

7. Shuichi N. A molecular dynamics method for simulations in canonical ensemble // *Molecular Phys.* – 1984. – V. 52. – № 2. – P. 255–268.
8. Дмитриев А.И., Псахье С.Г. О роли избыточного объема в нагруженном кристалле на стадии зарождения пластической деформации в приповерхностных областях // *Письма в ЖТФ.* – 2006. – Т. 32. – № 15. – С. 40–44.
9. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. – М.: Мир, 1990. – Ч. 1. – 350 с.
10. Psakhie S.G., Zolnikov K.P., Kryzhevich D.S. Elementary atomistic mechanism of crystal plasticity // *Phys. Letters.* – 2007. – V. A367. – P. 250–253.
11. Коноваленко Ив.С., Зольников К.П., Псахье С.Г. Моделирование формирования наноразмерных структур и изучение возможностей их использования в качестве «молекулярных моторов» // *Известия вузов. Сер. Физика.* – 2006. – Т. 49. – № 3. – С. 38–39.
12. Nastaushev Yu.V., Prinz V.Ya., Svitashva S.N. A technique for fabricating Au/Ti micro- and nanotubes // *Nanotechnology.* – 2005. – V. 16. – P. 908–912.
13. Bolesta A.V., Golovnev I.F., Fomin V.M. Molecular dynamics simulations of InGaAs/GaAs nanotubes synthesis // *Физическая мезомеханика.* – 2004. – Т. 7. – Спец. выпуск. – Ч. 2. – С. 8–10.
14. Baskes M.I. Modified embedded-atom potentials for cubic materials and impurities // *Phys. Rev. B.* – 1992. – V. 46. – № 5. – P. 2727–2742.
15. Cai J., Ye Y.Y. Simple analytical embedded-atom-potential model including a long-range force for fcc metals and their alloys // *Phys. Rev. B.* – 1996. – V. 54. – № 12. – P. 8398–8410.

Поступила 20.02.2008 г.

УДК 544.77.022.524

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОВОЛОКОН ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СМЕСИ НАНОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ И НИКЕЛЯ

В.В. Ан, Н.А. Яворовский, Ш. де Изарра*

ОСП «Научно-исследовательский институт высоких напряжений» ТПУ
*Лаборатория спектроскопического анализа и энергетики плазм, г. Бурж, Франция
E-mail: an_vladimir@tpu.ru

Представлены результаты исследования образования нановолокон интерметаллидов в системе Al-Ni в условиях высокотемпературного синтеза. Исследованы процессы зажигания с помощью CO₂-лазера ($\lambda=10,6$ мкм) эквимолярных смесей нанопорошков алюминия и никеля, полученных электрическим взрывом проводников. Обнаружено, что основными продуктами синтеза являются нановолокнистые кристаллы интерметаллидов Al₃Ni₂ и Al₃Ni.

Ключевые слова:

Высокотемпературный синтез, нановолокна интерметаллидов, нановолокнистые кристаллы, нанопорошки, высокие энергии, импульсное воздействие.

Введение

Интерметаллические соединения в системе Ni-Al перспективны в качестве исходного сырья для конструкционных материалов аэрокосмического назначения, автомобильной промышленности, топливных ячеек [1–3]. Такие материалы получают различными способами, наиболее распространенным из которых является самораспространяющийся высокотемпературный синтез [1]. В литературе также известны методы получения интерметаллических матричных композитов Al-Ni интерметаллидов и оксида алюминия [4]. Наноразмерные порошки алюминия, полученные электрическим взрывом проводников [5], могут быть использованы для получения интерметаллических соединений методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Высокая реакционная способность электровзрывных нанопорошков обеспечивает повышенные скорости гетерофазных реакций. Ранее были получены результаты по получению кристаллов вытянутой формы оксидов, оксинитридов и нитридов при горении наноразмерного порошка алюминия на воздухе, а

также оксигидроксидных нановолокон при взаимодействии нанопорошка алюминия с жидкой водой [6, 7]. До сих пор остается открытым вопрос о создании полноценного физико-химического механизма роста вытянутых и волокнистых кристаллов диаметром от нескольких до сотен нм. В данной работе предпринята еще одна попытка исследования образования нановолокнистых кристаллов интерметаллических соединений в системе Ni-Al.

Экспериментальная часть

В работе были исследованы энергетические смеси наноразмерных порошков алюминия и никеля, полученных электрическим взрывом проволочек в НИИ высоких напряжений [5]. Частицы использованных нанопорошков имели сферическую форму, среднеповерхностный размер 80...120 нм с содержанием активного металла 89...92 мас. %. Смешение исходных нанопорошков в эквимолярных соотношениях приводили сухим способом. Далее образцы компактировались с помощью автоматического гидравлического пресса при давлениях прессования

10...20 МПа. Для компактирования использовалась пресс-форма из нержавеющей стали с диаметром пуансона 6 мм. Приготовленные компактированные образцы взвешивались и обмеривались с целью определения их объемной массы.

Экспериментальная установка, рис. 1, состоит из четырех основных блоков: CO₂-лазера Synrad (США) номинальной мощностью 20 Вт ($\lambda=10,6$ мкм), рабочего мини-реактора, осциллографа LeCroy 9314 Al (США), обеспечивающего контроль сигнала с хромель-алюмелевой термопары, и видеокамеры JVC GR DF540E (Япония), регистрирующей процессы, протекающие в рабочем мини-реакторе. Рабочий мини-реактор представляет собой кварцевую трубку диаметром 20 мм и длиной 20 см толщиной стекла 1 мм, закрепленную в специальном держателе. Термопара помещалась в центр торцевой части образца перпендикулярно его продольной оси. После того, как образец помещался в кварцевую трубку, проводилась измерения мощности лазера. Мощность пучка лазера диаметром 3,5 мм варьировалась от 9 до 13 Вт. Процесс горения образца инициировался с помощью лазера, среднее значение плотности мощности облучения варьировалось в диапазоне 23...34 Вт/см². Облучение образца лазерным лучом лазера в импульсном режиме (длина импульса – 4 мс) прекращалось, как только процесс мог протекать самостоятельно.

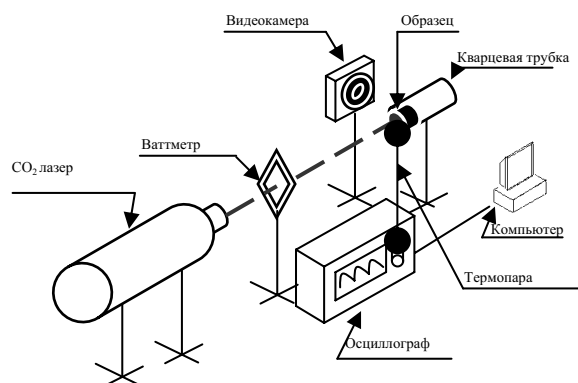


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процесса синтеза нановолокон

Видеокамера JVC GR DF540E использовалась как для визуализации процесса горения образца, так и для измерения скорости распространения пламени V_f . Камера устанавливалась таким образом, чтобы снимать продольную часть образца. Регистрировать процесс горения начинали с момента начала облучения образца до полного окончания горения. Скорость распространения пламени V_f определялась путем локализации определенных секторов области распространения пламени, измерением их линейных размеров l_i и времени прохождения пламени через эти сектора τ_i . Значение V_f рассчитывалось как

$$V_f = \frac{\sum_{i=1}^n (l_i / \tau_i)}{n},$$

где n – число проанализированных секторов локализации пламени на видеозаписи.

Для определения зависимости параметров зажигания и процессов горения исходных смесей от мощности лазерного излучения этот параметр измерялся с помощью ваттметра Power Wizzard 250 (Synrad, США).

Результаты и обсуждение

Процесс горения приготовленных образцов протекал в 6 стадий: нагрев, воспламенение, медленное распространение пламени, экзотермическая реакция, затухание пламени, охлаждение образца. В целом процесс длился 2...3 мин. На рис. 2 показан видеокадр, на котором видна вспышка и разлет газообразных продуктов при межметаллической реакции. Время реакции соизмеримо со скоростью кадра и составляет 0,15 с.



Рис. 2. Видеокадр горения смеси Ni-Al

Характерная кривая изменения температуры зажигания и процесса горения эквимолярной смеси Ni-Al, обработанной при мощности лазерного излучения 9,9 Вт, представлена на рис. 3. Время задержки зажигания τ_i составляло несколько секунд. После воспламенения температура достаточно быстро повышалась до $T_{max}=417$ °С. Затем температура снижалась и стабилизировалась на уровне 126 °С.

Основные характеристики горения смесей Ni-Al приведены в таблице. Не обнаружено заметной зависимости между объемной массой образцов и максимальной температурой. Скорость распространения пламени V_f остается постоянной для всех образцов и меняется в диапазоне 0,23...0,30 мм/с. Максимальное значение V_f найдено для образца 4 с объемной массой 1,008 г/см³, что может быть связано с более полным межметаллическим взаимодействием.

Продукты горения смесей нанопорошков Ni-Al были проанализированы с помощью электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного анализа. На рис. 4 представлена микрофотография полученных нановолокон. Продукты горения представляют собой тонкие волокна, длина и диаметр которых составляет 20...40 мкм и 50...300 нм соответственно. Результаты анализа показали, что основными элементами, из которых состоят нановолокна, являются Al и Ni. Кроме того, в конечных продуктах обнаружены фазы корунда, представляющего

собой игольчатые кристаллы диаметром 80...100 нм и длиной до нескольких мкм. При изучении видеокдра, соответствующего вспышке при алюминотермической реакции (рис. 2), можно видеть облака тонких струй, представляющих собой газообразные продукты гетерофазных реакций. Детальное изучение микрофотографий конденсированных продуктов горения показало, что нановолокнистые кристаллы конденсировались в основном в поперечном, а не продольном направлении по длине образца. Такой режим разлета продуктов межметаллической реакции, по-видимому, связан с тем, что диффузия окислителя лимитируется геометрией образца.

Таблица. Характеристики горения смеси Ni-Al (1:1) в зависимости от объемной массы образца (мощность лазерного излучения 9 Вт)

Образец	Объемная масса, г/см ³	T _{max} , °C	V _г , мм/с
1	1,010	541	0,25
2	1,070	583	0,30
3	0,986	493	0,23
4	1,008	698	0,50
5	1,030	701	0,25

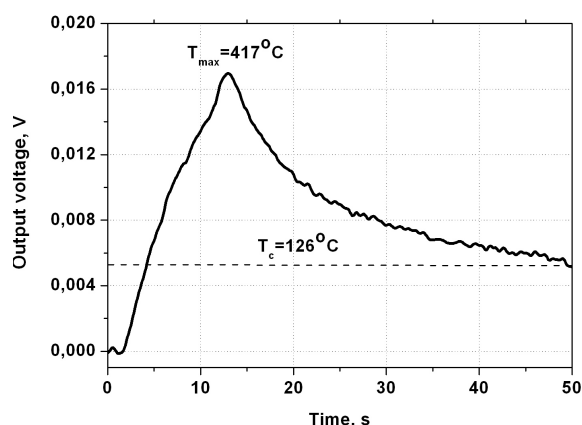


Рис. 3. Изменение во времени напряжения, снимаемого с термопары, для горящего образца смеси Ni-Al

Алюминотермическая реакция могла спровоцировать интенсивное испарение непрореагировавшего алюминия и никеля, восстановленного из первоначально образовавшегося NiO.

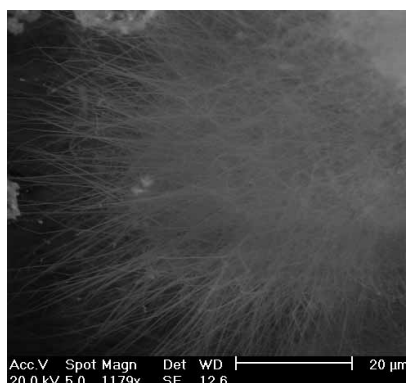


Рис. 4. Микрофотография нановолокон Ni-Al, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа

Выводы

Исследованы процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза нановолокнистых структур в системе Ni-Al при облучении CO₂-лазером смесей нанопорошков никеля и алюминия. Обнаружено, что процессы протекают в шесть стадий: нагрев, зажигание, медленное распространение пламени, экзотермическая реакция, затухание пламени, охлаждение образца. Элементный анализ показал, что основными компонентами нановолокон являются Ni и Al. В конечных продуктах обнаружены фазы корунда, представляющего собой игольчатые кристаллы диаметром 80...100 нм и длиной до нескольких мкм. Согласно данным рентгенофазового анализа конденсированных продуктов основными фазами являются интерметаллические соединения состава Al₃Ni₂ и Al₃Ni.

Работа выполнена в рамках соглашения о сотрудничестве между Томским политехническим университетом и Орлеанским университетом. Авторы выражают признательность доктору Флавиену Валенси за помощь в разработке экспериментальной установки, подготовке эксперимента и полезные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Curfs C., Turrillas X., Vaughan G.B.M., Terry A.E., Kvik A., Rodriguez M.A. Al-Ni intermetallics obtained by SHS; A time-resolved X-ray diffraction study // *Intermetallics*. – 2007. – № 15. – P. 1163–1171.
2. Selvan J.S., Soundararajan G., Subramanian K. Laser alloying of aluminium with electrodeposited nickel: optimisation of plating thickness and processing parameters // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – № 124. – P. 117–127.
3. Ham H.C., Maganyuk A.P., Han J., Yoon S.P., Nam S.W., Lim T.H., Hongba S.A. Preparation of Ni-Al alloys at reduced temperature for fuel cell applications // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2007. – № 446–447. – P. 733–737.
4. Ismail R., Yaacob I.I. Fabrication of nickel aluminide intermetallic-alumina nanocomposite via reaction synthesis // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – V. 200. – Iss. 1–3. – P. 279–282.
5. Яворовский Н.А. Получение ультрадисперсных порошков методом электрического взрыва // *Известия вузов. Физика*. – 1996. – № 4 (Приложение). – С. 114–136.
6. Яворовский Н.А., Савельев Г.Г., Галанов А.И., Шиян Л.Н., Юрмазова Т.А., Лобанова Г.Л. Получение нановолокон оксидов алюминия из порошков металлического алюминия // *Перспективные материалы*. – 2008. – № 4. – С. 1–7.
7. Ан В.В. Применение нанопорошков алюминия при получении нитридосодержащих соединений: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Томск, 1999. – 160 с.

Поступила 28.01.2009 г.