

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. И. Итин, Ю. С. Найбороденко, А. Д. Братчиков

Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, 634021 Томск

Изучены закономерности горения композиционных металлических систем Ni–Al, Co–Al, Pd–Al, образующих интерметаллические соединения. Определены скорости, максимальные температуры и фазовый состав продуктов горения в зависимости от давления инертного газа, начальной температуры, диаметра и исходной пористости прессовок. Сделан вывод, что самораспространяющийся высокотемпературный синтез композиционных порошков более технологичен и эффективен, чем смесей элементарных порошков.

В процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) или синтеза в режиме горения интерметаллических соединений обычно используют смеси элементарных порошков [1]. Однако компоненты, отличающиеся плотностью и гранулометрическим составом, зачастую плохо смешиваются, и добиться равномерного распределения частиц одного компонента в другом, особенно при больших концентрациях компонентов, практически невозможно — в смеси всегда наблюдаются конгломераты частиц одного сорта. Такие конгломераты снижают скорость и устойчивость горения, так как образование в зоне реакции участков с избыточным содержанием одного из компонентов приводит к сильному торможению реакции с ростом глубины превращения, что нежелательно [2], особенно при использовании металлических систем в пиротехнических устройствах.

Представляет интерес изучение закономерностей горения гетерогенных композиционных материалов, в которых порошок или проволока, изготовленные из одного металла, равномерно покрыты слоем другого металла. В настоящей работе исследованы некоторые закономерности горения порошков алюминия АСД-1, покрытых никелем (Ni + 31 % Al) или кобальтом (Co + 35 % Al) методом химического осаждения*, а также закономерности горения композиционных проволок (пирофьюзов) Ni + (30 ÷ 35) % Al и Al + 12 % Pd разного диаметра, полученных протяжкой через алмазные фильтры капиллярных никелевых или палладиевых

трубок, внутри которых находится алюминиевая проволока. Составы композиционных порошков соответствуют стехиометрии интерметаллидов NiAl и CoAl.

Из композиционных порошков прессовали цилиндрические образцы диаметром 0,5 ÷ 2 см и высотой 1,7 ÷ 1,8 см с различной пористостью (η).

Образцы сжигали в бомбе постоянного давления в инертной среде. Для инициирования горения использовали таблетки из смеси порошков титана и бора (стехиометрия TiB₂), которые воспламеняли молибденовой спиралью. Скорость и максимальную температуру образцов и пирофьюзов измеряли по методике [3]. Фазовый состав конечных продуктов определяли методом рентгеноструктурного анализа.

Проведенные исследования процесса горения прессованных из композиционных порошков образцов показали, что изменение давления инертного газа в интервале $p = 13 \div 125 \cdot 10^5$ Па или диаметра образцов в интервале $d = 0,5 \div 2,0$ см практически не влияет на скорость горения (рис. 1): $u = 8,5 \div 8,9$ см/с для Ni + 31 % Al и $u = 0,8 \div 1,0$ см/с для Co + 35 % Al, что несколько ниже значений, полученных ранее для порошковых смесей [1]. При низких давлениях образцы состава Ni + 31 % Al диспергируют и распыляются, причем с понижением давления степень распыления растет. Поскольку скорость горения не зависит от давления, а потери массы образцов составляют всего 0,2 ÷ 0,3 %, можно считать, что для исследуемых составов реализуется безгазовый адиабатический режим горения, который для первого состава является стационарным, а для второго — пульсирующим.

*Метод разработан на кафедре технологии материалов и металловедения Одесского политехнического института.

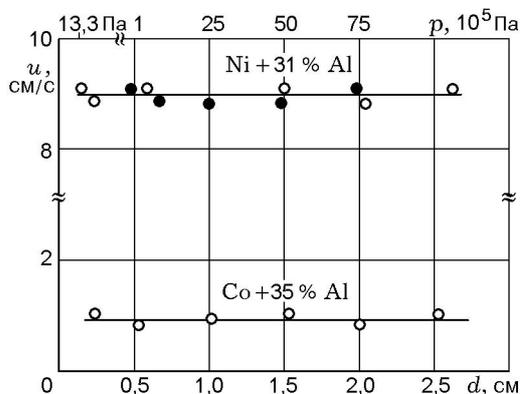


Рис. 1. Зависимость скорости горения составов Ni + 31 % Al и Co + 35 % Al от давления инертного газа и диаметра образцов ($T_0 = 25^\circ\text{C}$, $\eta \approx 40\%$)

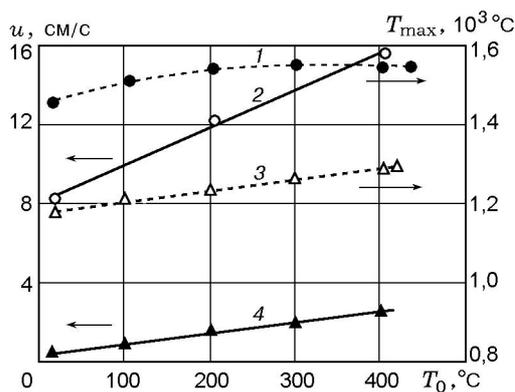


Рис. 2. Зависимость скорости (2, 4) и максимальной температуры (1, 3) горения составов Ni + 31 % Al (1, 2) и Co + 35 % Al (3, 4) от начальной температуры ($p = 2 \cdot 10^5$ Па, $\eta = 40\%$, $d = 1$ см)

С ростом начальной температуры (T_0) процесса скорость горения повышается (рис. 2). Максимальная температура горения (T_{\max}) состава Co-Al также увеличивается, а состава Ni-Al — практически не изменяется, что соответствует элементарной модели высокотемпературного плавления [2]. Некоторое снижение максимальной температуры горения композиционных порошков Ni + 31,5 % Al по сравнению с порошковыми смесями и распыление образцов в процессе горения при низких давлениях обусловлено, по-видимому, влиянием фосфора, который присутствует в порошке в силу технологических особенностей процесса плакирования частиц алюминия никелем или кобальтом. Наличие даже малого количества фосфора в плакирующей оболочке приводит к образованию жидкой

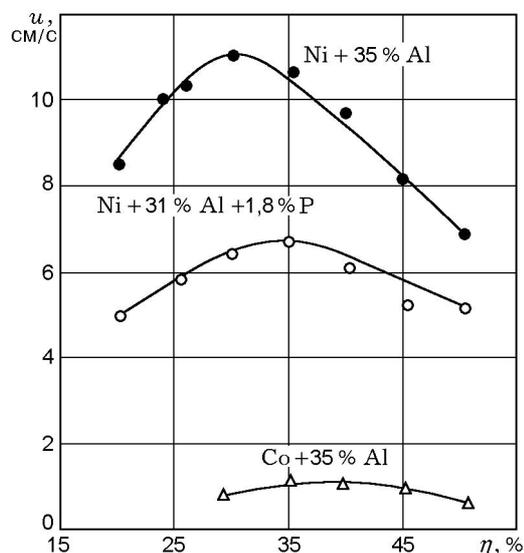


Рис. 3. Зависимость скорости горения различных составов от начальной пористости ($T_0 = 25^\circ\text{C}$, $p = 2 \cdot 10^5$ Па, $d = 1$ см)

фазы и обуславливает интенсивное взаимодействие при температурах более низких, чем точка плавления моноалюминида никеля [4].

С увеличением пористости скорость горения сначала растет, а затем падает (рис. 3). При этом характер горения композиционных порошков существенно отличается от горения порошковых смесей. Для образцов состава Ni + 31 % Al, изготовленных из композиционных порошков, стационарное горение наблюдается при всех значениях пористости, за исключением $\eta = 50\%$, при котором возникают слабые пульсации, не имеющие периодического характера. Для образцов, прессованных из порошковых смесей того же состава, горение стационарно лишь при $\eta = 40 \div 50\%$, в других случаях во фронте горения наблюдаются пульсации. Такое различие режимов горения композиционных порошков и смесей порошков связано, по-видимому, с наличием в порошковых смесях конгломератов частиц одного сорта и соответственно с повышением масштаба гетерогенности.

По мере увеличения содержания никеля (C_{Ni}) в композиционном порошке скорость горения возрастает с 3,6 см/с для состава Ni + 50 % Al до максимального значения 9,7 см/с для состава Ni + 31 % Al (рис. 4). Дальнейшее повышение концентрации никеля приводит к падению скорости горения. При $C_{\text{Ni}} = 50\%$ образцы не догорают до конца.

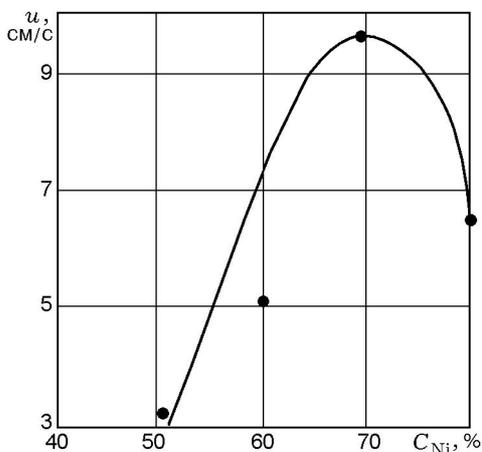


Рис. 4. Зависимость скорости горения от соотношения компонентов в системе Ni-Al ($T_0 = 25^\circ\text{C}$, $p = 2 \cdot 10^5$ Па, $d = 1$ см)

Полученные результаты качественно совпадают с данными для образцов, изготовленных из порошковой смеси.

Скорость горения пиррофьюзов значительно повышается с уменьшением диаметра (рис. 5). При этом скорость горения пиррофьюза Al + 12 % Pd велика и при $d = 100$ мкм составляет более 40 см/с. Горение пиррофьюзов является стационарным.

В ряде случаев наблюдается срыв горения тонких ($d = 120$ мкм) пиррофьюзов системы Ni-Al, связанный, по-видимому, с разрывом алюминиевой проволоки внутри капиллярной трубки при протяжке через фильтры. Во избежание этого из отдельных пиррофьюзов плели жгуты, которые догорали до конца, но с меньшей скоростью ($u = 4 \div 9$ см/с), чем отдельные пиррофьюзы.

Проведенный рентгенофазовый анализ показал, что независимо от давления инертного газа, диаметра и начальной пористости образцов, прессованных из композиционных порошков, конечный продукт горения составов Co + 35 % Al и Ni + 31 % Al состоит из моноалюминидов кобальта и никеля соответственно; для последнего обнаружена фаза Ni_3Al (следы), концентрация которой растет с увеличением содержания никеля в составе. При отклонении от стехиометрического состава в сторону уменьшения содержания никеля конечный продукт получается многофазным и содержит кроме NiAl и Ni_3Al фазы Ni_2Al_3 и $NiAl_3$. Частицы, полученные при распылении образцов состава

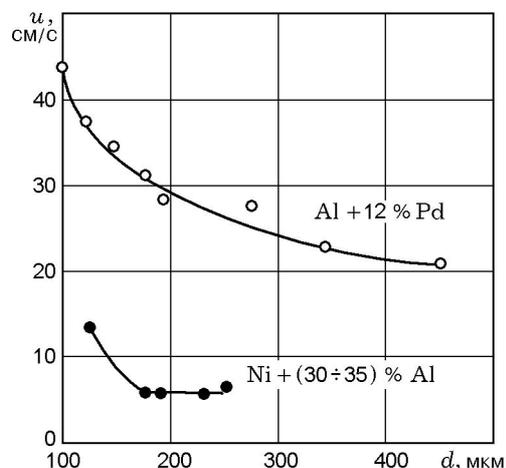


Рис. 5. Зависимость скорости горения пиррофьюзов от их диаметра ($T_0 = 25^\circ\text{C}$, $p = 2 \cdot 10^5$ Па)

Ni + 31,5 % Al в процессе горения при низких давлениях, а также фрагменты пиррофьюзов после горения также состоят в основном из моноалюминидов никеля.

Таким образом, при СВС интерметаллических соединений из композиционных металлических материалов эквимолярного состава образуются практически однофазные алюминиды никеля и кобальта, которые могут быть использованы в качестве основы материалов с высокими физико-механическими свойствами [5, 6]. Синтез соединений из композиционных материалов более технологичен и эффективен по сравнению с СВС смесей элементарных порошков, так как не требует оборудования для смешения. Композиционные металлические материалы могут быть использованы также для создания пиротехнических изделий.

ЛИТЕРАТУРА

- Итин В. И., Найбороденко Ю. С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989.
- Хайкин Б. И. К теории процессов горения в гетерогенных конденсированных средах // Процессы горения в химической технологии и металлургии / Под ред. А. Г. Мержанова. Черноголовка, 1975. С. 227-245.
- Маслов В. М., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. К вопросу о механизме безгазового горения // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 12, № 5. С. 703-709.

4. **Борисов Ю. С., Фишман С. Л.** Использование экзотермически реагирующих композиций в технологии термического напыления покрытий // Процессы горения в химической технологии и металлургии / Под ред. А. Г. Мержанова. Черноголовка, 1975. С. 150–156.
5. **Николаев А. Г., Кошеляева В. Г., Геминев В. Н. и др.** Изучение механических свойств материалов на основе NiAl, полученных методом СВС // Металлы. 1992. № 2. С. 128–134.
6. **Николаев А. Г., Фомина О. Н., Поварова К. Б. и др.** Синтез компактного моноалюминида никеля из алюминированного никелевого порошка // Журн. неорган. химии. 1993. Т. 38, № 11. С. 1780–1783.

Поступила в редакцию 24/III 2000 г.
