

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ГОРЕНИИ ТОНКИХ СЛОЕВ ВЫСОКОЭКЗОТЕРМИЧЕСКИХ СМЕСЕЙ ТЕРМИТНОГО ТИПА

*Икорников Д.М.*

*Руководитель – в.н.с., д.т.н. В.Н. Санин*

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,  
г. Черноголовка, Московская область  
den@ism.ac.ru

Температура горения высококалорийных СВС-систем термитного типа может достигать 3000...3500 К. Реализация высоких температур во фронте горения приводит к формированию литых продуктов синтеза, а также к образованию газообразных продуктов (пары Al, субокислы примесных газовыделений). После прохождения фронта горения, конденсированные продукты синтеза находятся в жидкофазном состоянии и под действием гравитационных сил осуществляется фазоразделение, в процессе которого металлическая (более “тяжелая”) фаза оседает, а окисная (более “легкая”) всплывает. После кристаллизации и остывания металлический и оксидный слои легко разделяются. Интенсивное газовыделение из расплава приводит к диспергированию (разбросу) части продуктов синтеза, что снижает эффективность выхода целевого продукта в слиток. Поэтому диспергирование в процессе СВС подавляют воздействием избыточного давления газа, центробежных сил, понижением калорийности смеси (разбавлением конечным продуктом), а также комбинацией этих приемов.

Экспериментальные исследования, горение таких систем в тонких слоях, когда не реализуется возможность образования сплошного слоя литых продуктов, позволит определить закономерность и механизмы формирования высокотемпературных дисперсных продуктов с учетом совокупности химических и физических процессов протекающих в волне горения.

Объектом настоящих исследований были выбраны 3 модельные смеси, рассчитанных на получение интерметаллидов  $Ni_3Al$ ,  $NiAl$  и  $NiAl_3$  (табл.1). Рассмотрено горение систем в тонких слоях и исследованы приемы управления процессом диспергирования для получения интерметаллидных гранулированных материалов. В качестве исходных компонентов высококалорийных смесей использовали порошки оксида никеля (II) марки «ч» и алюминия марки АСД-1. Приготовленные смеси наносили тонким слоем (0,25...3,0 мм) на графитовые или кварцевые подложки. Плотность засыпки составов в слоях, составляла 1,2...1,4 г/см<sup>3</sup>. В экспериментах варьировали высоту слоя засыпки ( $h$ ) от 0,25 до 4 мм и

степень разбавления ( $\alpha$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) инертным продуктом от 0 до 20 масс. %. Высота подложки составляла 10 мм, длина 150...200 мм, ширина 110 мм.

Процесс распространения фронта горения по образцу фиксировался на видеокамеру. После сгорания диспергированные продукты собирали и подвергали всестороннему анализу.

Таблица 1. Исследуемые составы и их расчетная температура горения

№	Химическая схема взаимодействия	Расчетная температура горения ( $T_{\text{adiabat}}$ ), К
Смесь № 1	$3\text{NiO} + 3 \text{Al} \rightarrow \text{Ni}_3\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3$	3000
Смесь № 2	$3\text{NiO} + 5 \text{Al} \rightarrow 3\text{NiAl} + \text{Al}_2\text{O}_3$	2999
Смесь № 3	$3\text{NiO} + 11 \text{Al} \rightarrow 3\text{NiAl}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	2326

Исследования показали, что горение всех трех исследуемых составов (табл. 1) протекает в стационарном режиме с постоянной скоростью и характеризуется полным плавлением продуктов реакции при всех значениях высоты слоев засыпки ( $h$ ).

Полученные зависимости скорости распространения фронта горения от  $h$  выявили, что значения скорости горения для первых двух составов являются необычно высокие ( $U = 500 \dots 600$  мм/с).

Из анализа видеоизображения полученного с камеры следует, что распространение фронта горения сопровождается возникновением конвективного двухфазного потока состоящего из горячих газов и диспергированных продуктов реакции (рис. 1). По-видимому, "высокоскоростное" горение в слоях можно объяснить наличием верхней открытой поверхности и возникновением при горении конвективного двухфазного потока, который инициирует горение и увеличивает скорость распространения фронта.



Рисунок 1.

Характерный вид распространения фронта горения по образцу.

Система:  $3\text{NiO} + 3 \text{Al} \rightarrow \text{Ni}_3\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3$

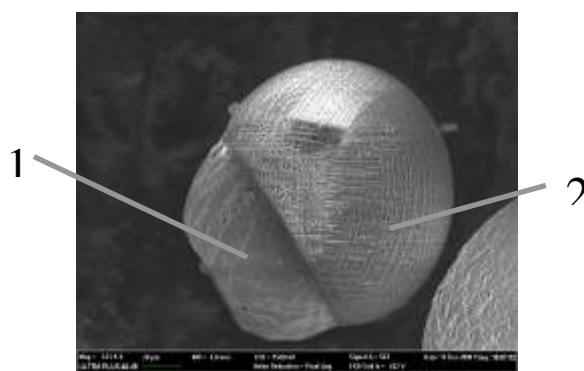


Рисунок 2.

Микрофотография диспергированной частицы.

Система:  $3\text{NiO} + 3 \text{Al} \rightarrow \text{Ni}_3\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3$   
1 – металлическая фаза и 2 – оксидная фаза

Исследование диспергированных частиц на электронном микроскопе выявило, что для первых двух систем характерным является формирование сфероподобных частиц состоящих из металлической и оксидной фазы (рис. 2) и имеющих форму желудя, где зерно формирует металлическая фаза а полусферическую оболочку – оксидная фаза.

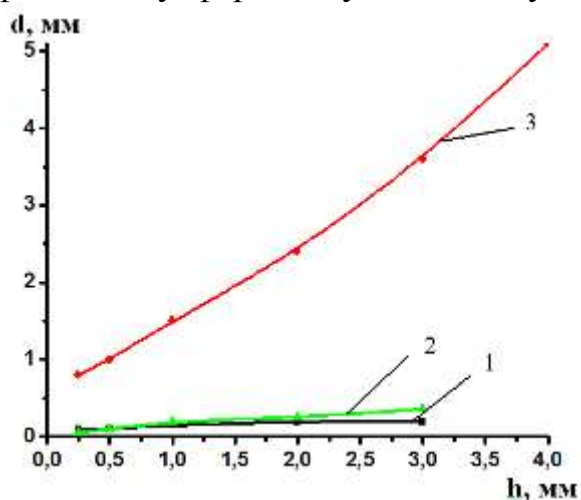


Рисунок 3. Влияние толщины слоя засыпки ( $h$ ) на диаметр ( $d$ ) формируемых диспергированных частиц:  
1, 2 и 3 номер системы согласно табл. 1

Исследование влияния высоты слоя экзотермической засыпки ( $h$ ) на диаметр ( $d$ ) формируемых частиц выявило незначительное воздействие для первых двух составов (рис. 3). Общий интервал изменений значений  $d$  составлял от 0,1 до 0,25 мм. Напротив, для слабоэкзотермического состава № 3, обнаружено сильное влияние  $h$  на  $d$ , где значения  $d$  увеличивались более чем в шесть раз (от 0,8 до 5,1 мм).

Формирование продуктов реакции для состава № 3 существенно отличалось от первых двух составов. Для данной системы характерным является формирование частиц непосредственно вблизи волны горения путем коалесценции жидких металлических и капиллярного дрейфа металлических капель. С точки зрения классических представлений это можно трактовать как вырожденный режим фазоразделения литых двухфазных продуктов горения.

Проведенные исследования выявили основные закономерности горения СВС-систем термитного типа в тонких слоях. Обнаружено, что высота засыпки, калорийность смеси являются эффективными параметрами для управления размером диспергированных частиц литых продуктов синтеза. Полученные результаты показали перспективность использования процесса диспергирования для получения литых СВС-материалов с размером частиц от 0,2 до 4 мм. В некоторых случаях это можем существенно оптимизировать процесс синтеза.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 10-03-00316.