

УДК 669.018.95

С.А. Зелепугин<sup>1,2</sup>, О.А. Шкода<sup>1</sup>, О.К. Лепанова<sup>1</sup>, А.С. Зелепугин<sup>1,2</sup>,  
Н.Г. Касацкий<sup>1</sup>, А.А. Шавнев<sup>3</sup>, Е.И. Краснов<sup>3</sup>

## СИНТЕЗ МЕТАЛЛО-ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Ti–TiAl<sub>3</sub> РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-3-3

*В современной технике, в том числе и в авиастроении, все более широкое применение находят композиционные материалы, обладающие более высокими показателями статической и динамической прочности, вязкости разрушения по сравнению с традиционными гомогенными материалами. Среди композиционных материалов большой интерес представляют многослойные композиционные материалы, содержащие чередующиеся слои металла и интерметаллида или керамики. Рассмотрено четыре метода получения металло-интерметаллидного слоистого композиционного материала системы Ti–TiAl<sub>3</sub>: тепловой взрыв, реакционное спекание, реакционное прессование, сварка взрывом+спекание. Исследована микроструктура и фазовый состав образцов рентгенофазовым, микрорентгеноспектральным и металлографическим методами. Показана возможность получения требуемой многослойной композиции всеми четырьмя способами.*

**Ключевые слова:** *металло-интерметаллидный слоистый композиционный материал, интерметаллид, титан, алюминий, реакционное спекание, прессование, тепловой взрыв, сварка взрывом.*

*In modern technology, including aircraft manufacturing, the composite materials with higher static and dynamic strength, fracture toughness compared to traditional homogeneous materials are increasingly used. Among the composite materials the laminated composite materials containing alternating layers of metal and intermetallic or ceramic are of great interest. Four methods such as thermal explosion, reactive sintering, reactive pressing and explosive welding+sintering were considered for obtaining the Ti–TiAl<sub>3</sub> metallic-intermetallic laminate composite. The microstructure and phase composition of the samples were studied by the X-ray diffraction, local X-ray spectrum and optical microscopy methods. The study shows that the multi-layered composite could be obtained by all four methods.*

**Keywords:** *metallic-intermetallic laminate composite, intermetallide, titanium, aluminum, reactive sintering, pressing, thermal explosion, explosive welding.*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук [Tomsk Scientific Center of Siberian Branch of Russian Academy of Science]; e-mail: prezid@hq.tsc.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный исследовательский Томский государственный университет [National Research Tomsk State University]; e-mail: rector@tsu.ru

<sup>3</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Прогресс в создании новой техники во многом зависит от разработки и совершенствования технологий получения материалов с требуемыми свойствами, поэтому создание материалов с заданным набором структурных и функциональных свойств в настоящее время

является областью повышенного внимания в материаловедении и технике [1–4]. К новому перспективному классу конструкционных материалов относятся металло-интерметаллидные слоистые композиционные материалы (МИСКМ) [1, 5–11], представляющие собой многослойную композицию с чередующимися слоями металла и интерметаллида. Специфические свойства этого класса композиционных материалов делают их привлекательными для применения в авиакосмической технике и многих других областях, а методы создания МИСКМ позволяют использовать новые технологии, расширяя функциональные возможности слоистых композиционных материалов (СКМ) и область их применения.

Идея создания МИСКМ взята из природы – из анализа оболочек раковин морских ракушек, состоящих из большого количества тонких слоев и характеризующихся повышенными прочностными свойствами. Биологические системы часто представляют собой широкий набор многофункциональных материалов и тем самым мотивируют создание синтетических материалов, аналогов природным. Раковины морского моллюска обладают иерархическими структурами, оптимизированными по прочности. Наиболее полно изучены раковины двух моллюсков – *Haliotis rufescens* (арагонит – морское ушко) и *Pinctata* (раковина). Несмотря на непрочные компоненты, из которых состоят раковины, а именно – карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) и ряд органических связующих веществ, механические свойства этих раковин являются впечатляющими. Их предел прочности составляет 100–300 МПа, а вязкость разрушения  $3\text{--}7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , в то время как  $\text{CaCO}_3$  имеет соответствующие величины прочности и вязкости разрушения 30 МПа и менее  $1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  соответственно. Эти раковины моллюсков обладают выдающимися механическими свойствами благодаря иерархически организованной структуре, начинающейся с отдельных кристаллов  $\text{CaCO}_3$  с размерами 4–5 нм (наноструктура), далее блоков с размерами 0,5–10 мкм и заканчивающейся слоями  $\sim(0,2\text{--}0,5) \text{ мм}$  [5].

Развитие технологий изготовления СКМ, методов лабораторных испытаний их механических свойств, в том числе при динамическом нагружении, актуально в настоящее время. Несмотря на то что уже выполнено значительное количество работ по синтезу и формированию СКМ типа «металл–интерметаллид» либо «металл 1–интерметаллид–металл 2», поиск наиболее оптимальных методов активно продолжается [12–17]. Значительно меньше работ посвящено численному моделированию деформирования и разрушения МИСКМ [9, 18–22].

В качестве наиболее перспективного МИСКМ рассматривается система «титан–триалюминид титана ( $\text{Ti-TiAl}_3$ )». Удельная жесткость (модуль упругости/плотность) такой системы почти в 2 раза выше, чем у стали, удельная ударная вязкость и удельная прочность являются сравнимыми или выше, чем почти у всех металлических сплавов, а удельная твердость коррелирует со многими керамическими материалами [5].

В проблеме организации синтеза СКМ необходимо разделять два основных аспекта – структурный и химический. Под структурными проблемами подразумеваются вопросы, относящиеся к толщине слоев СКМ ( $\delta_i$ ), а также к строению каждого индивидуального слоя. Так, в случае бинарной системы СКМ, состоящей только из двух компонентов А и В, соотношение  $K_{AB}=\delta_A/\delta_B$  определяющим образом влияет на основные физико-механические свойства всего СКМ. Поиск оптимальных величин  $K_{AB}$ , обеспечивающих максимальный уровень таких важнейших характеристик СКМ, как, например, приведенная прочность (отношение предела прочности при разрыве к плотности) и ударная вязкость, является одной из главных задач структурного аспекта проблемы. Вместе с тем в фундаментальном и прикладном отношении не менее важным является ответ на вопрос о внутреннем строении индивидуальных слоев СКМ.

В связи с тем, что физико-механические свойства компонентов композита существенно различаются, для получения высокопрочного МИСКМ необходимы

специальные условия для осуществления реакции синтеза интерметаллида (или керамики) и их соединения с металлами, что связано с высокими температурами и давлением. Речь идет об изучении кинетики реакций синтеза интерметаллида и керамики. Необходимы также исследования закономерностей прочного соединения интерметаллида и керамики с металлами. Таким образом, поиск удовлетворительного решения проблемы синтеза МИСКМ должен быть только комплексным.

В рамках реализации комплексного научного направления 12.2. «Слоистые металл-композиционные материалы (МКМ) систем металл–интерметаллид и металл–керамика для легковесной защиты» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1] в данной работе рассмотрены четыре метода получения МИСКМ системы Ti–TiAl<sub>3</sub>: тепловой взрыв, реакционное спекание, реакционное прессование, сварка взрывом+спекание. Основное внимание уделялось изучению макроструктуры образцов.

### Материалы и методы

В экспериментах использовали фольги титана (марка ВТ1-0) и алюминия (марка 8011) толщиной 0,3 и 0,15 мм соответственно, пластины титана (толщина 0,5 и 0,6 мм) и алюминия (толщина 1 мм) тех же марок, порошки титана ПТС и алюминия АСД-4.

Для синтеза в режиме *теплового взрыва* (синтез, протекающий одновременно во всем объеме смеси) использовали порошковую смесь титана и алюминия стехиометрического состава для образования триалюминида титана TiAl<sub>3</sub> (37,2 Ti+62,8 Al в % (по массе)) и титановую фольгу толщиной 0,3 мм. Порошковую смесь прессовали в таблетки  $\varnothing 20$  мм с пористостью 10–15% (объем пор в % от общего объема). Для синтеза в режиме теплового взрыва использовали специально сконструированную установку, схема которой приведена на рис. 1. Для определения температуры использовали вольфрам-рениевую термопару ( $\varnothing 200$  мкм), которую помещали в порошковый слой образца.

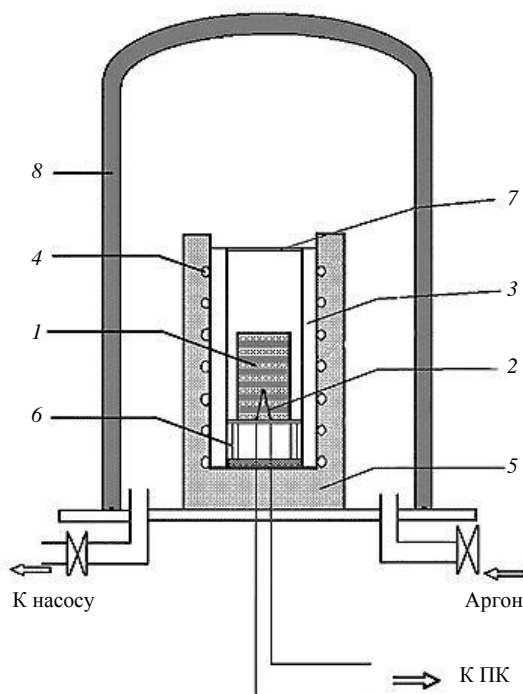


Рис. 1. Схема установки для проведения синтеза в режиме теплового взрыва:

1 – образец с чередующимися слоями «фольга Ti–порошковая смесь Ti/Al»; 2 – термопара; 3 – кварцевая трубка; 4 – нагреватели; 5 – тепловая защита; 6 – подставка; 7 – молибденовый экран; 8 – корпус камеры

Для *реакционного спекания* использовали пластины из титана и алюминия и муфельную печь марки ПМ-12М. Реакционное спекание проводили с внешней нагрузкой для улучшения контакта между фольгами. Перед сборкой пластины шлифовали и обезжировали. Пакет составляли из чередующихся пластин титана и трех пластин алюминия. Подбор соотношения количества пластин титана и алюминия проводили из расчета образования при спекании слоев интерметаллида  $TiAl_3$  и чистого титана. В целом заготовка состояла из 10 пластин титана и 27 пластин алюминия, которые спекали при температурах 700 и 900°C в течение 2; 4 и 6 ч.

Метод *реакционного прессования* (реакционное спекание совместно с постоянно действующим давлением) реализовали на специальной установке в ИФМ УрО РАН (г. Екатеринбург). Использовали пластины из титана и алюминия, варьировали температуру, давление и продолжительность процесса.

*Сварку взрывом* проводили во взрывной камере ИГиЛ СО РАН (г. Новосибирск). Получили пакеты из 11 и 13 чередующихся пластин титана (толщина 0,5 и 0,6 мм) и алюминия (толщина 1 мм) размером 50×100 мм, из 21 пластины титана (толщина 0,6 мм) и алюминия (толщина 1 мм) размером 120×300 мм. Образцы, полученные сваркой взрывом, подвергали обработке в режиме *реакционного спекания* в муфельной печи при температурах 700 и 900°C в течение 2; 4; 6 и 8 ч.

Синтезированные образцы исследовали методами рентгенофазового анализа (ДРОН-2,  $Co K_{\alpha}$ -излучение), металлографии (Axiovert 200M) и микрорентгеноспектрального анализа (CAMECA).

## Результаты и обсуждение

### *Режим теплового взрыва*

Эксперименты с порошками титана и алюминия в режиме теплового взрыва демонстрируют, что порошковая смесь прореагировала полностью с образованием интерметаллида  $TiAl_3$ . На рис. 2 представлена термограмма процесса синтеза в режиме теплового взрыва. Средняя скорость нагрева смеси Ti/Al на начальном этапе составила 1,27°C/с. При достижении температуры плавления алюминия и в процессе его плавления температура в смеси Ti/Al продолжала повышаться из-за нагрева титана, скорость нагрева при этом снизилась до 0,42°C/с. Продолжительность данного этапа составила ~50 с. Затем наблюдается рост температуры за счет энерговыделения в процессе синтеза интерметаллида. Критическая температура начала реакции составила 700°C – имеет место переходный период в режим теплового взрыва продолжительностью 25 с. Собственно стадия теплового взрыва протекает со скоростью роста температуры 70°C/с за время ~16 с. Максимальная температура в смеси (в продуктах синтеза) достигает 1320°C.

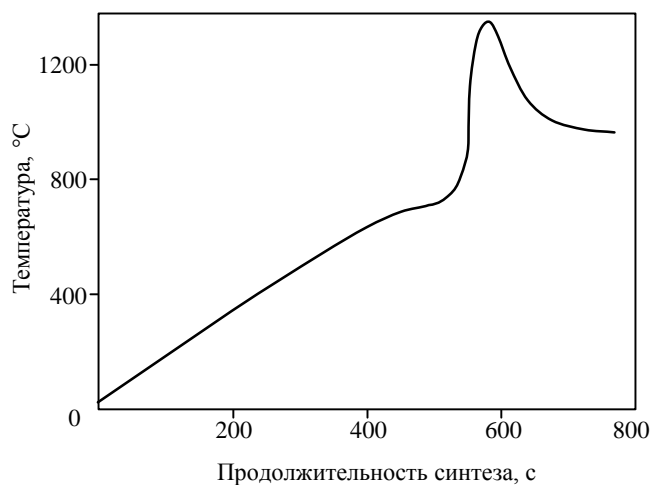


Рис. 2. Термограмма процесса синтеза в режиме теплового взрыва порошков титана и алюминия

На рис. 3 показана структура полученного данным методом многослойного композита, состоящая из титановой фольги и синтезированного из порошковой смеси интерметаллида (светлые слои –  $TiAl_3$ , темные слои – титановая фольга). Образцы характеризуются высокой пористостью, низкой прочностью, а также проблемами с механической и физико-химической совместимостью разнородных материалов на границе раздела между слоями: на границе контакта «титановый слой–синтезированный интерметаллид» образуются участки повышенной пористости.

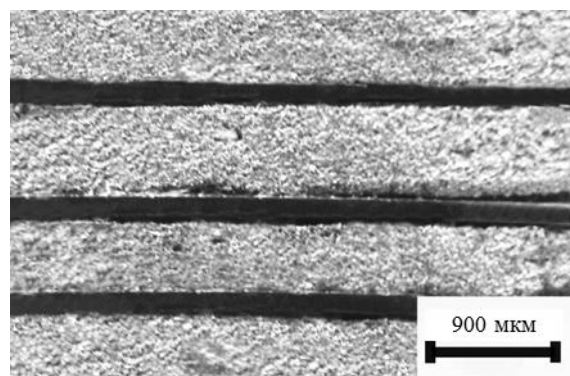


Рис. 3. Структура слоистого композиционного материала, полученного методом теплового взрыва

Результаты экспериментов показывают, что существенное влияние имеет фактор продолжительности процесса. Синтез в режиме теплового взрыва в стехиометрической смеси  $Ti/Al$  протекает быстро – за 15–20 с. За такой короткий промежуток времени не успевают развиваться диффузионные процессы в достаточном объеме. В результате прочная связь между титановой фольгой и синтезируемым интерметаллидом не успевает образоваться.

#### *Реакционное спекание*

В процессе спекания образцов при температуре  $700^\circ C$  уже после 2 ч между титановой и алюминиевой фольгами в результате диффузионных процессов образуются тонкие слои, которые обеспечивают относительно прочную связь между фольгами, хотя алюминий при этом режиме обработки остается и не весь расходуется на образование интерметаллида. При температуре спекания  $900^\circ C$  в течение 6 ч получен слоистый образец, состоящий из чередующихся слоев титана (светлые слои) и интерметаллида  $TiAl_3$  (рис. 4, а). В рентгеновском спектре образца идентифицируются две фазы:  $Ti$  и  $TiAl_3$  (рис. 4, б). Наблюдается неравномерная пористость в слое интерметаллида с ростом пористости (более темные области) в середине слоя.

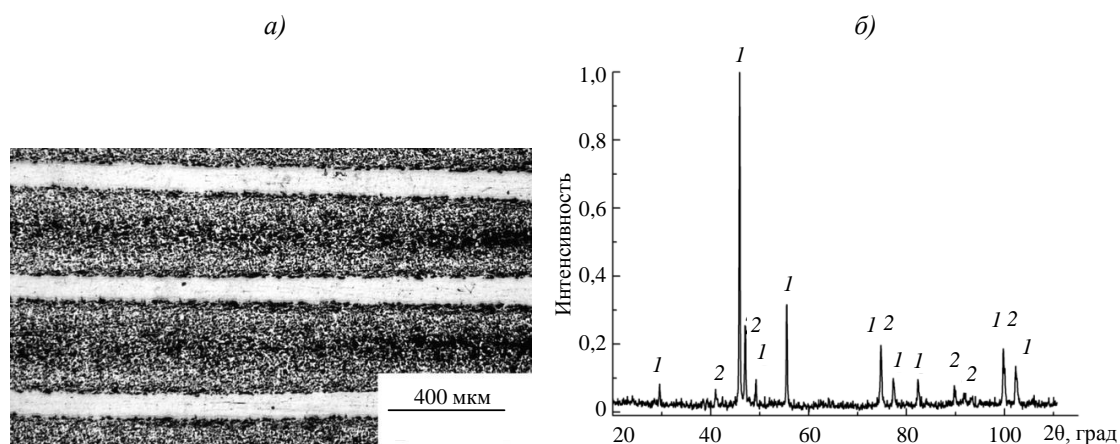


Рис. 4. Структура слоистого композиционного материала после реакционного спекания при температуре  $900^\circ C$  в течение 6 ч (а) и его дифрактограмма (б): 1 –  $TiAl_3$ , 2 –  $Ti$

*Реакционное прессование*

На рис. 5 показана структура образца, полученного методом реакционного спекания, совмещенного с прессованием, из титановой и алюминиевой фольг при температуре 700°C – имеет место прочный контакт между слоями титана и интерметаллида. Поры неравномерно расположены по площади образца, а уровень пористости в интерметаллиде заметно ниже, чем в образцах, полученных вышеприведенными методами. Данные РФА показывают, что слоистый композиционный материал состоит из двух фаз: титана и триалюминид титана.

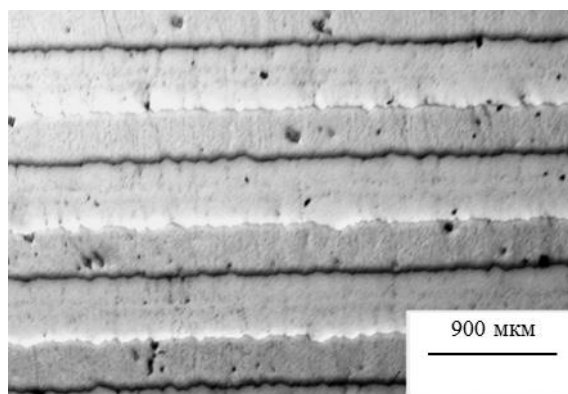


Рис. 5. Структура слоев образца после реакционного прессования

*Сварка взрывом+спекание*

В рамках проекта РФФИ 10-08-02101-э\_к в 2010 г. предложен и реализован метод получения МИСКМ по следующей схеме: сварка взрывом многослойного пакета из пластин титана и алюминия, затем спекание полученного пакета в муфельной печи с подбором параметров «время–температура», исключая давление из управляющих параметров [9, 11]. На рис. 6, а показана структура композиционного материала после сварки взрывом (светлые слои – алюминий, более темные – титан). На рис. 6, б представлена структура композиционного материала после последующего реакционного спекания. После сварки взрывом образуется хорошо сформированная слоистая структура с прочным контактом между слоями титана и алюминия. При контакте на поверхности пластин наблюдается волнообразная форма границ, характерная для подобных экспериментов [23]. После спекания структура композиционного материала выглядит следующим образом – слой алюминия взаимодействует с титаном с образованием интерметаллидного слоя. При увеличении продолжительности спекания в структуре наблюдается уменьшение толщины слоев алюминия до их полного перехода в слой интерметаллида и соответствующее уменьшение толщины слоев титана. Образцы после спекания состоят из чередующихся титановых слоев и слоев триалюминид титана ( $TiAl_3$ ). Волнообразная форма границ сохраняется в процессе спекания.

По мере увеличения продолжительности спекания при температуре 700°C толщина титановых слоев уменьшается из-за расхода материала на образование интерметаллидных слоев. Зависимость толщины титанового слоя от продолжительности реакционного спекания показана на рис. 7. Синтез слоя интерметаллида  $TiAl_3$  протекает с существенно более высокой скоростью в первые 2 ч спекания. Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа все исследуемые образцы после 8 ч спекания состоят только из титана и интерметаллида  $TiAl_3$ .

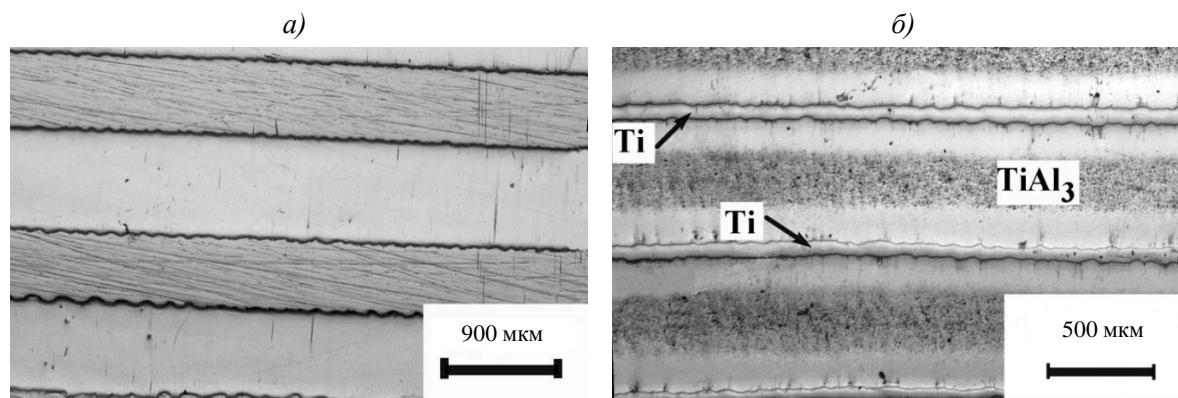


Рис. 6. Слоистая структура композиционного материала после сварки взрывом (а) и последующего спекания при 700°C в течение 8 ч (б)

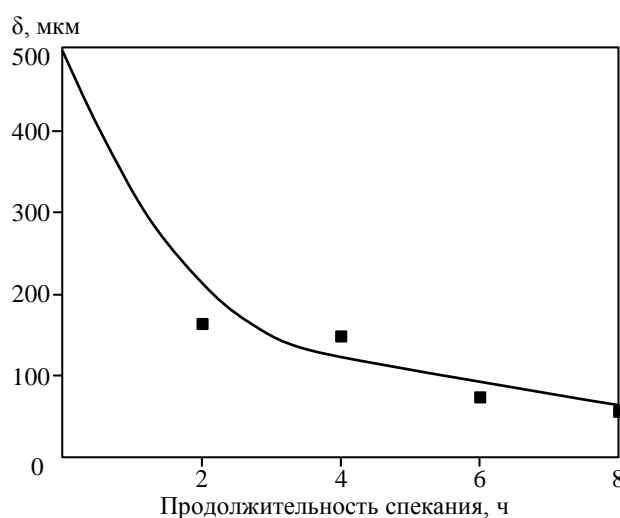


Рис. 7. Изменение толщины титанового слоя ( $\delta$ ) от времени спекания

Характерной особенностью синтеза интерметаллидного слоя при реакционном спекании без прессования является образование прослойки с повышенной пористостью в центре синтезированного слоя, что иллюстрируют рис. 4, а и особенно наглядно – рис. 6, б. Рост пористости обусловлен неравенством коэффициентов диффузии по механизму Френкеля – образование пористости вблизи границ контакта двух твердых веществ в результате возникновения в одном из них избыточных вакансий, вызванных неравенством коэффициента их взаимной диффузии. Такой эффект нивелирует влияние предварительной сварки взрывом, хотя давление, необходимое для предотвращения образования пор, в данном случае может быть ниже, чем без сварки взрывом. Дополнительным преимуществом данного метода получения СКМ является сокращение продолжительности синтеза по сравнению с методом реакционного прессования.

### Заключение

В данной статье рассмотрено четыре метода получения СКМ системы Ti–TiAl<sub>3</sub>: тепловой взрыв, реакционное спекание, реакционное прессование, сварка взрывом+спекание. Экспериментально показана возможность получения требуемой многослойной композиции всеми четырьмя способами. При этом выявлены недостатки, присущие каждому из этих методов. После синтеза в режиме теплового взрыва в интерме-

таллидных слоях образцов отмечается высокая пористость и низкая прочность. Имеются также проблемы с механической и физико-химической совместимостью разнородных материалов на границе между слоями, что приводит к отсутствию прочной связи между титановой фольгой и синтезируемым интерметаллидом. После реакционного спекания также наблюдаются высокая пористость в слое интерметаллида и его низкая прочность, при этом повышенная пористость формируется в середине интерметаллидного слоя. После совместной обработки сваркой взрывом и спеканием также образуется центральный слой повышенной пористости, что снижает прочностные характеристики композита. Метод реакционного прессования частично решает проблему высокой пористости в слое интерметаллида, но тем не менее поры, неравномерно расположенные в слое, присутствуют, что требует дополнительного совершенствования режимов синтеза МИСКМ.

*Авторы выражают благодарность А.М. Пацелову и В.И. Мали за помощь в проведении экспериментов.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 86. №6. С. 520–530.
4. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
5. Vecchio K.S. Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites // JOM. 2005. Vol. 57 (3). P. 25–31.
6. Price R.D., Jiang F., Kulin R.M., Vecchio K.S. Effects of ductile phase volume fraction on the mechanical properties of Ti–TiAl<sub>3</sub> metal-intermetallic laminate (MIL) composites // Materials Science and Engineering. 2011. Vol. A 528 (7). P. 3134–3146. DOI:10.1016/j.msea.2010.12.087.
7. Patselov A., Greenberg B., Gladkovskii S., Lavrikov R., Borodin E. Layered metal-intermetallic composites in Ti–Al system: strength under static and dynamic load // AASRI Procedia. 2012. Vol. 3. P. 107–112. DOI: 10.1016/j.aasri.2012.11.019.
8. Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Проничев Д.В. и др. Свойства интерметаллидных прослоек в слоистых титано-алюминиевых композитах // Известия ВолгГТУ. 2009. №11 (59). С. 35–40.
9. Zelepugin S.A., Mali V.I., Zelepugin A.S., Pina E.V. Failure of metallic-intermetallic laminate composites under dynamic loading // Shock Compression of Condensed Matter. USA, American Institute of Physics. 2012. Vol. 1426. P. 1101–1104. DOI: 10.1063/1.3686471.
10. Зелепугин С.А., Ильина Е.В., Шпаков С.С., Лепакова О.К., Касацкий Н.Г., Шкода О.А. Синтез многослойных композитов и их разрушение при динамическом нагружении // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. Т. 53. №12–2. С. 161–165.
11. Зелепугин С.А., Лепакова О.К., Касацкий Н.Г., Шкода О.А. Новый подход к синтезу многослойных металло-интерметаллидных композитов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2011. Т. 54. №10–2. С. 80–83.
12. Краснов Е.И., Штейнберг А.С., Шавнев А.А., Серпова В.М., Жабин А.Н. Исследование слоистого металлического композиционного материала системы Ti–TiAl<sub>3</sub> // Фундаментальные научные основы современных комплексных методов исследований и испытаний материалов, а также элементов конструкций: сб. матер. молодежной конференции. М.: ВИАМ, 2015. С. 11.
13. Берлин А.А., Штейнберг А.С., Краснов Е.И., Шавнев А.А., Ломов С.Б., Серпова В.М. Экспериментальное исследование получения слоистых композиционных материалов методом

- электротеплового взрыва. Оценка остаточных напряжений // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S6. С. 5–10. DOI 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-5-10.
14. Краснов Е.И., Штейнберг А.С., Шавнев А.А., Березовский В.В. Исследование слоистого металлического композиционного материала системы Ti–TiAl<sub>3</sub> // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 16–19.
  15. Ковтунов А.И., Мямин С.В. Исследование технологических и механических свойств слоистых титаноалюминиевых композиционных материалов, полученных жидкофазным способом // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 9–12.
  16. Пацелов А.М., Гладковский С.В., Лавриков Р.Д., Каманцев И.С. Трещиностойкость слоистых композитов с чередованием слоев TiAl<sub>3</sub>–Ti–Al–Al<sub>3</sub>Ti в условиях статического и циклического нагружения // *Деформация и разрушение материалов*. 2014. №12. С. 7–11.
  17. Lazurenko D.V., Mali V.I., Shevtsova K.E. Structure and properties of Al–Ti multilayered composites with intermetallic layers // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 682. P. 132–137. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.682.132.
  18. Zelepugin S.A., Zelepugin A.S. Failure of multilayer composites under dynamic loading // 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2014); 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM 2014); 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECCFD 2014). Spain, Barcelona. Int. Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). 2014. Vol. 4. P. 3926–3933.
  19. Зелепугин С.А., Шпаков С.С. Разрушение металло-интерметаллидного многослойного композита при высокоскоростном ударе // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2009. Т. 15. №3. С. 369–382.
  20. Зелепугин С.А., Шпаков С.С. Разрушение многослойных металло-интерметаллидных композитов при динамическом нагружении // *Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского*. 2011. №4 (4). С. 1490–1492.
  21. Cao Y., Zhu S., Guo C., Vecchio K.S., Jiang F. Numerical investigation of the ballistic performance of metal-intermetallic laminate composites // *Applied Composite Materials*. 2015. Vol. 22. P. 437–456. DOI: 10.1007/s10443-014-9416-1.
  22. Zelepugin S.A., Zelepugin A.S. Numerical simulation of multilayer composites failure under dynamic loading // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 756. P. 408–413. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.408.
  23. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1972. 188 с.