

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ ОБРАЗЦОВ ИЗ ИСХОДНОЙ И АКТИВИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ Ti+Ni ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Н.А. Кочетов, Б.С. Сеплярский

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия

* kolyan_kochetov@mail.ru

Сплавы на основе никелида титана широко применяются в медицине и технике. Современным способом получения интерметаллидов является синтез с помощью горения, который может осуществляться как в режиме послойного горения (СВС) [1-3], так и в режиме теплового взрыва [4-8]. При комнатной температуре в нормальных условиях не удается реализовать процесс горения в системе Ti+Ni. Для реализации этого процесса в данной системе обычно используется предварительный нагрев, либо предварительная механическая активация (МА) смеси [8-10]. Проведенные исследования [12-14] показали, что в смесях металлов в результате МА формируются композитные частицы, состоящие из слоев исходных компонентов. Ранее было установлено, что в порошках металлов после МА [15], и, в частности, в активированной смеси Ti+Ni [9] взаимодействие реагентов в волне горения может происходить в режиме реакционной диффузии. Логично задаться вопросом – какова причина горения в случае не активированной смеси, когда нет композитных частиц? Одной из возможных причин может быть образование жидкой фазы из-за повышения температуры во фронте горения при предварительном нагреве образца.

Также была поставлена задача – выяснить отличается ли механизм взаимодействия реагентов при горении активированной смеси по сравнению с исходной смесью. Будет ли образовываться жидкая фаза в этом случае?

Методика экспериментов.

В работе использовался порошок никеля марки ПНК и порошок титана марки ПТОМ. Средний размер частиц никеля составлял 10 мкм, титана – 50 мкм.

МА эквимолярной смеси порошков Ti+Ni осуществлялась в механоактиваторе АГО-2 с использованием стальных шаров диаметром 9 мм при ускорении 90 g [12-15]. Продолжительность МА составляла 5 и 9 мин.

Цилиндрические прессованные образцы диаметром 10 мм и высотой около 15 мм получали двухсторонним холодным прессованием.

Процессы горения и теплового взрыва исследовались в камере постоянного давления в среде аргона при давлении 1 атм. Предварительный нагрев образцов осуществлялся с помощью нагрева электрическим током молибденовой проволоки, окружающей исследуемый образец. Начальная и максимальная температуры горения и теплового взрыва измерялись вольфрам-рениевой термопарой ВР5/ВР20.

Результаты и обсуждение.

В смесях после МА удалось реализовать процесс горения при комнатной температуре. В исходной смеси без предварительного подогрева процесс горения реализовать не удалось, минимальное значение начальной температуры, при которой удалось реализовать горение в образцах из исходной смеси, составило 130⁰С. При нагреве до 190⁰С в активированных смесях происходил тепловой взрыв. После 5 мин МА максимальная температура горения смеси не зависит от начальной температуры, а после 9 мин МА максимальная температуры горения увеличивается с ростом начальной температуры. Данный факт, по-видимому, связан с более полной глубиной превращения исходных реагентов в случае продолжительности МА 9 мин.

Скорость горения исходной смеси увеличивается с увеличением начальной температуры. Во всем исследованном диапазоне значений начальной температуры (130⁰С-276⁰С) реализуется процесс послойного горения (рис 1). В случае активированной смеси после значительного повышения скорости горения с 2 до 25 мм/с в интервале температур 20⁰С-120⁰С дальнейшее повышение начальной температуры приводит к уменьшению скорости горения. При повышении начальной температуры до 190⁰С в МА смеси происходит тепловой взрыв. Аналогичные результаты были получены для МА смеси в работе [9, 10]. Однако стадия уменьшения скорости горения при повышении начальной

температуры в [9, 10] заканчивалась не тепловым взрывом смеси, а прекращением горения при температуре большей 300⁰С.

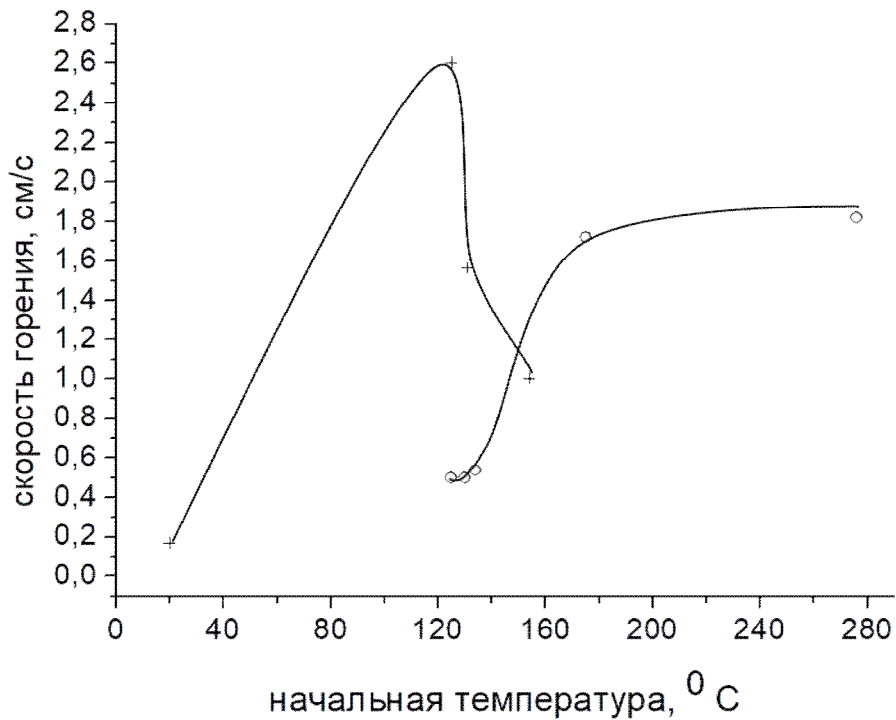


Рис. 1. Зависимость скоростей горения от начальной температуры для смесей Ti+Ni: ○ - исходная смесь, + - МА 5 мин смесь.

Авторы работы [9, 10] объясняют уменьшение скорости в области повышенных температур отжигом неравновесных дефектов созданных в результате активации, что и ведет к снижению скорости горения. Их отсутствие (неравновесных дефектов) приводит к невозможности инициирования горения. Другим объяснением наблюдаемых зависимостей скорости горения от начальной температуры является образование в МА смеси нестабильных твердых растворов [16]. Было показано, что МА может приводить к образованию неравновесных перенасыщенных растворов с малым размером кристаллитов, которые вследствие изменений структуры могут обладать уникальными реакционными свойствами [13]. Именно с образованием нестабильных твердых растворов авторы статьи

связывают необычное поведение зависимости скорости горения от начальной температуры в МА смесях.

Изучение образцов продуктов показало, что в процессе горения образцов из исходной смеси образуется жидкая фаза, первоначальная цилиндрическая форма образцов изменяется. Это изменение первоначальной формы становится более заметным при увеличении начальной температуры горения. Образцы продуктов из активированных смесей не содержат следов плавления. Как после горения, так и после теплового взрыва первоначальная форма образцов из МА смесей сохраняется. На рис. 1 есть небольшая область начальных температур, где удалось инициировать послойное горение как в активированных, так и в исходных смесях. Естественно возникает вопрос как при одной и той же начальной температуре в исходных смесях достигается температура плавления, а в активированных нет. Ответ на этот вопрос состоит в том, что образцы из исходной смеси горят в нестационарном режиме, когда стадия депрессии сменяется быстрым сгоранием прогретого слоя вещества, образовавшегося на стадии депрессии. При сгорании прогретого слоя температура горения превышает адиабатическую температуру горения, что приводит к появлению жидкой фазы и позволяет реализовать процесс горения в образце из исходной смеси.

Заключение

Таким образом установлены области реализации послойного режима горения в исходной и активированных смесях Ti+Ni. Показано, что при нагреве до 190⁰С в активированных смесях происходит тепловой взрыв. Предложено объяснение уменьшения скорости горения активированной смеси в области повышенных начальных температур. Дано объяснение различных механизмов реализации послойного режима горения в смеси из исходных и МА порошков при одинаковой начальной температуре. Установлено, что различие в механизмах горения смеси из исходных порошков и МА смеси приводит к различному фазовому составу продуктов горения. Результаты данного исследования могут найти применения для оптимизации процесса получения сплавов с памятью формы на основе никелида титана.

Литература

- [1] E. Medda, F. Delogu, G. Cao, *Materials Science and Engineering: A361*, (2003) 23-28. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00566-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00566-5)
- [2] R. Orru, G. Cao, Z.A. Munir, *Metallurgical and Materials Transactions*, 30A, (1999) 1101-1108.
- [3] M.Adeli, S.H.Seyedein, M.R.Aboutalebi, M.Kobashi, N.Kanetake, *Journal of Alloys and Compounds*, 497, (2010) 100-104. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.03.050>
- [4] S.H. Lee, J.H. Lee, Y.H. Lee, D.H. Shin, Y.S. Kim., *Materials Science and Engineering A281*, (2000) 275–285.
- [5] N. Bertolino, M. Monagheddu, A. Tacca, P. Giuliani, C. Zanotti, U. Anselmi-Tamburini. *Intermetallics*, 11, (2003) pp. 41-49
- [6] М.А. Корчагин, *Физика горения и взрыва*, 51, (2015) 77 – 86. DOI 10.15372/FGV20150509
- [7] O. D. Boyarchenko, O. K. Kamynina, A. E. Sytshev, S. G. Vadchenko, I. Gotman , and L. M. Umarov, *Inter. Journal of SHS*, 19, (2010) 285–291. DOI: 10.3103/S1061386210040084
- [8] V. Yu. Filimonov, M. A. Korchagin, I.A. Ditenberg, A.N. Tyumentsev, N. Z. Lyakhov, *Powder Technol.*, 335, (2013) 606–613. doi: 10.1016/j.powtec.2012.11.022
- [9] М. А. Корчагин, Т. Ф. Григорьева, Б. Б. Бохонов, М. Р. Шарафутдинов, А. П. Баринаова, Н. З. Ляхов, *Физика горения и взрыва*, 39, (2003) 51 – 59.
- [10] М. А. Корчагин, Т. Ф. Григорьева, Б. Б. Бохонов, М. Р. Шарафутдинов, А. П. Баринаова, Н. З. Ляхов. *Физика горения и взрыва*, 39, (2003) 60 – 68.
- [11] В.И. Итин, Т.В. Монасевич, А.Д. Братчиков, *Физика горения и взрыва*, 33, (1997) 48 – 51.
- [12] Н.А. Кочетов, *Химическая физика*, 35, (2016) 49–54. DOI: 10.7868/S0207401X16070049
- [13] Н.А. Кочетов, Б.С. Сеплярский, *Химическая физика*, 36, (2017) 50–55. DOI: 10.7868/S0207401X17040082
- [14] Н.А. Кочетов, Б.С. Сеплярский, *Физика горения и взрыва*, 50, (2014) 29-35.
- [15] D. Yu. Kovalev, N. A. Kochetov, V. I. Ponomarev and A. S. Mukasyan, *Inter. Journal of SHS*, 19, (2010) 120-125.
- [16] А. С. Рогачёв, А. С. Мукасян, *Физика горения и взрыва*, 46, (2010) 3-30.