

УДК 544.45, 53.091, 53.092

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БОРИДОВ ТИТАНА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СВОБОДНОГО СВС-СЖАТИЯ

П. М. Бажин*, А. М. Столин, А. С. Константинов, А. П. Чижиков, А. Д. Прокопец,
член-корреспондент РАН М. И. Алымов

Поступило 08.05.2019 г.

В работе впервые получены слоистые композиционные материалы на основе борида титана на титановом сплаве ВТ6 (Ti_6Al_4V) методом свободного СВС-сжатия, который реализует условия сочетания процессов горения и высокотемпературного сдвигового деформирования. Установлено слоистое строение полученного материала, изучена особенность строения переходной зоны на границе керамический композит–титановый сплав.

Ключевые слова: слоистый композиционный материал, борид титана, СВС-сжатие, сдвиговое высокотемпературное деформирование.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524883263-266>

В современной промышленности всё более широкое применение находят композиционные материалы, обладающие более высокими показателями статической и динамической прочности, вязкости разрушения по сравнению с традиционными однородными материалами. Среди композиционных материалов большой интерес представляют металлоинтерметаллидные слоистые композиционные материалы (СКМ), представляющие собой многослойную композицию с чередующимися слоями металла и интерметаллида или керамики [1, 2]. Слоистые композиционные материалы характеризуются высокой твёрдостью, механической прочностью, химически инертны и термически стабильны, кроме того, они способны совмещать повышенные электрофизические, магнитные, трибологические и радиопрозрачные свойства [3, 4]. Процесс получения СКМ делится на две технологические стадии: первая – получение макрослоёв, вторая – их консолидация в слоистую заготовку воздействием давлением или за счёт термообработки. Для получения макрослоёв обычно используют прессование, литьё суспензий на движущуюся ленту-подложку либо осаждение. Консолидацию макрослоёв осуществляют горячим прессованием, спеканием, пропиткой расплавом, искровым плазменным спеканием, сваркой взрывом, методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и другими.

Перспективным методом, совмещающим получение макрослоёв и их последующую консолидацию

в одном технологическом цикле за десятки секунд, является свободное СВС-сжатие [5]. Особенностью данного метода является синтез и формование изделия в условиях СВС- и сдвигового высокотемпературного деформирования.

В настоящей работе впервые методом свободного СВС-сжатия были получены слоистые композиционные материалы на основе боридов титана на титановом сплаве ВТ6 (Ti_6Al_4V) и изучены особенности их строения.

В качестве объекта исследования были выбраны материалы на основе бориды титана, которые широко используются в авиационной, автомобильной, металлургической промышленности, медицине и т.д. [6–8]. Исходные порошки титана марки ПТС (45 мкм, 87 мас.%) и аморфного чёрного бора марки Б-99А (1 мкм, 13 мас.%) брали в отношении, нужном для образования соединения TiB и избыточного содержания металлической связки титана в количестве 30 мас.%, которая придаёт пластичность синтезированному материалу при сжатии. Из порошков формовали цилиндрические заготовки диаметром 30 мм, высотой 15 мм с относительной плотностью 0,55–0,6 и размещали их на подложке из сплава ВТ6 (Ti_6Al_4V) площадью 30×30 мм и толщиной 7 мм. После инициирования горения, прохождения волны горения в режиме СВС и заданного времени задержки осуществляли сжатие синтезированного материала плунжером прессы усилием 50 МПа. После сжатия и времени выдержки под давлением 5 с образец помещали в печь на 2 ч с последующим охлаждением при температуре 500 °С для снятия термоупругих напряжений.

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской Академии наук, Черноголовка, Московской обл.

*E-mail: bazhin@ism.ac.ru

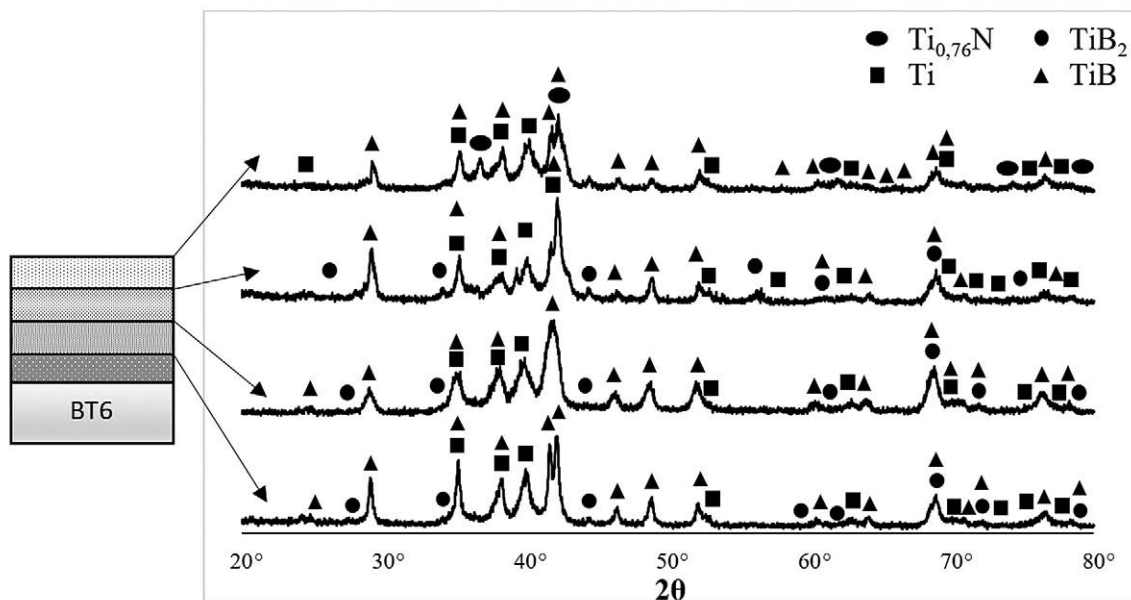


Рис. 1. Результаты РФА поверхности слоёв в СКМ.

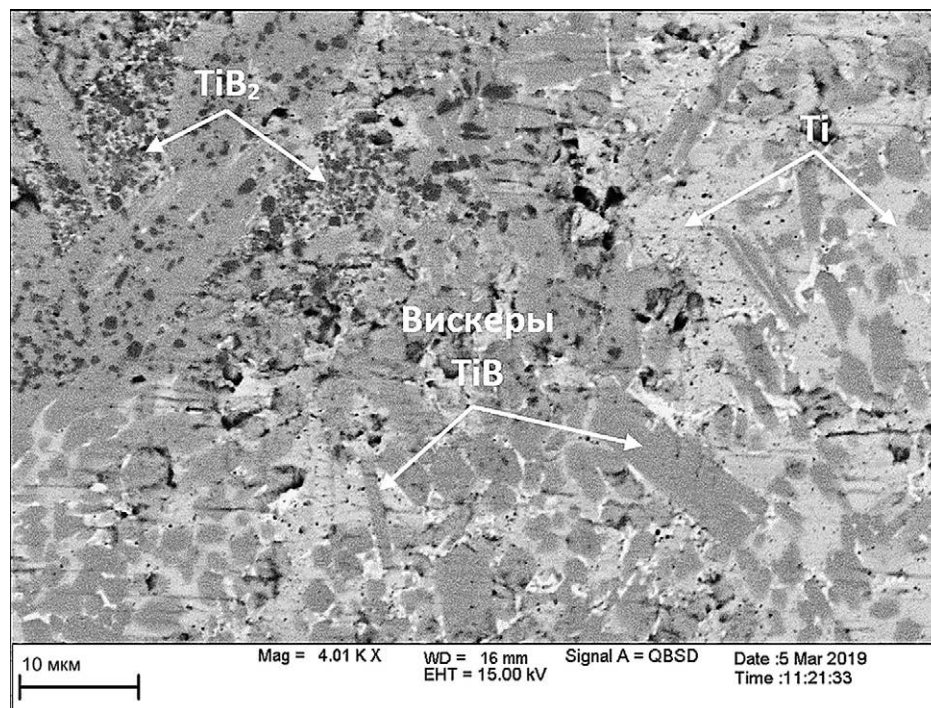


Рис. 2. Характерный вид структуры СКМ.

На основе проведённых экспериментальных работ были получены СКМ площадью 30×30 мм с высотой керамического материала на основе борид титана 5 мм. По результатам РФА (ДРОН-3М, $\text{CuK}\alpha$ -излучение) установлено, что при химическом взаимодействии исходных компонентов бора и титана образуется основная фаза – моноборид титана. Съёмка рентгенограмм велась с каждого слоя толщиной 1 мм в СКМ (рис. 1). Установлено, что на поверхности СКМ за счёт проведения эксперимен-

тов на открытом воздухе и высокой химической активности избыточного титана образовалась дополнительно фаза $\text{Ti}_{0,76}\text{N}$ (кубическая кристаллическая решётка, $a = 4,235 \text{ \AA}$), которая, обладая повышенными значениями твёрдости (до 20 ГПа), улучшает механические характеристики поверхности СКМ. Измеренная микротвёрдость поверхности СКМ составила 8–10 ГПа, что превышает микротвёрдость самой титановой подложки в 4–5 раз. За счёт того, что синтез проходил с плавлением титана

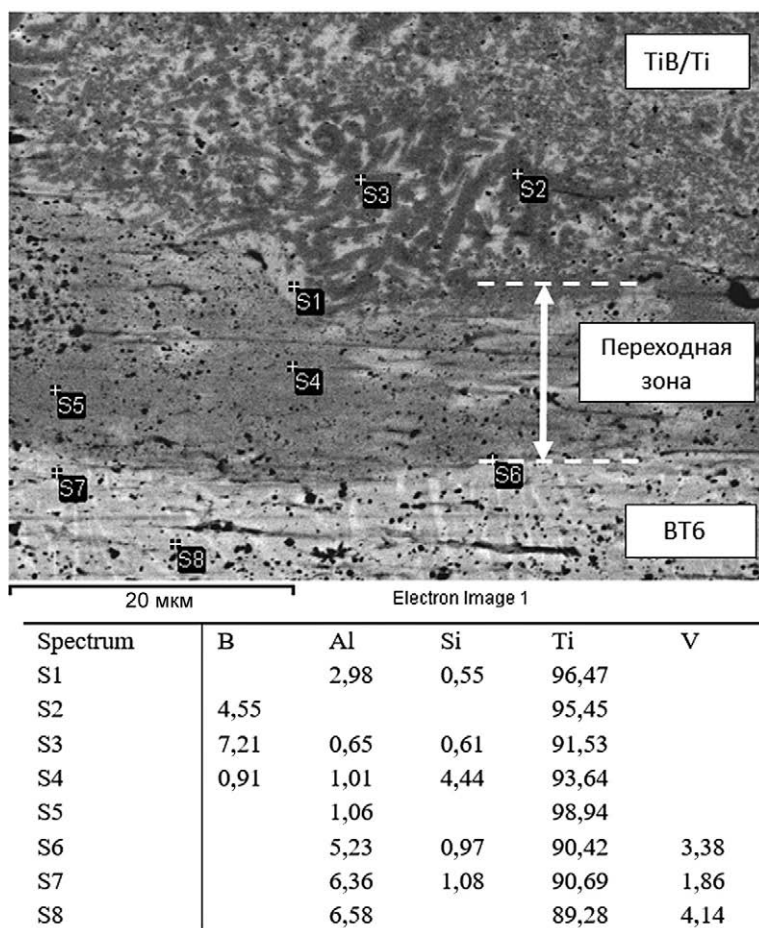


Рис. 3. СЭМ переходного слоя и рентгеноспектральный анализ химических элементов. СЭМ 1450 VP “Carl Zeiss”.

(температура горения выбранного состава составила 1800°C), он в жидком состоянии под действием силы гравитации через поры стремится к подложке, что приводит к некоторому обеднению титаном вышележащих слоёв. В соответствии с фазовой диаграммой Ti–B-кристаллизация моноборида титана происходит по перитектическому превращению из расплава Ti–B, что приводит к тому, что образовавшиеся вначале зёрна TiB₂ из-за нехватки свободного титана остаются в материале и кристаллизуются в виде гексагональных призм размерами менее 1 мкм (рис. 2). По мере приближения к подложке доля титана повышается, а количество зёрен диборида титана снижается (интенсивность соответствующих пиков на рентгенограммах уменьшается).

В условиях эксперимента происходит также плавление поверхностного слоя титанового сплава, и при приложении внешнего давления после прохождения волны горения по образцу происходит взаимодействие (перемешивание) расплавленного титана и алюминия (спектры 1, 4, 5) с синтезированным материалом керамического композита на границе раздела (рис. 3). При этом формируется переходная зона

величиной 10–20 мкм, наличие которой приводит к улучшению адгезионной прочности между слоями. За переходной зоной следует керамический композит, состоящий из характерных игольчатых кристаллов (вискеров) моноборида титана (спектры 2 и 3) с размерами до 15 мкм, расположенных в титановой матрице. За счёт более быстрого остывания поверхности материала из-за её контакта с массивным плунжером пресса поверхность СКМ имеет пористость до 10–20%, которая снижается по мере приближения к подложке. Вследствие высокотемпературного сдвигового деформирования продуктов горения при СВС-сжатии происходит перемещение синтезированного материала в поры и дефекты, что снижает пористость и дефектность образования СКМ. Таким образом, формируются благоприятные условия для получения качественного соединения между синтезированным материалом и подложкой при свободном СВС-сжатии.

На основе проведённых работ была показана принципиальная возможность образования слоистого керамического композита на основе бориды титана на титановом сплаве BT6 (Ti₆Al₄V). Показано

образование слоистого композита за счёт особенностей протекания синтеза на основе реагентов, титана и бора, в используемом соотношении, а также за счёт высокотемпературного сдвигового деформирования, реализуемого в условиях свободного СВС-сжатия.

Источник финансирования. Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда (проект № 18–79–10254).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Зелепугин С. А., Шкода О.А., Лепакова О.К., Зелепугин А.С., Касацкий Н.Г., Шавнев А.А., Краснов Е.И. Синтез металло-интерметаллидного слоистого композиционного материала системы Ti–TiAl₃ различными методами. М.: ВИАМ. 2016. 9 с.
2. Краснов Е.И., Штейнберг А.С., Шавнев А.А., Сернова В.М., Жабин А.Н. Исследование слоистого металлического композиционного материала системы Ti–TiAl₃. М.: ВИАМ, 2016. 3 с.
3. Minatto F.D., Milak P., De Noni A., Hotza D., Montedo O.R.K. Multilayered Ceramic Composites – A Review // *Adv. Appl. Ceram.* 2015. V. 114. № 3. P. 127–138.
4. Cui X.P., Ding H., Zhang Y.Y., Yao Y., Fan G.H., Huang L.J., Geng L., Zheng Z.Z., Chen J.F. Fabrication, Microstructure Characterization and Fracture Behavior of a Unique Micro-Laminated TiB–TiAl Composites // *J. Alloys Compd.* 2019. V. 775. P. 1057–1067.
5. Stolin A. M., Bazhin P. M., Konstantinov A. S., Alymov M.I. Production of Large Compact Plates from Ceramic Powder Materials by Free SHS Compaction // *Dokl. Chem.* 2018. V. 480. P. 136–138.
6. Cui X.P., Fan G.H., Huang L.J., Gong J.X., Wu H., Zhang T.T., Geng L., Meng S.H. Preparation of a Novel Layer-Structured Ti₃Al Matrix Composite Sheet by Liquid-Solid Reaction Between Al Foils and TiB/Ti Composite Foils // *Mater. Des.* 2016. V. 101. P. 181–187.
7. Chen S., Zhao Z.M., Huang X.G., Zhang L. Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Laminated Composites of TiB₂-based Ceramic and 42CrMo Alloy Steel // *Mat. Sci. Eng.* 2016. V. 674. P. 335–342.
8. Zhang L.C., Attar H. Selective Laser Melting of Titanium Alloys and Titanium Matrix Composites for Biomedical Applications: A Review // *Advanced engineering materials.* 2016. V. 18. № 4. P. 463–475.

STRUCTURAL FEATURES OF LAYERED COMPOSITE MATERIALS BASED ON TITANIUM BORIDES BY FREE SHS COMPRESSION

P. M. Bazhin, A. M. Stolin, A. S. Konstantinov, A. P. Chizhikov, A. D. Prokopets,
Corresponding Member of the RAS M. I. Alymov

*Merzhanov Institute of Structural Macrokineitics and Materials Science of Russian Academy of Sciences,
Chernogolovka, Moscow region, Russian Federation*

Received May 8, 2019

The work shows the structural features layered composite materials based on titanium boride on titanium alloy VT6 (Ti₆Al₄V) by the method of free SHS compression, which implements the combination of combustion processes and high-temperature shear deformation. The layered structure of the produced materials was established, the feature of the structure of the transition zone at the boundary of the ceramic composite – titanium alloy was studied in details.

Keywords: layered composite material, titanium boride, SHS-compression, high-temperature shear deformation.