

Е.И. Краснов¹, А.С. Штейнберг², А.А. Шавнев¹, В.В. Березовский¹

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОИСТОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Ti–TiAl₃

Рассматривается возможность использования метода вакуумного печного синтеза для производства образцов слоистого металлического композиционного материала системы Ti–TiAl₃. Исследовалась микроструктура полученных образцов. Методом рентгеноструктурного анализа показано наличие в материале интерметаллидной фазы триалюминида титана.

Ключевые слова: синтез, слоистый композиционный материал, титан, алюминий, интерметаллид.

E.I. Krasnov, A.S. Steinberg, A.A. Shavnev, V.V. Berezovsky
Study of Ti–TiAl₃ laminate metal composite material

Possibility of using vacuum furnace synthetics method for production of Ti–TiAl₃ laminate metal composites system is considered. Microstructure of produced specimens was studied. Presence of TiAl₃ intermetallic phase was verified by using X-ray structural analysis.

Key words: synthetics, laminate composite materials, titanium, aluminum, intermetallic material.

¹ 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

² Институт химической физики РАН им. Н.Н. Семенова [Institute of Chemical Physics RAS named. N.N. Semenova] berlin@chph.ras.ru

В современной технике все шире находят применение композиционные материалы, что объясняется как их превосходными эксплуатационными характеристиками, так и все более совершенными технологическими процессами их производства [1, 2]. Существенная доля таких материалов с высокими физико-механическими характеристиками принадлежит металлическим слоистым композиционным материалам (МСКМ). Однако несмотря на высокую техническую и экономическую эффективность применения слоистых металлов их производство существенно отстает от потребностей народного хозяйства. Это положение вызвано недостатками существующих технологических процессов производства, которые в ряде случаев не обеспечивают требуемого качества продукции.

Существует множество различных систем МСКМ, разработанных для решения широкого спектра задач. Перспективным является создание МСКМ, в которых чередуются слои хрупкой твердой фазы и слои пластичного вязкого материала. Подобные МСКМ с невысокой плотностью найдут применение в производстве баллонов высокого давления и позволят решить задачи, связанные с транспортировкой сжиженного природного газа (СПГ). На сегодняшний день масса контейнера для транспортировки СПГ равна массе перевозимого топлива, что значительно ограничивает выгоду от использования СПГ. Перспективным также является применение данных материалов в качестве защитных композиционных панелей.

Развитие технологий изготовления таких материалов, методов лабораторных испытаний и компьютерного моделирования механического поведения при динамическом нагружении актуально для развития современного авиационного материаловедения.

Традиционно для синтеза МСКМ применяют сварку взрывом и прокатку с последующей термической обработкой [3, 4]. В данной работе для синтеза МСКМ применяется метод печного вакуумного синтеза [5–7]. Преимущества данного метода в том, что синтез высокопрочных интерметаллидных слоев реализуется непосредственно в процессе взаимодействия слоев реагирующих компонентов, непрореагировавшие слои которых образуют ударно-вязкие преграды, обеспечивающие сопротивление тыльным сколам интерметаллидных слоев, удержание осколков при высокоэнергетических ударных и взрывных нагрузках. Многослойность МСКМ, варьирование толщины слоев и других локальных геометрических характеристик, возможность создания демпфирующих элементов структуры и т. п. – отличительные особенности перспективного многослойного материала, представляющие широкие возможности в оптимизации его конструкции, а использование исходной мягкой металлической фольги позволяет формировать слои сложной формы.

В этой связи значительный интерес представляют МСКМ системы Ti–TiAl₃. Триалюминид титана был выбран из-за его высокой термодинамической стабильности и близкого по значению к титану температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Такое преимущественное образование TiAl₃ удачно, так как его модуль упругости (216 ГПа) и стойкость к окислению выше, а плотность (3,3 г/см³) ниже, чем у других алюминидов, таких как Ti₃Al и TiAl [8, 9].

Алюминий и титан характеризуются существенно разными физическими свойствами и кристаллическим строением. Основным препятствием при сварке алюминия с титаном, кроме значительного различия в физико-механических свойствах соединяемых металлов, является образование при контактом нагреве выше определенных температур промежуточных соединений, резко отличающихся по свойствам от титана и алюминия, которые обладают ограниченной растворимостью и имеют области интерметаллидных фаз [10, 11].

Целью данной работы является подтверждение возможности использования метода печного вакуумного синтеза для производства образцов слоистых металлических композиционных материалов и исследование микроструктуры полученных образцов.

Материалы и методики

В качестве исходных компонентов для формирования слоистого композита использовали титановую фольгу марки ВТ1-0 толщиной 100 мкм и алюминиевую фольгу А5М толщиной 50 мкм.

Очистка фольг должна осуществляться теми же методами, которые отработаны в практике пайки и сварки этих металлов. Эта процедура необходима для обеспечения качественного физического контакта поверхностей исходных металлов. Помимо оксидных пленок и газов, сорбированных на поверхностях металлов, этому контакту препятствуют пыль, грязь и тонкие слои недостаточно отмытой жировой смазки, применяемой в технологии прокатки фольг.

С поверхности алюминиевой фольги загрязнения удаляют с помощью органических и хлорированных растворителей, синтетическими средствами и щелочными растворами. Ускорение процесса чистки и повышение качества обезжиривания эффективно осуществляется с использованием ультразвука.

Проблема уменьшения газосодержания в исходных фольгах титана и алюминия является очень важной. Наиболее подробно она изучалась в работах по пайке и сварке этих металлов. Отмечалось, что выделение газа, преимущественно адсорбированного на паяемых поверхностях Al и Ti, и поступление его в объем расплавленного припоя приводило к появлению пор в шве и снижению прочности паяного соединения.

Микроструктура исследовалась на световом микроскопе Olimpus и с помощью растровой электронной микроскопии (РЕМ). Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на дифрактометре ДРОН-3.

Результаты и обсуждение

Для проведения синтеза исходных фолыг из титана и алюминия была проведена подготовка поверхности фолыг: промывка в воде, сушка, очищение поверхности фолыг ацетоном. После чего фолыги собирали в пакет и проводили процесс дегазации с последующим синтезом в печи. Синтез проводили в вакуумной печи при температуре 640°C и вакууме порядка $1,333 \text{ Па}$ (10^{-2} мм рт. ст.), состоящий, не считая продолжительности прогрева и охлаждения, из следующих двух стадий:

- предварительная дегазация (несжатая сборка) в течение 30 мин;
- синтез МСКМ в процессе термостатирования сжатой сборки в течение 4 ч.

При прогреве на первой стадии наблюдалось падение вакуума с $1,333$ (10^{-2}) до $13,33 \text{ Па}$ (10^{-1} мм рт. ст.), свидетельствующее о реальной и достаточно интенсивной дегазации металла.

На рис. 1 и 2 представлены микроструктуры и рентгенограмма полученного образца МСКМ.

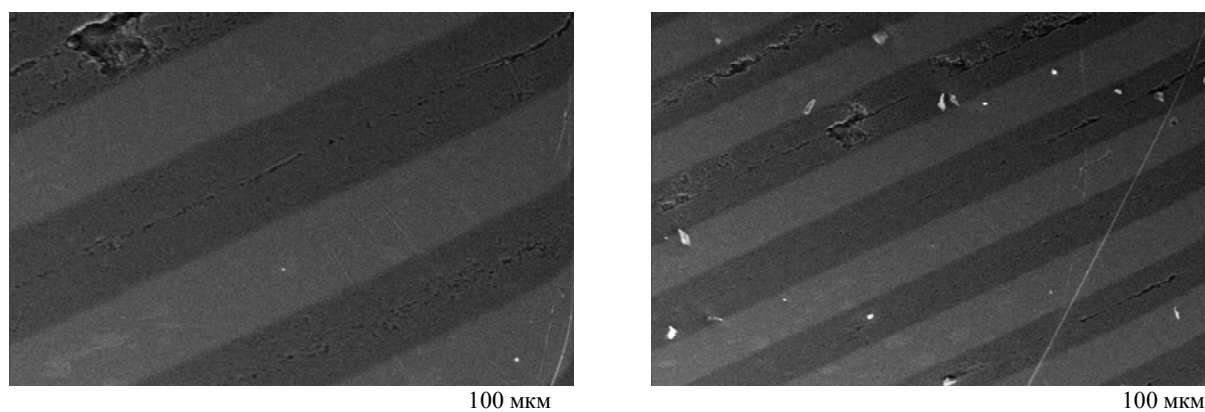


Рис. 1. Микроструктуры полученного металлического слоистого композиционного материала после печного синтеза

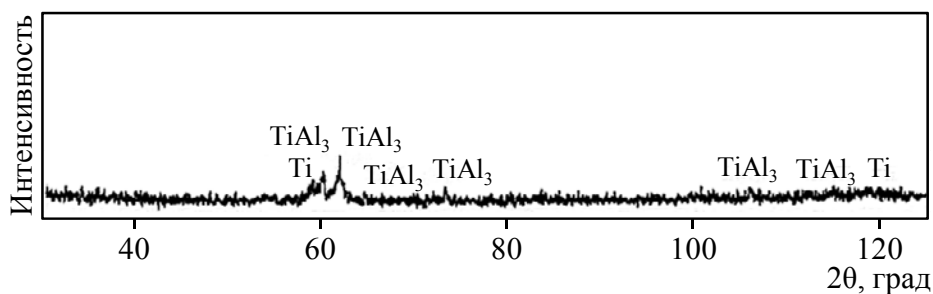


Рис. 2. Рентгенограмма полученного металлического слоистого композиционного материала после печного синтеза

Большое количество микротрещин в слое триалюминида титана, образовавшегося на месте алюминиевой фолыги, может быть объяснено дегазацией газа (преимущественно водорода), в исходном состоянии адсорбированного в поверхностном слое фолыг (прежде всего в алюминии). Этот процесс обусловлен тем, что растворимость

газа в металле падает с ростом температуры и, как правило, в чистом металле она выше, чем в интерметаллиде.

На рентгенограмме четко фиксируются лишь пики титана и триалюминид титана, т. е. только те фазы, которые являются целью настоящего исследования. Наблюдаются локальные очень узкие черные линии, которые, скорее всего, относятся к не фиксируемому РФА непрореагировавшему алюминию.

Проведенный анализ поверхности излома образца слоистого композита показал, что характер разрушения свидетельствует о прочной связи на границе раздела «титан–интерметаллид», материал представляет собой монолит и разрушение носит щеповидный характер. Фотографии излома представлены на рис. 3.

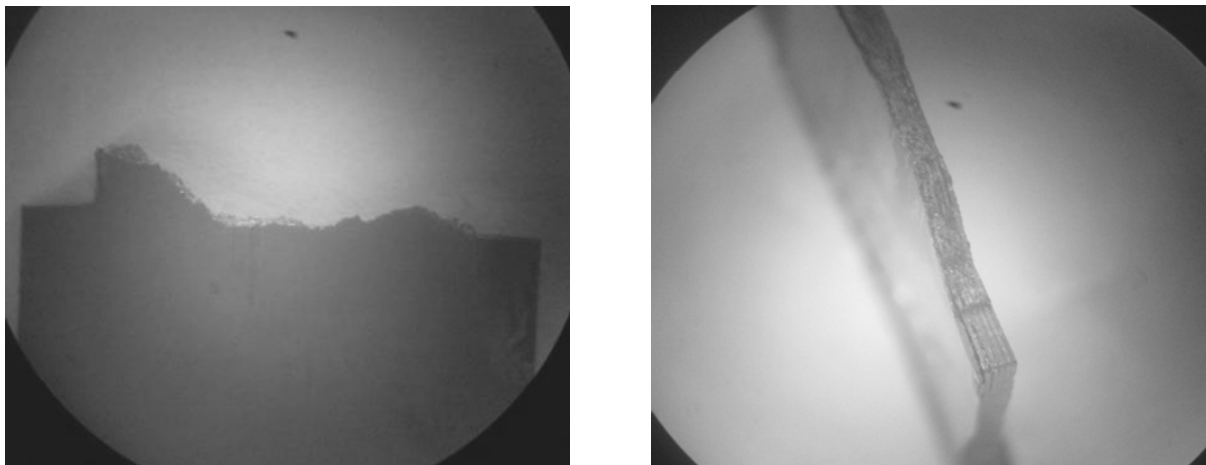


Рис. 3. Поверхность излома металлического слоистого композиционного материала после проведенных испытаний на растяжение

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

Проведены экспериментальные исследования по формированию МСКМ методом вакуумного печного синтеза. Установлено, что образец однородный, титан полностью продифундировал в алюминий с образованием интерметаллидного слоя. Алюминий прореагировал практически полностью, и МСКМ состоит из близких по толщине слоев титана и триалюминид титана. За исключением очень тонкого микрослоя в зоне контакта титана и интерметаллида последний является однофазным, т. е. триалюминидом титана. Состав указанного микрослоя может быть определен методами послойного микрофазового анализа. Анализ фазовой диаграммы «титан–алюминий» свидетельствует о том, что этот слой, скорее всего, состоит из моноалюминид титана TiAl.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
3. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.
4. Трыкова Ю.П., Гуревич Л.М., Жоров А.Н. и др. Комплексные технологии получения тонколистного титано-алюминиевого композита /В сб.: Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы III Всерос. конф. 2005. С. 62–63.
5. Кобелев А.Г. и др. Производство металлических слоистых композиционных материалов. М.: Интермет Инжиниринг. 2002. С. 22–26.

6. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка в вакууме. М.: Машиностроение. 1968. С. 3–8, 28, 108–152.
7. Диффузионное соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов: Сб. трудов XI Межвузовской науч.-технич. конф. /под ред. Н.С. Казакова. М.: Машиностроение. 1971. С. 269–273.
8. Грыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шмургунов В.Г. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов. М.: Metallurgizdat. 2004. С. 9–22.
9. Kenneth S. Vecchio Synthetic Multifunctional Metallic-Intermetallic Laminate Composites //JOM. 2005. V. 57. №3. P. 25–31.
10. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 196–206.
11. Шавнев А.А., Абузин Ю.А., Кочетов В.Н. Оптимизация технологии получения боралюминиевого композиционного материала и его диффузионной сварки с титаном /В сб.: Авиационные материалы и технологии. 2005. №2. С. 16–22.

REFERENS LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 g. [Strategical Areas of Developing Materials and Their Processing Technologies for the Period up to 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 7–17.
2. Antipov V.V. Strategija razvitija titanovyh, magnievyh, berillievyh i aljuminievyh spлавov [Strategics of developing titanium, magnesium, beryllium and aluminium alloys] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 157–167.
3. Grashhenkov D.V., Chursova L.V. Strategija razvitija kompozicionnyh i funkcional'nyh materialov [Development strategics of composite and functional materials] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 231–242.
4. Trykova Ju.P., Gurevich L.M., Zhorov A.N. i dr. Kompleksnye tehnologii poluchenija tonkolistovogo titano-aljuminieвого kompozita [Complex technologies of receiving a thin-sheet titanium-aluminum composite] /V sb.: Innovacionnye tehnologii v obuchenii i proizvodstve: materialy III Vseros. konf. 2005. S. 62–63.
5. Kobelev A.G. i dr. Proizvodstvo metallicheskih sloistyh kompozicionnyh materialov [Production of metal layered composite materials]. М.: Intermet Inzhiniring. 2002. S. 22–26.
6. Kazakov N.F. Diffuzionnaja svarka v vakuume [Diffusive welding in vacuum]. М.: Mashinostroenie. 1968. S. 3–8, 28, 108–152.
7. Diffuzionnoe soedinenie v vakuume metallov, spлавov i nemetallicheskih materialov [Diffusive connection in vacuum of metals, alloys and nonmetallic materials]: Sb. trudov XI Mezhvuzovskoj nauch.-tehнич. konf. /pod red. N.S. Kazakova. М.: Mashinostroenie. 1971. S. 269–273.
8. Trykov Ju.P., Gurevich L.M., Shmurgunov V.G. Sloistye kompozity na osnove aljuminija i ego spлавov [Layered composites on the basis of aluminum and its alloys]. М.: Metallurgizdat. 2004. S. 9–22.
9. Kenneth S. Vecchio Synthetic Multifunctional Metallic-Intermetallic Laminate Composites //JOM. 2005. V. 57. №3. P. 25–31.
10. Nochovnaja N.A., Ivanov V.I., Alekseev E.B., Kochetkov A.S. Puti optimizacii jekspluatacionnyh svojstv spлавov na osnove intermetallidov titana [Ways of optimizing the properties of alloys based on intermetallic titanium] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 196–206.
11. Shavnev A.A., Abuzin Ju.A., Kochetov V.N. Optimizacija tehnologii poluchenija boraljuminieвого kompozicionnogo materiala i ego diffuzionnoj svarki s titanom [Optimization of technology of receiving a boron-aluminium composite material and its diffusive welding with the titan]/V sb.: Авиационные материалы и технологии. 2005. №2. S. 16–22.