УДК 669.23/29: 539.89: 539.219

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-11-246-77-80

*А. Ю. Малахов, канд. техн. наук, И. В. Сайков, канд. техн. наук, И. В. Денисов, канд. техн. наук,
С. А. Серопян, аспирант, И. Е. Семенчук, аспирант*

ИНИЦИИРОВАНИЕ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ Ni-Al В УСЛОВИЯХ УДАРНО-ВОЛНОВОГО И ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

ИСМАН им. А. Г. Мерджанова РАН, г. Черноголовка, malakhov@ism.ac.ru

В данной работе представлены результаты исследования ударно-волнового воздействия и термической обработки порошковой смеси Ni-Al в металлической матрице. Установлено, что монофазный продукт NiAl образуется как непосредственно при взрывном воздействии при скорости метания пластины 1500 м/с, так и при термической обработке с нагревом до 750 °С и трёхчасовой выдержке в печи запечатанной матрицы, полученной по режиму сварки взрывом стали 08 + 09Г2С. Температура инициирования порошковой смеси составляла около 600 °С. Полученные результаты перспективны для разработки и создания композиционных металлических материалов с интерметаллическим слоем.

Ключевые слова: Ni-Al, интерметаллид, ударно-волновое воздействие, скорость метания, тепловой взрыв

A. Yu. Malakhov, I. V. Saikov, I. V. Denisov, S. A. Seropyan, I. E. Semenchuk

Ni-Al POWDER MIXTURE INITIATION DURING SHOCK-WAVE LOADING AND HEAT TREATMENT

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS,
Chernogolovka, malakhov@ism.ac.ru*

This paper studies shock wave loading and heat treatment of a Ni-Al powder mixture in a metal matrix. We had found that a monophasic product NiAl was synthesized at the flyer plate velocity of 1500 m/s, immediately, or at 550 m/s during heat treatment (up to 750 °C) and for 3 hours heat treatment. Initiation temperature of powder mixture was about 600 °C. The results got are perspective for the development and production of composite materials with an intermetallic layer.

Keywords: Ni-Al, intermetallic compound, shock-wave loading, impact velocity, heat treatment

Композиционные материалы, в том числе металлокерамические, позволяют улучшать эксплуатационные свойства различных изделий и расширять возможности для дальнейшего развития таких отраслей промышленности, как машиностроение, судостроение, приборостроение и т.д. [1, 2]. К композиционным материалам принято относить структурные гетерогенные материалы, которые состоят из двух или более составляющих. В основном такие составляющие делятся на упрочняющие фазы и матричные основы. В большинстве случаев упрочняющие фазы имеют высокую прочность, твёрдость, жаропрочность и т.д., но низкую пластичность, ударную вязкость, трещиностойкость и т.п. Вследствие этого упрочняющие элементы заключаются в металлическую (или иного материала) матрицу, которая перераспределяет нагрузку и обладая более вы-

сокими пластическими свойствами, отвечает за конструкционную прочность и эксплуатационные характеристики материала. Например, благодаря армированию керамики дисперсными металлическими частицами получают керметы, которые обладают повышенной изностойкостью, жаростойкостью, теплопроводностью и устойчивостью к тепловым ударам [3, 4].

Новым классом конструкционных материалов являются металло-интерметаллидные слоистые композиционные материалы (МИСКМ), которые представляют собой чередующиеся интерметаллидные и металлические слои с резко различающимися физико-механическими свойствами, что делает их привлекательными для применения в авиакосмической технике и многих других областях промышленности. При этом, необходимо учитывать, что резко

различающиеся физико-механические свойства сопрягаемых материалов вносят свои ограничения для создания качественного соединения металлического и интерметаллидного слоя [5 ... 8].

Цель данной работы заключалась в получении модельного материала с интерметаллидным слоем из Ni-Al и определении оптимальных режимов инициирования порошковой смеси при ударно-волновом и термическом воздействии.

Материалы и методика эксперимента

Для экспериментов использовались матрицы из стали 09Г2С размером 20×100×100 мм, с глухим отверстием по центру глубиной 4 мм и диаметром 58 мм. В качестве метаемой пластины использовалась сталь 08 толщиной 4 мм. Для ударно-волнового нагружения и синтеза в режиме теплового взрыва использовали порошковую смесь никеля ПНКУТ-3 и алюминия АСД-1 стехиометрического состава для получения конечного продукта NiAl. Смешивание исходных порошков проводилось в смесителе бара-

банного типа «Турбула» со скоростью вращения барабана 25 об/мин в течение 3 часов с соотношением массы шаров к массе порошка 1:5. Затем порошковая смесь запрессовывалась в матрицу. Ударно-волновое нагружение проводилось при скоростях метания ударника 550 м/с и 1500 м/с. Схема сборки представлена на рис. 1.

Для синтеза в режиме теплового взрыва использовали индукционную печь. В работе применялось два режима термической обработки: 1 – скорость нагрева 25°C/мин до температуры 750°C и выдержка в течение 2 часов; 2 – скорость нагрева 12,5°C/мин до температуры 750°C, выдержка 3 часа и остывание образца с печью до комнатной температуры.

Для определения температуры синтеза в условиях теплового взрыва использовали термопары ВР5/20 диаметром 100 мкм, которые помещали внутрь матрицы и порошкового слоя. Исследования фазового состава проводили на автоматическом рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. Структуру

Рис. 1. Схема ударно-волнового нагружения компактов Ni-Al в разрезе:

1 – детонатор; 2 – взрывчатое вещество; 3 – метаемая пластина; 4 – установочный элемент; 5 – генератор; 6 – спрессованный компакт; 7 – матрица

Рис. 2. Композиционный материал: слева образец № 1; справа образец № 3;

1 – верхний слой, 2 – интерметаллидный слой, 3 – нижний слой

полученных композитов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Zeiss Ultraplus.

Результаты и их обсуждение

После экспериментов, проведенных по схеме (рис. 1) были получены образцы: №1, № 2, №3 (рис. 2). Образцам №1 и №2 соответствовала скорость метания 550 м/с, образец №3 – 1500 м/с. Было установлено, что в образце №3 в результате ударно-волнового воздействия происходит экзотермическая реакция в порошковой смеси Ni-Al о чём свидетельствовала температура поверхности образца (180°C) после эксперимента и образуется монофазный продукт в виде интерметаллида NiAl (рис. 3).

Образцы № 1 и № 2 нагревали до температуры 750 °C и выдерживали в печи в течение двух и трёх часов, соответственно. Температура инициирования реакции в образцах составляла 580-590 °C. Рентгенофазовый анализ синтезированных порошковых смесей показал, что при выдержке в печи образца №1 в течение двух часов интерметаллидный слой состоял из NiAl, Ni₂Al₃, Ni₃Al, а при трёхчасовой выдержке образца №2 интерметаллидный слой в основном состоит из одной фазы NiAl (рис. 3). В работах [9, 10] было показано, что при нагреве Ni-Al компактов ниже температуры плавления алю-

миния образуются интерметаллидные фазы (Ni₂Al₃, Ni₃Al, NiAl₃).

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что получение композиционных материалов с синтезируемым интерметаллидным слоем возможно как ударно-волновым нагружением, так и при термической обработке на установленном режиме.

2. Показано, что при получении композиционного материала путём синтеза компакта (порошковой смеси Ni-Al), с образованием интерметаллидного слоя NiAl между сталью 08 и 09Г2С во время ударно-волнового нагружения, интерметаллидная прослойка имеет пористую структуру и не равномерную толщину. Данный способ позволяет получить многослойный материал за одну операцию без использования последующих операций нагрева в печи.

3. Установлено, что при термической обработке запечатанного компакта (порошковой смеси Ni-Al) в металлической матрице, полученного сваркой взрывом, по режиму нагрев до 750 °C и выдержка в течении 2 часов образуется многофазный продукт (NiAl, Ni₂Al₃, Ni₃Al). При увеличении времени выдержки до 3 часов образуется монофазный продукт (NiAl), как при ударно-волновом нагружении. Интерметаллидный слой имеет

Рис. 3. Дифрактограмма интерметаллидных слоев Ni-Al:
№ 1 и № 2 при 550 м/с и выдержкой в печи 2 и 3 часа, №3 при 1500 м/с

однородную структуру и равномерную толщину, что является необходимым условием при получении композиционного материала.

Получение однородной структуры и равномерной толщины интерметаллидного слоя в (металлических матрицах) слоистых материалах ударно-волновым нагружением является дальнейшим направлением исследований.

Библиографический список

1. Получение твёрдых сплавов на основе карбида кремния и карбида вольфрама с использованием взрывного нагружения / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, М. А. Тупицин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. Г. Кузнецов // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград, 2017. – № 13 (208). – С. 86-91.
2. Ковтунов, А.И. Слоистые композиционные материалы : электронное учебное пособие / А. И. Ковтунов, С. В. Мямин, Т. В. Семистенова. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2017.
3. Программное обеспечение расчёта параметров соударения в многослойных системах металлических пластин / С. В. Хаустов, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, В. А. Ивченко, К. В. Попов, В. И. Нестеров, Д. О. Сагулев, Б. Б. Ионов, Л. А. Новикова // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград, 2017. – № 13 (208). – С. 5-22.
4. Синтез сложнолегированных никелидов алюминия металлотермией оксидов металлов / Ри Хосен, В. В. Гостищев, А. В. Середюк, И. А. Астапов, С. Н. Химухин // Вестник ТОГУ. – 2015. – № 2 (37). – С. 53-60.
5. Shock-Induced Chemical Transformations in Ti-B-Ni and Ti-C-Ni Powder Blends / I. V. Saikov, V. G. Salamatov, A. Yu. Malakhov, I. E. Semenchuk, I. D. Kovalev, N. I. Mukhina, S. A. Seropyan, P. Yu. Gulyaev // International journal of self-propagating high-temperature synthesis. – 2020. – Vol. 29, Iss. 1. – Pp. 10-14.
6. Синтез металло-интерметаллидного слоистого композиционного материала системы Ti-TiAl₃ различными методами / С. А. Зелепугин, О. А. Шкода, О. К. Лепакова, А. С. Зелепугин, Н. Г. Касацкий, А. А. Шавнев, Е. И. Краснов // Труды ВИАМ. – 2016. – №. 11 (47). – С. 21-29.
7. Tailored Reactivity of Ni+Al Nanocomposites: Microstructural Correlations / K. V. Manukyan, B. A. Mason, L. J. Groven, Y. C. Lin, M. Cherukara, S. F. Son, A. S. Mukasyan // The Journal of Physical Chemistry C. – 2012. – Vol. – 116 (39)/ – Pp. 21027-21038.
8. Morsi, K. Review reaction synthesis processing of Ni-Al intermetallic materials / K. Morsi // Materials Science and Engineering A. – 2001. – Vol. 299. – Pp. 1-15.
9. Высокотемпературная газовая экструзия реакционноспособной порошковой смеси Ni + Al / Ф. Ф. Галиев, И. В. Сайков, М. И. Алымов, В. Д. Бербенцев, А. В. Гултин, В. И. Бугаков, Н. В. Сачкова, С. В. Коновалихин // Доклады академии наук. – 2019. – Т.489. – №4. – С. 358-361.
10. The effect of various factors on the strength and ignition of the used Ni-Al system / S. A. Seropyan, I. V. Saikov, V. G. Salamatov, M. I. Alymov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1431. – P. 012052.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта
№ 19-08-00754 А