

характерной энергией квантов, облучающий вещество с большим потенциалом ионизации, то придется использовать осреднение не по всему спектру, а хотя бы по двум группам — «мягкой» и «жесткой», характеризующимся различным поведением $\langle \kappa \rangle$ при $T \rightarrow 0$.

Использованный метод, по-видимому, может быть применен и при решении задач об обычном горении конденсированного топлива в тех случаях, когда излучение из пламени играет существенную роль.

Поступила в редакцию
20/IX 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Анисимов, Я. А. Имас и др. Действие излучения большой мощности на металлы. М., «Наука», 1970.
2. Ю. В. Афанасьев, О. Н. Крохин. Труды ФИАН, 1970, 52, с. 118.
3. Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Г. В. Склизков. Труды ФИАН, 1970, 52, с. 171.
4. И. Ф. Жариков, И. В. Немчинов, М. А. Цикулин. ПМТФ, 1967, 1, 31.
5. Е. Г. Попов, А. А. Провалов, М. А. Цикулин. Докл. АН СССР, 1970, 194, 4, 805.
6. Ю. Н. Киселев, Б. Д. Христофоров. ФГВ, 1974, 10, 1, 116.
7. А. Е. Войтенко. Докл. АН СССР, 1964, 158, 6, с. 1278.
8. Г. Г. Виленская, И. В. Немчинов. ПМТФ, 1969, 6, 3.
9. В. И. Бергельсон, А. П. Голубь и др. Квантовая электроника, 1973, 4(16), 20.
10. Я. Т. Гноевой, А. И. Петрухин и др. Письма в ЖЭТФ, 1971, 5, 35.
11. И. В. Немчинов. Аннот. докл. на III Всес. съезде по теор. и прикл. механике. М., «Наука», 1968, 227.
12. И. В. Немчинов. В сб. Механика сплошной среды и родственные проблемы анализа. М., «Наука», 1972, с. 337.
13. И. В. Немчинов. ПММ, 1970, 34, 4, 706.
14. В. М. Кроть, И. В. Немчинов. ПМТФ, 1968, 5, 32.
15. И. В. Немчинов. ПМТФ, 1973, 3, 41.

УДК 536.46+541.412+621.762.242

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ ПОРОШКОВ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ. II. ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СМЕСЕЙ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПРОДУКТОВ И СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ

Ю. С. Найбороденко, В. И. Игин

(Томск)

Интерметаллические соединения используются в настоящее время для создания катализаторов, жаропрочных, сверхпроводящих, магнитных, режущих материалов и легирования сталей и сплавов. Для их получения в последнее время разработан весьма простой и экономичный самораспространяющийся высокотемпературный (СВ) синтез или синтез в режиме горения [1, 2]. Изучено влияние различных факторов (пористости брикетов, дисперсности компонентов, степени разбавления) на скорость и режим горения [3, 4].

В настоящей работе получены данные о влиянии концентрации исходных реагентов в смеси разнородных металлических порошков на фазовый состав продуктов и скорость горения. Эти данные очень важны для разработки оптимальной технологии производства интерметаллических соединений и материалов на их основе с помощью СВ-синтеза.

Для исследования использовались смеси порошков алюминия (АСД-1 или АСД-4) с никелем (ПНК-2 мелкозернистый), из которых прессовались цилиндрические образцы диаметром 1 и длиной 1,5—2 см с начальной пористостью 40%. Скорость горения определяли по методике [3, 4]. Состав продуктов горения изучался рентгенографическим, микрорентгеноспектральным и металлографическим методами. Состав адсорбированных на частицах порошков газов определялся с помощью масс-спектрографического анализа (измеритель парциальных давлений омегатронный типа ИПДО-1, омегатронная лампа РМО-4с). Масс-спектры снимались в режиме линейного нагрева (скорость изменения температуры составляла 7—10 град/мин) в интервале температур 20—600°C для порошков отдельных компонентов и 20—550°C для смесей порошков.

Зависимость скорости горения от соотношения компонентов в смеси представлена на рис. 1. Начиная с состава Ni—13,5 вес.% Al (стехиометрия фазы Ni₃Al) по мере увеличения содержания алюминия в исходной смеси скорость горения возрастает, достигая максимума для состава Ni—31,5 вес.% Al (стехиометрия соединения NiAl). При дальнейшем повышении концентрации алюминия до 58 вес.% (стехиометрия соединения NiAl₃) скорость горения падает. Составы, близкие к стехиометрии NiAl, горят в стационарном режиме, а смеси, близкие к Ni₃Al и NiAl₃, — в пульсирующем режиме (в некоторых случаях образцы сгорают не полностью). Для всех смесей скорость горения тем выше, чем меньше размер частиц компонентов смеси.

Данные о составе продуктов горения приведены в таблице и на рис. 2, где представлены кривые распределения интенсивности излучения никеля в продуктах горения. Для сравнения приведена структура (светлые частицы никеля, окруженные алюминием) сырого образца (рис. 3, а). Однофазные интерметаллические соединения синтезируются при горении смесей, соответствующих по составу области гомогенно-

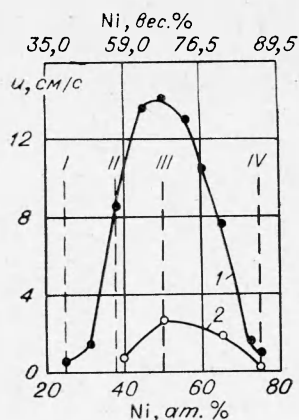


Рис. 1. Зависимость скорости горения от состава смесей.

1 — смеси Ni (ПНК-2 мелкозернистый) — Al (АСД-4), 2 — смеси Ni (ПНЭ, 63 мк) — Al (АСД-1). I — NiAl₃; II — Ni₂Al₃; III — NiAl; IV — Ni₃Al.

Весовой процент Al в исходной смеси с Ni	Режим горения	Фазовый состав продуктов горения по данным анализа		Примечание
		рентгеноструктурного	микрорентгеноспектрального	
13,5 (Ni ₃ Al)	Пульсирующий	Ni ₃ Al	Ni ₃ Al + NiAl + Ni	Основной продукт Ni ₃ Al
15	»	Ni ₃ Al	Ni ₃ Al + NiAl	
20	Стационарный	Ni ₃ Al + NiAl	Ni ₃ Al + NiAl	
23,5	»	NiAl	—	
31,5 (NiAl)	»	NiAl	NiAl	Основной продукт Ni ₂ Al ₃
36	»	NiAl	—	
42,5 (Ni ₂ Al ₃)	»	Ni ₂ Al ₃ + NiAl	Ni ₂ Al ₃ + NiAl	
50	Пульсирующий	—	Ni ₂ Al ₃ + NiAl ₃	
58	»	NiAl ₃ + Ni ₂ Al ₃	NiAl ₃ + Ni ₂ Al ₃	

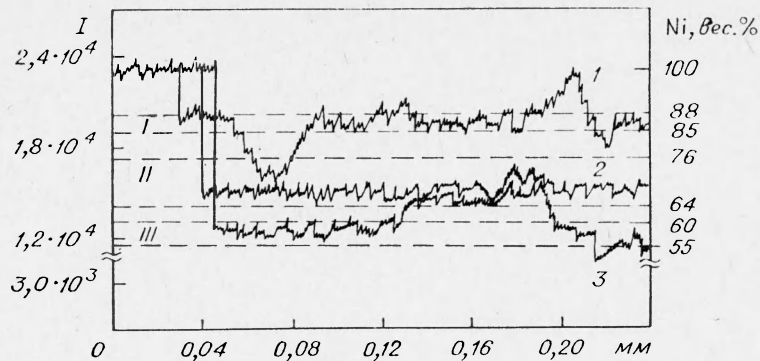


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения никеля NiK_{α} в продуктах горения (Ni — ПНК-2 мелкозернистый, Al — АСД-4).
I — Ni_3Al ; II — $NiAl$; III — Ni_2Al_3 .

сти моноалюминида никеля (рис. 2, 2; Ni—31,5 вес. % Al) [6]. Для других составов образуются многофазные продукты горения. Так, например, при горении состава Ni — 13,5 вес. % Al (стехиометрия Ni_3Al) по результатам рентгеноструктурного анализа образуется в основном фаза Ni_3Al (кубическая решетка, $a=3,550 \text{ \AA}$), однако микрорентгеноспектральный анализ (рис. 2, I) показал, что кроме Ni_3Al присутствует также фаза $NiAl$ и непрореагировавший никель. По данным металлографии (рис. 3, б) структура продуктов горения однородна и состоит в основном из фазы Ni_3Al .

При горении состава Ni — 42,5 вес. % Al (стехиометрия Ni_2Al_3) образующийся продукт состоит из смеси фаз Ni_2Al_3 и $NiAl$ (рис. 2, 3). Видны две резко отличающиеся по цвету фазы: серовато-голубая Ni_2Al_3 и светлые узкие прожилки $NiAl$ (рис. 3, в). Продукт горения состава Ni — 58 вес. % Al (стехиометрия $NiAl_3$) по данным микрорентгеноспектрального, рентгеноструктурного и металлографического (рис. 3, г) анализов двухфазный и состоит из смеси фаз $NiAl_3$ и Ni_2Al_3 .

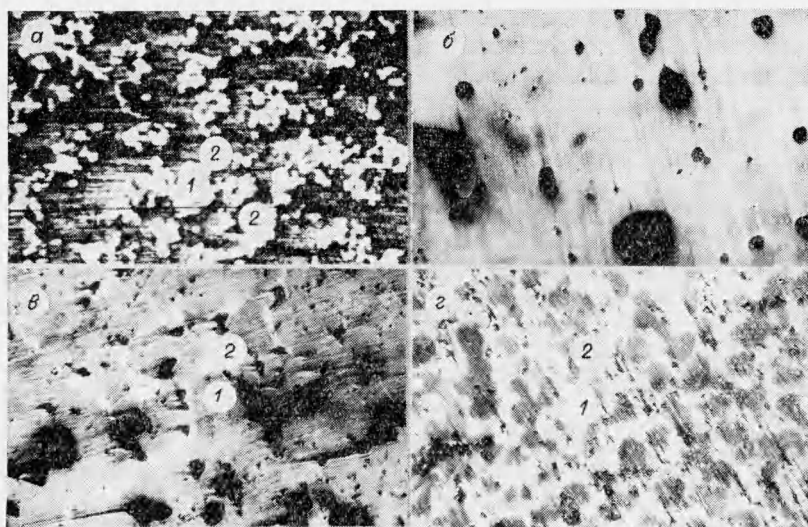
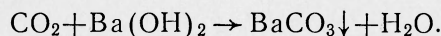


Рис. 3. Микрофотографии участка поверхности.
а) сырой образец: 1 — Ni, 2 — Al ($\times 150$); б) сгоревший образец Ni — 13,5 вес. % Al ($\times 500$); в) сгоревший образец Ni — 42,5 вес. % Al: 1 — Ni_2Al_3 , 2 — $NiAl$ ($\times 500$); г) сгоревший образец Ni — 58 вес. % Al: 1 — $NiAl_3$, 2 — Ni_2Al_3 ($\times 500$).

Фазовый состав продуктов горения зависит от дисперсности реагентов. Так, продукты горения состава Ni—31,5 вес. % Al (стехиометрия NiAl), смешанного из порошков алюминия и никеля с размером частиц 50—63 мкм, являются двухфазными и состоят из NiAl и Ni₂Al₃. Известно, что примеси, адсорбированные на поверхности частиц порошка, влияют на кинетику реакции. В связи с этим изучалось влияние отжига, приводящего к очистке поверхности, на скорость горения и состав выделяющихся газов.

При нагреве порошка никеля (ПНК-2 мелкозернистый) в состоянии поставки наблюдалось три пика интенсивности распределения m/e , соответствующие массам — 44 (CO₂, рис. 4, 1), 28 (CO, рис. 4, 2) и 18 (H₂O, рис. 4, 3), а при отжиге порошка алюминия АСД-1 наблюдался только один пик, соответствующий массе 18 (H₂O). Количество воды, адсорбированной на порошке никеля, значительно выше, чем на порошке алюминия. Эти данные согласуются с результатами масс-спектрометрического анализа основного карбоната никеля [7]. Выделение CO₂ было подтверждено с помощью качественной реакции



Анализ масс-спектрограмм показал, что при нагреве состава Ni—31,5 вес. % Al выделяются те же газообразные продукты, что и при отжиге чистых порошков. При температуре 550°C в смеси порошков никеля и алюминия начинается сильная экзотермическая реакция (температура очень быстро повышается до 1200—1300°C), вызванная образованием интерметаллидов [8]. Хотя газовыделение при этом увеличивается, состав продуктов остается прежним.

Для выяснения влияния газов, адсорбированных на частицах порошков, на скорость горения проводился ступенчатый отжиг никелевого порошка в вакууме 10⁻³ мм рт. ст. ($T=200^\circ\text{C}$, $t=2$ ч; $T=300^\circ\text{C}$, $t=3$ ч; $T=400^\circ\text{C}$, $t=3$ ч; $T=500^\circ\text{C}$, $t=2$ ч; $T=600^\circ\text{C}$, $t=1$ ч). Такой отжиг приводит к снижению количества адсорбированных газов. Все три пика значительно уменьшаются (рис. 5). Сразу после отжига порошков или смеси порошков готовились образцы и сжигались в бомбе. Скорость горения состава Ni—31,5 вес. % Al, приготовленного из порошков, обработанных по указанному выше режиму, или из смеси порошков, отожженных в вакууме 10⁻³ мм рт. ст. при 400°C в течение 5 ч, равна (10,5±0,5) см/с. Скорость горения этого состава, приготовленного из смеси порошков в состоянии поставки, равна (9,5±0,5) см/с.

Таким образом, вакуумная термическая обработка порошков приводит к слабому повышению скорости горения.

Авторы приносят глубокую благодарность В. Л. Щеринскому, А. В. Лепинских, Л. В. Шолоховой, принимавшим участие в экспериментальной работе.

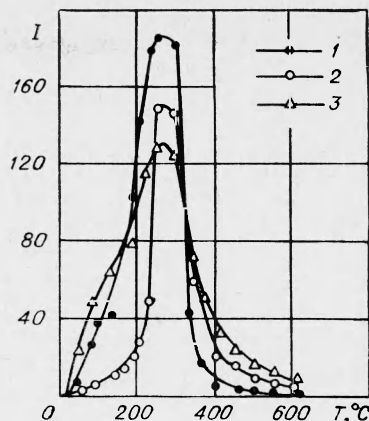


Рис. 4. Масс-спектрограмма, полученная при нагреве никелевого порошка.

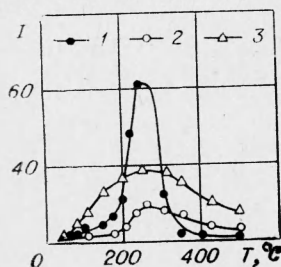


Рис. 5. Масс-спектрограмма, полученная при нагреве отожженной смеси порошков Ni—31,5 вес. % Al.
1 — CO₂; 2 — CO; 3 — H₂O.

Поступила в редакцию
17/X 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, В. М. Шкиро, И. П. Боровинская. Авт. свид. СССР № 255221, 1967; Бюллетень изобретений, 1971, 10.
2. Ю. С. Найбороденко, В. И. Итин и др. Авт. свид. СССР № 420394, 1972; Бюллетень изобретений, 1974, 11.
3. Ю. С. Найбороденко, В. И. Итин и др. Изв. вузов СССР. Физика, 1973, 6, 145.
4. Ю. С. Найбороденко, В. И. Итин. ФГВ, 1975, 11, 3.
5. М. Хансен, К. Андерко. Структуры двойных сплавов. М., «Металлургиздат», 1962.
6. В. В. Григорьев, А. К. Байбаков. ЖФХ, 1972, XLVI, 771.
7. Найбороденко, В. И. Итин, К. В. Савицкий. Изв. вузов СССР. Физика, 1968, 10, 27.

УДК 662.58

РОЛЬ ТЕПЛОПТЕРЬ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПРОЦЕССЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ

В. Н. Блошенко, Б. И. Хайкин

(Москва)

Многие металлы воспламеняются при высоких температурах. В таких условиях теплопотери излучением могут вносить заметный вклад в величину полных потерь тепла от поверхности частицы. Особенно важно учитывать теплопотери излучением при обработке экспериментальных данных по воспламенению частиц с целью определения кинетических параметров. Задача настоящей работы — обобщение результатов по критическим условиям воспламенения частиц металлов, полученных в [1] в предположении кондуктивного механизма теплообмена, на случай заметного влияния теплопотерь излучением.

При анализе процесса воспламенения будем предполагать, что размер частицы много меньше размера камеры (сосуда), с которой происходит теплообмен излучением. Тогда для скорости лучистого теплообмена (в расчете на единицу поверхности частицы) справедливо выражение [2]:

$$q_R = \varepsilon \sigma (T^4 - T_1^4),$$

где T — температура частицы; T_1 — температура стенок камеры; ε — степень черноты поверхности частицы; σ — постоянная Стефана — Больцмана. Для металлов, окисляющихся по степенному закону [3], система уравнений, описывающих процесс воспламенения частицы в предположениях, оговоренных в [1], может быть представлена в виде

$$\frac{1}{6} c \rho d_0 \frac{dT}{dt} = Q_0 \frac{K_n C_\infty^m}{\delta^n} \cdot e^{-\frac{E}{RT}} - \frac{\lambda Nu}{d_0} (T - T_\infty) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_1^4), \quad \frac{d\delta}{dt} = \frac{K_n C_\infty^m}{\delta^n} e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (1)$$

$$t=0: \delta = \delta_n, \quad T = T_n,$$

где c — теплоемкость металла; ρ — его плотность; d_0 — размер частицы; Q_0 — тепловой эффект реакции на грамм окисла, умноженный на отношение плотностей окисла и металла; K_n — предэкспонент; C_∞ — концентрация окислителя; E — энергия активизации; λ — коэффициент теплопроводности газа; Nu — число Нуссельта; δ — толщина окисной пленки; T — температура частицы; t — время; m — порядок реакции по окислите-