проведении микрогравитационных экспериментов.

КОСМИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Основная серия экспериментов по реализации горения в условиях микрогравитации на станции «Мир»

и сравнительные наземные эксперименты проведены на установке «Оптизон», разработанной в НИИ «Научный центр» для проведения зонной плавки в невесомости.

Влияние микрогравитации на формирование пористости. Проверка интерполяционной методики

Эксперименты на установке «Оптизон» проводили при давлении воздуха 0,4 атм. Для синтеза использовали смеси $Ti+C$ и $Ti+C+Ni$. После перемешивания исходные смеси прессовали в таблетки диаметром 8,5 мм и высотой 20 мм. Таблетки помещали в кварцевые стаканчики диаметром 13 мм и высотой 80 мм. После экспериментов на станции «Мир» образцы были доставлены на Землю для исследований. Результаты сопоставительного анализа представлены в табл. 4 и 5. Видно, что результаты экспериментов, проведенных на станции «Мир», и полученные в лаборатории с использованием интерполяционной методики хорошо совпадают. Однако микроструктуры космических и земных образцов заметно различаются: космические образцы формируются в виде пены, а земные образцы имеют вид сросшихся зерен с четкой огранкой. Также сильно различаются распределения пористости по высоте образцов (рис. 6).

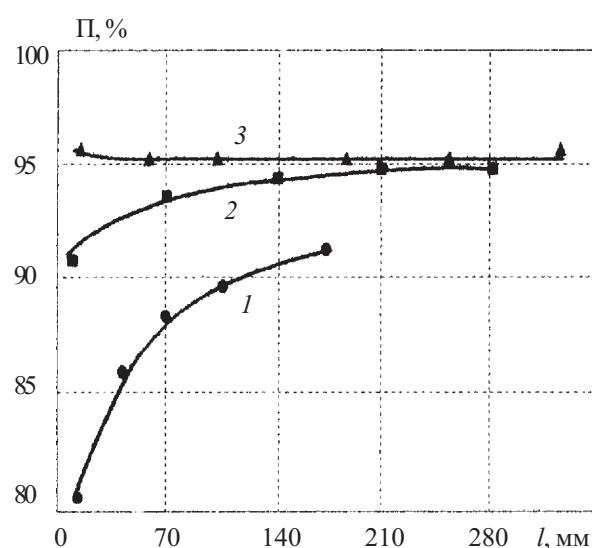


Рис. 6. Распределение пористости по длине образца, полученного в лабораторных условиях при горении в вертикальном (1), горизонтальном (2) положениях и в условиях микрогравитации (3)

Таблица 4

Сопоставление интерполяционных и космических результатов для системы Ti+0,8C

СВС-параметры	Экспериментальные условия	
	Интерполяционные значения	Значения, полученные на станции «Мир»
Скорость горения, см/с	2,7	2,6
Относительное удлинение, %	1,2	1,3
Химический состав, % (масс.)	С _{общ.} – 16,6 С _{общ.} – 0,33 Ti – остальное	С _{общ.} – 16,5 С _{общ.} – 0,3 Ti – остальное
Фазовый состав	TiC _x	TiC _x

Таблица 5

Сопоставление интерполяционных и космических результатов для системы Ti+0,8C+15%Ni

СВС-параметры	Экспериментальные условия	
	Интерполяционные значения	Значения, полученные на станции «Мир»
Скорость горения, см/с	2,2	2,3
Относительное удлинение, %	0,9	0,95
Химический состав, % (масс.)	С _{общ.} – 14,0 С _{общ.} – 0,1 Ni – 15 Ti – остальное	С _{общ.} – 14,6 С _{общ.} – 0,1 Ni – 15 Ti – остальное
Фазовый состав	TiC _x , Ni ₃ Ti	TiC _x , Ni ₃ Ti

Таблица 6

Влияние микрогравитации на потери вещества при горении и характеристики фазоразделения

Параметры	Условия проведения экспериментов		
	$a = 10^{-2} g$	$a = 1g$	Различные значения
Начальная масса таблетки, г	4,5	4,5	4,5
Конечная масса продукта, г	4,0	3,9	4,5
Конечная масса металлической фазы, г	3,43	3,30	3,73
Конечная масса оксидной фазы, г	0,57	0,60	0,77
Глубина диспергирования, % (масс.)	11	13	-
Полнота выхода металла, % (масс.)	92	88	100
Полнота выхода оксида, % (масс.)	74	78	100

Реализация жидкого пламени в космосе

В предварительных исследованиях на Земле был проведен поиск исходной системы для реализации жидкого пламени в условиях микрогравитации. По результатам термодинамического анализа и экспериментов в качестве модельной была выбрана система, состоящая из 60% термитной системы $3NiO+5Al$ и 40% элементной смеси $Ni+Al$. Брутто-схема химического превращения этой смеси имеет вид



Модельная смесь удовлетворяет основным требованиям космического жидкопламенного эксперимента:

- ◆ при горении достигается высокая температура (2650 K), при которой все конденсированные вещества (исходные, промежуточные и конечные) находятся в жидкофазном состоянии, а концентрация газообразных продуктов (паров и субоксидов) мала;
- ◆ горение смеси происходит в стационарном режиме с невысокой скоростью ($\sim 0,5$ см/с), потери вещества в результате диспергирования расплава не превышают 1%, а продукты горения (оксид алюминия и алюминид никеля) имеют литой вид с четким разделением слоев.

Для синтеза использовали порошки NiO , Ni и Al с размером частиц менее 10 мкм. После перемешивания исходные смеси прессовали в таблетки массой 4,5 г, диаметром 8,5 мм и высотой 20 мм. Таблетки помещали в кварцевые стаканчики диаметром 13 мм и высотой 80 мм. Визуальный анализ продуктов горения выявил, что и в условиях микрогравитации, и в земных условиях произошло разделение металлической и оксидной фаз. В обоих случаях продукты горения имеют литой вид. Из сопоставления характеристик продуктов горения в микрогравитационных и естественных земных условиях следует, что они мало различаются (табл. 6).

Рентгенофазовый анализ показал идентичность продуктов горения, полученных на станции «Мир» и в земных условиях. В обоих случаях металлическая фаза представляет собой алюминид никеля ($NiAl$) с ОЦК решеткой, а оксидная фаза является оксидом алюминия с решеткой корунда. Таким образом, можно сделать вывод, что гравитация слабо влияет на процессы диспергирования, формирования химического и фазового составов продуктов горения, а также

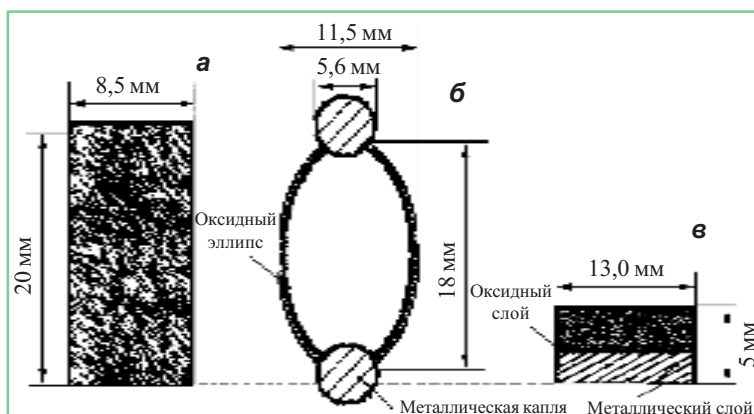


Рис. 7. Макроструктуры образцов: а – исходного; б и в – полученных в космическом и наземном экспериментах соответственно

на полноту фазоразделения металлической и оксидной фаз.

В условиях микрогравитации оксидная фаза формируется в виде тонкостенной оболочки (вытянутого сфероида), на полюсах которого располагаются металлические глобулы сферической формы примерно равной массы ($m \sim 1,5$ г) (рис. 7, б). Более мелкие металлические сферические частицы ($m \sim 0,2 - 0,3$ г) были обнаружены в кварцевом стаканчике. Общая высота конструкции примерно равна высоте исходной таблетки. Полученные в земных условиях продукты горения имели вид двух плотных цилиндрических слоев с четким разделением металлического и оксидного слоев (рис. 7, в). Общая высота слоев в 4 раза меньше высоты исходного образца, а диаметр слоев равен диаметру кварцевого стаканчика.

Кроме того, было выявлено заметное различие микроструктур внешней и внутренней поверхностей оксидной фазы продуктов горения (оболочки) в условиях микрогравитации (рис. 8, а, б). Так, на внутрен-

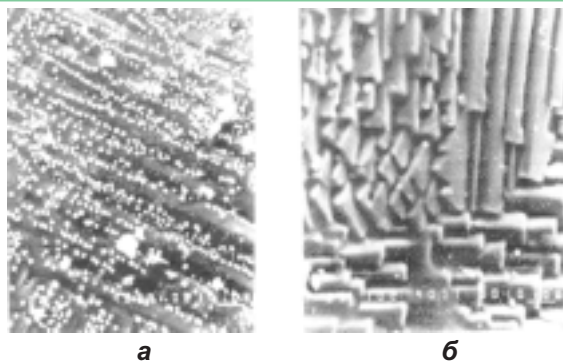


Рис. 8. Микроструктура литых продуктов горения в условиях микрогравитации: а – космические; б – земные эксперименты (x 400)

ней поверхности оксидной сферы было обнаружено чередование металлических и оксидных полос, причем металлические полосы имеют дискретное строение. Металлические частицы, из которых формируются ряды, имеют грибовидную форму, содержат Ni и Al (рис. 9) и, по данным рентгеновского анализа, являются интерметаллидами (NiAl). На внешней поверхности металлические «ряды» отсутствуют, и большая часть ее – зеркально-гладкая. Анализ сечения оксидной пленки выявил множество каналов округлого сечения, выходящих во внутреннюю полость сферы. На поверхности земных образцов металличе-

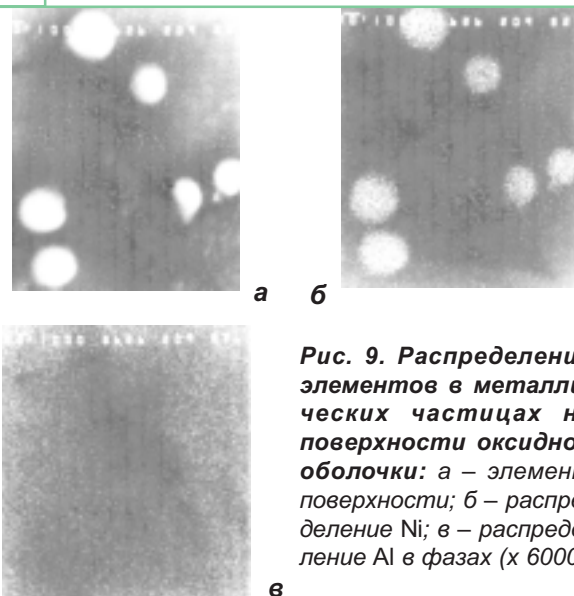
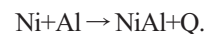


Рис. 9. Распределение элементов в металлических частицах на поверхности оксидной оболочки: а – элемент поверхности; б – распределение Ni; в – распределение Al в фазах (x 6000)

ские частицы практически отсутствуют, а поверхность имеет ярко выраженный рельеф.

Реализация бесконтактного горения в космосе

В качестве реагентов использовали частицы Al сферической формы, покрытые слоем никеля (характерный размер плакированных частиц 100 - 150 мкм) (рис. 10). Толщина покрытия была выбрана такой, чтобы в каждой плакированной частице соотношение Ni/Al было эквиатомным, что соответствует оптимальному составу смеси. Это обеспечивало протекание хорошо изученной простейшей СВС-реакции с образованием моноалюминиды никеля:



Плакированные порошки были удобными для экспериментов благодаря надежному контакту реагентов

(никеля и алюминия) независимо от расстояния между частицами.

Изучали два типа образцов, изготовленных в лабораторных условиях:

- спрессованные из плакированного порошка цилиндрические образцы с плотностью $3,45 \text{ г/см}^3$ и пористостью 32%;
- насыпные с плотностью $2,37 \text{ г/см}^3$ и пористостью 53% (при нормальной силе тяжести).

В последнем случае порошок помещали в вакуумированную кварцевую ампулу, причем отношение пустого объема (поры + свободная полость ампулы) к объему частиц в ампуле составляло 70/30. Газовыделение в процессе реакции незначительное, так как оба реагента (никель и алюминий) находятся в конденсированном (твердом или жидком) состоянии. Равновесное давление паров алюминия в

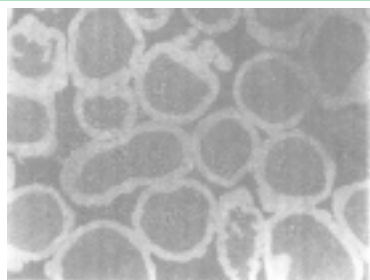


Рис. 10. Микроструктура исходных плакированных частиц: светлый ободок – Al, темная сердцевина – Ni

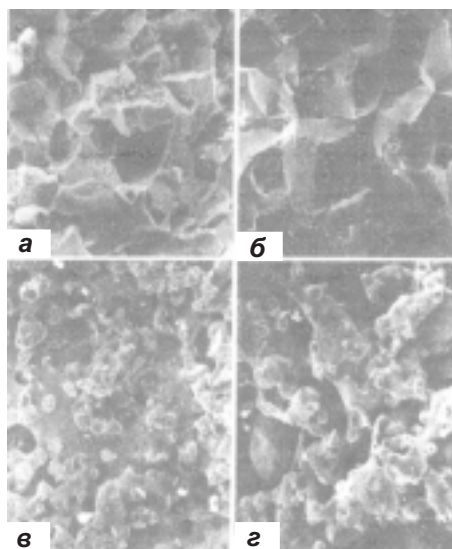


Рис. 11. Микроструктуры изломов продуктов горения: прессованного образца на Земле (а) и на ОС "Мир" (б); образца с насыпной плотностью на Земле (в) и на ОС "Мир" (г)

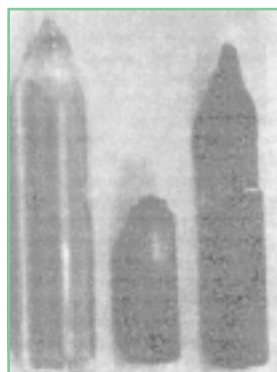


Рис. 12. Насыпные образцы после земного и космического экспериментов, кварцевая ампула в исходном состоянии

условиях синтеза составляло 266 Па при температуре горения 1640°C . Измерение примесного газоразделения (в основном, пары воды) в земных условиях в аналогичной ампуле показало, что оно не превышает $0,00019 \text{ моль/г}$.

Прессованные образцы, сгоревшие на Земле и в космосе, сохранили свою цилиндрическую форму и размеры. Поверхность космического образца более гладкая, обладает зеркальным металлическим блеском, и на ней отсутствуют трещины и раковины, которые наблюдаются на земном образце. В верхней части образцов, где происходило зажигание, образовались капли расплава, очевидно, вследствие избытка тепла, принесенного поджигающим лучистым потоком. В невесомости несколько круглых капель диаметром 1 – 3 мм оторвались от верхнего края образца. По данным электронно-зондового и рентгеноструктурного анализов, химический и фазовый составы земного и космического образцов идентичны и соответствуют конечной фазе продукта NiAl. Дифракционные пики на рентгенограмме космического образца оказались более узкими (~ в 1,5 раза) по сравнению с земным, что говорит о более совершенной кристаллической структуре. Как видно из представленных на рис. 11, а, б микроструктур изломов, в невесомости образовались более крупные зерна алюминидов никеля. В космическом образце преобладает межзеренный излом, в то время как в земном велика доля хрупкого внутризеренного излома, о чем свидетельствуют характерные ручьи-структуры на фрактограмме. Структура образца, полученного в космосе, более однородна, в ней меньше доля крупных анизотропных пор, при этом открытая пористость выше у земного образца, а закрытая – у космического.

Таким образом, влияние невесомости на процесс структурообразования проявляется в формировании более крупных и совершенных кристаллов.

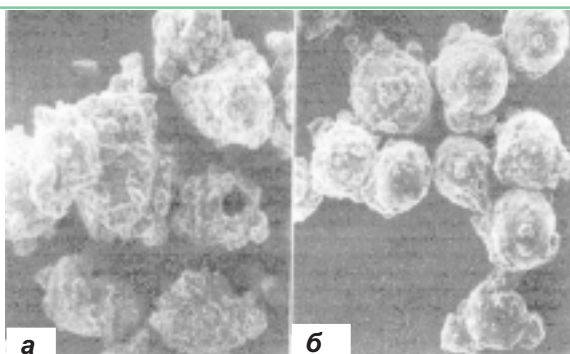


Рис. 13. Микроструктура земного (а) и космического (б) образцов

Насыпные образцы после земного и космического экспериментов, а также кварцевая ампула в исходном состоянии показаны на рис.12. В условиях нормальной силы тяжести насыпной слой порошка сгорел без изменения объема: не наблюдалось ни расширения слоя, ни его усадки. Продукт горения, образовавшийся в условиях невесомости, гораздо более пористый (плотность $1,51 \text{ г/см}^3$, пористость 70%) и имеет форму внутреннего объема ампулы. В обоих случаях продукт состоит из NiAl.

На рис. 13, а, б показаны микроструктуры образцов. Основной структурной составляющей земного образца являются оплавленные глобулы неправильной формы, образующие пористый пространственный каркас. В случае космического образца этот каркас более ажурный, связь между глобулами слабая, при надавливании кусочки образца легко растираются в порошок.

Расширение при горении насыпного порошка отсутствует, и поэтому можно утверждать, что в невесомости еще до начала горения частицы равномерно заполнили весь объем ампулы, образовав устойчивое облако (типа газозвеси, но без газа – в вакууме). Это подтверждают и непосредственные визуальные наблюдения летчика-космонавта А.Я.Соловьева. Частицы в облаке медленно движутся относительно друг друга, иногда сталкиваясь между собой.

Можно было бы ожидать, что частицы после сгорания сохраняют свою индивидуальность и после возвращения ампулы на Землю в гравитационные условия образуют порошкообразный слой продукта – моноалюминид титана. Однако в нашем случае продукт горения имеет скелетную (каркасную) высокопористую связную структуру. Это объясняется особенностями

горения плакированных частиц Ni-Al. В результате того что алюминий плавится при более низкой температуре, чем никель, разрывая никелевую оболочку и вытекая наружу, частицы приобретают сложную «разлапистую» форму с отростками, которые пересекаются с отростками других частиц и образуют пространственный скелет.

Механизм передачи тепла от сгоревших частиц к исходным, обеспечивающий автоволновой процесс, может быть связан как с излучением, так и с контактной теплопроводностью при столкновениях частиц, и подлежит детальному изучению. Описанный результат, полученный в условиях невесомости на борту станции «Мир», имеет большое теоретическое и практическое значение.

Во-первых, удалось осуществить СВС-процесс в первоначально не контактирующей системе частиц («бесконтактный» СВС). В земных условиях он осуществлен не был. Невесомость, как видно, лучший способ создания таких систем.

Во-вторых, реализован новый подход к созданию высокопористых материалов. Ранее для получения таких материалов в реакционную смесь вводили газифицирующиеся добавки или терморасширяющийся графит. В результате в зоне прогрева сильно увеличивался объем исходной реакционной смеси, и химическая реакция горения протекала по низкоплотной смеси (плотность обычно ниже насыпной). Здесь же имеет место другой механизм – образование высокопористой структуры в зоне (или в продуктах) горения. Он имеет свои достоинства (например, позволяет получать образцы-изделия заданной формы, так как облако частиц равномерно заполняет полость любой формы) и может быть конкурентоспособным.

Особый интерес представляет осуществление СВС в облаках с разнородными частицами реагентов (например, смеси порошков Al и Ni) для доказательства роли газотранспортных реакций в механизме «безгазового» горения.

Авторы благодарят В.П. Никитского (МНТЦ полезных нагрузок космических объектов) за поддержку работы и интерес к ней, летчиков-космонавтов В.В.Цибилева и А.Я.Соловьева, Т.А.Мусабаева и Н.М.Бударина за проведение СВС-экспериментов на ОС «Мир», А.И.Иванова и С.Н.Савина (РКК «Энергия»), Е.В.Маркова и В.Ю.Антропова (НИИ «Научный центр») за содействие в выполнении работы.