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

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ СИНТЕЗА В ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ Ni-Al В ТИТАНОВОЙ МАТРИЦЕ

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

В данной работе представлены результаты исследования влияния ударно-волнового нагружения на инициирование синтеза в порошковой смеси Ni-Al, заключенную в матрицу из титана BT1-0. Рентгенофазовый анализ (РФА) и измерение микротвердости интерметаллидного слоя показали, что данный слой состоит из монофазного продукта NiAl, который образуется непосредственно в процессе взрывного нагружения при заданной скорости метания пластины. Таким образом, применение ударно-волнового нагружения позволило получить слоистый материал с упрочняющим интерметаллидным слоем. Полученные результаты перспективны для разработки новых конструкционных материалов, обладающих особыми эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: Ni-Al, интерметаллид, ударно-волновое нагружение, титановая матрица

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

SHOCK-WAVE INITIATION OF SYNTHESIS IN Ni-Al POWDER MIXTURE INSIDE TITANIUM MATRIX

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

This study presents the results of studying the effect of shock-wave loading on the initiation of synthesis in Ni-Al powder mixture inside titanium matrix. X-ray phase analysis (XRD) and measurement of the microhardness of the intermetallic layer showed that this layer consists of a monophase product NiAl, which is formed directly during explosive loading at a given impact velocity of the plate. Thus, the use of shock-wave loading made it possible to obtain a layered material with a strengthening intermetallic layer. The results obtained are promising for the development of new structural materials with special performance properties.

Keywords: Ni-Al, intermetallic compound, shock-wave loading, titanium matrix

В настоящее время большое внимание исследователей уделяется слоистым композиционным материалам, которые в большинстве случаев состоят из упрочняющих элементов и основного материала (матрицы). Упрочняющий элемент обладает высокой прочностью, твердостью, жаростойкостью и т.д., но низкой пластичностью, ударной вязкостью, трещиностойкостью и т.п. Поэтому он заключается в пластичную матричную основу, которая перераспределяет нагрузку и отвечает за конструкционную прочность материала. Сочетание таких свойств в одном материале позволяет повышать эксплуатационные характеристики изделий и расширять возможности развития различных отраслей промышленности [1-3].

В настоящее время в качестве упрочняющего элемента широкое применение нашли интерметаллидные соединения типа Ni_xAl_y [4, 5]. Слоистые композиты с упрочняющей фазой из алюминидов никеля обычно получают путем горячего прессования чередующихся уложенных друг на друга металлических фольг из Ni и Al. В этом случае интерметаллические слои образуются в результате взаимной диффузии и химической реакции между элементами слоёв, а соответствующее давление обеспечивает контакт между листами металлической фольги [6]. Кроме того, такие композиты можно изготавливать с помощью технологий СВС [7, 8] и сварки взрывом [9, 10]. Общей проблемой производства слоистых композитов с интерметаллидной фазой является то, что име-

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

1 – детонатор; 2 – взрывчатое вещество; 3 – метаемая пластина; 4 – опорный элемент;
5 – технологическая пластина; 6 – компакт Ni-Al; 7 – матрица

ются существенные различия физико-механических свойств материала матрицы и упрочняющего элемента. Поэтому сварка взрывом это один из самых перспективных методов для производства металлоинтерметаллидных композитов с большой площадью поверхности. Благодаря высокому давлению нагружения происходит иницирование химической реакции в порошковой смеси [11-13].

Целью данной работы была экспериментальная проверка возможности получения слоистого композиционного материала с интерметаллидным слоем из Ni-Al и слоем из титана ВТ1-0, а также определение оптимальных режимов иницирования порошковой смеси при ударно-волновом нагружении.

Материалы и методика исследований

Для проведения экспериментов использовалась матрица из титана ВТ1-0 размером

8×100×100 мм с глухим отверстием по центру глубиной 4 мм и диаметром 52 мм. В качестве метаемого элемента использовался титановый лист толщиной 3 мм. Исходная порошковая смесь состояла из порошков никеля ПНК-УТ-3 и алюминия АСД-1 в эквимолярном соотношении. Их смешивание проводилось в смесителе типа «пьяная бочка» со скоростью вращения 30 об/мин в течение 2 часов с соотношением массы шаров к массе порошка 5:1. Прессование образца проводилось на ручном гидравлическом прессе ПРГ-10 в цилиндрической пресс-форме. Полученный образец помещался в титановую матрицу, после чего происходила сборка схемы ударно-волнового нагружения (рис. 1). Разгон и метание верхнего титанового листа осуществлялись с помощью взрывчатого вещества (аммонит 6ЖВ) при скорости соударения 1500 м/с.

Исследования фазового состава проводи-

Рис. 2. Титановая матрица после сварки взрывом

лось на автоматическом рентгеновском дифрактометре ДРОН-ЗМ. Микротвердость слоёв измерялась при помощи микротвердомера ПМТ-3. Структура полученного материала исследовалась при помощи оптического микроскопа МЕТАМ ЛВ – 41.

Результаты и обсуждение

В результате проведения экспериментов было установлено, что при ударно-волновом нагружении скользящей детонационной волной на титановую матрицу с компактом из Ni-Al происходит сварка метаемой пластины с матрицей; тем самым это обеспечило герметизацию компакта внутри матрицы.

Измерение температуры поверхности метаемой пластины непосредственно над областью нахождения компакта показало, что температура после эксперимента была 210 °С. Зафиксированная температура и ярко выраженные цвета побежалости на поверхности титана указывают на прохождение экзотермической реакции в порошковой смеси Ni-Al. Внешний вид материала после сварки взрывом представлен на рис. 2.

На рис. 3 показан материал в продольном сечении. Видно, что в центральной части произошло вздутие образца вследствие интенсивного газовыделения из порошковой

Рис. 3. Полученный слоистый материал в продольном разрезе

Рис. 4. Граница соединения интерметаллида с титаном

Рис. 5. Дифрактограмма интерметаллидного слоя Ni-Al

смеси в процессе синтеза. В этом месте наблюдаются поперечные трещины и расслоения по границам контакта интерметаллидного и титановых слоёв. При этом, соединение интерметаллидного слоя с титаном произошло в начальных и конечных участках.

Результаты измерения микротвердости слоев после сварки взрывом представлены на рис. 4. Средняя микротвердость составила 550 HV, что соответствует микротвердости интерметаллида NiAl.

Результаты РФА (рис. 5) показали, что в процессе ударно-волнового синтеза порошковой смеси образуется монофазный продукт в виде интерметаллида NiAl.

Заключение

В результате проведенной экспериментальной работы сваркой взрывом был получен слоистый материал, включающий в себя титановую матрицу и упрочняющий слой из алюминид никеля. Показано, что при получении подобного материала путём синтеза порошковой смеси Ni-Al в титановой матрице удастся получить монофазный продукт NiAl. Установлено, что в процессе синтеза интерметаллидного слоя в титановой матрице происходит интенсивное выделение большого количества газовых продуктов. В результате этого, материал имеет пористую структуру и неравномерную толщину в центральной части интерметаллидного слоя. Получение однородной структуры и равномерной толщины интерметаллидного слоя в слоистых материалах ударно-волновым нагружением является дальнейшим направлением исследований.

Библиографический список

1. Meng, L. Microstructures and Properties of AlMgTi-Based Metal-Intermetallic Laminate Composites by Dual-Steps Vacuum Hot Pressing / L. Meng, B. Zhou, B. Ya, D. Jing, Y. Jiang, D. Zhang, X. Zhang // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – №18. – Pp. 3932.
2. Adharapurapu, R. R. Effects of ductile laminate thickness, volume fraction, and orientation on fatigue-crack propagation in Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate composites / R. R. Adharapurapu, K. S. Vecchio, F. Jiang, A. Rohatgi // *Metall Mater Trans A*. – 2005. – Vol. 36A. – № 6. – Pp. 1595-1608.
3. Kim, J. K. Fabrication of metal/intermetallic compound laminate composites by thin foil hot press process / J. K. Kim, Dong-Seok Chung // *Solid State Phenomena*. – 2007. – Vols. 124–126. – Pp. 1099–1102.
4. Карпов, М. И. Влияние термообработки под давлением на структуру слоистых композитов Ni/Al / М. И. Карпов, В. П. Коржов, В. М. Кийко // *Перспективные материалы*. – 2011. – № S13. – С. 704-712.
5. Wang, Y. Microstructure evolution in Ni and Ni-superalloy based metallic-intermetallic laminate (MIL) composites / Y. Wang, H. Wang, X. Liu, K. S. Vecchio // *Intermetallics*. – 2017. – Vol. 87. – Pp. 70-80.
6. Konieczny, M. Mechanical properties and deformation behavior of laminated Ni-(Ni₂Al₃+NiAl₃) and Ni-(Ni₃Al+NiAl) composites / M. Konieczny // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 586. – Pp. 11-18.
7. Cojocar, M. The Obtaining of the Intermetallic Compounds of Ni-Al System by Self-Propagating High Temperature Synthesis and Thermal Explosion / M. Cojocar, F. Tudose // *AMR*. – 2015. – Vol. 1114. – Pp. 135-142.
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. Ogneva, T. S. Formation of intermetallics at the interface of explosively welded Ni-Al multilayered composites during annealing / T. S. Ogneva, D. V. Lazurenko, I. A. Bataev, V. I. Mali, M. A. Esikov, A. A. Bataev // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2016. – Vol. 124. – Pp. 012132.
10. Малахов, А. Ю. Иницирование порошковой смеси Ni-Al в условиях ударно-волнового и термического воздействия / А. Ю. Малахов, И. В. Сайков, И. В. Денисов, С. А. Серопян, И. Е. Семенчук // *Известия ВолГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений*. – Волгоград, 2020. – № 11 (246). – С. 77-80.
11. Крохалев, А. В. Получение твердых сплавов на основе карбида кремния и карбида вольфрама с использованием взрывного нагружения / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, М. А. Тупицын, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. Г. Кузнецов // *Известия ВолГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений*. – Волгоград, 2017. – № 13 (208). – С. 86-91.
12. Saikov, I. V. 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. – № 1. – Pp. 10-14.
13. Зелепугин, С. А. 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. – Т. 47. – № 11. – С. 21-29.

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