

Неизотермический синтез трибологических композиционных материалов на основе MAX-фаз и соединения AlMgB₁₄

O.K. Лепакова^{}, Н.И. Афанасьев, Р.В. Минин*

Томский научный центр СО РАН, Томск, Россия

^{}klavdievna.K@yandex.ru*

Реферат. В последнее время в качестве новых антифрикционных материалов большой интерес представляют материалы на основе MAX-фаз, которые имеют слоистую структуру, схожую со структурой графита и нитрида бора. Представлены результаты получения методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) композитов на основе MAX-фазы Ti₃SiC₂, модифицированной боридом алюминия-магния AlMgB₁₄. Рассмотрены продукты синтеза, образующиеся при различных соотношениях исходных компонентов. Представлены рентгенофазовый, микроструктурный анализы продуктов синтеза. Показано, что оптимальное количество вводимой добавки (AlMgB₁₄) для синтеза должно составлять 5–10 мас. %.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, MAX-фазы, борид алюминия-магния AlMgB₁₄, трибологические материалы

1. Введение

Развитие современной техники связано с разработкой и внедрением новых материалов, демонстрирующих высокие эксплуатационные характеристики в экстремальных условиях. К числу таких материалов относятся материалы антифрикционного назначения, которые должны характеризоваться низким коэффициентом трения (не более 0.5), высокой износостойкостью [1]. В связи с этим в качестве новых антифрикционных материалов большой интерес представляют материалы на основе MAX-фаз. MAX-фазы представляют собой семейство тройных наноламинатных карбидов или нитридов с гексагональной структурой, химическая формула Mn+1AXn, где M – переходный металл; A – элемент IIIA – VIA подгрупп, а X – углерод и/или азот, n = 1–3 (в настоящее время имеются соединения с n > 3). Благодаря структурным особенностям MAX-фазы обладают уникальной комбинацией свойств, поскольку сочетают в себе характеристики металлов и керамики [1]. Всё это позволяет рассматривать их как перспективные материалы для конструкционных применений во многих областях.

В последние годы активно исследуется карбид титана кремния Ti₃SiC₂. В ряде исследований показано, что керамика на основе Ti₃SiC₂ является перспективным трибологическим материалом, что обусловлено его слоистой структурой, которая схожа со структурой графита, нитрида бора [2]. Проводятся исследования влияния различных присадок (TiC, BN, SiC) в композитах на основе Ti₃SiC₂ на трибологические характеристики с целью использования их в высокотемпературных узлах трения и механических узлах, связанных с износом [3, 4].

Борид алюминия-магния AlMgB₁₄ представляет собой химическое соединение алюминия, магния и бора, которое характеризуется высокой твердостью (25–35 ГПа), низкой плотностью (2.66 г/см³), чрезвычайно низким коэффициентом трения – 0.04–0.05, высоким индексом пластичности H/E-0.14 [5]. Высокие механические и, в первую очередь, трибологические характеристики открывают широкие перспективы его практического применения в качестве износостойких покрытий, а также в составе композиционных материалов.

Целью данного исследования являлось получение методом СВС композиционного материала на основе Ti₃SiC₂ с добавками борида – алюминия магния AlMgB₁₄, исследование влияния добавки на фазовый состав, микроструктуру и свойства (в первую очередь, трибологические) синтезируемых композитов.

2. Материалы и методика эксперимента

Для синтеза Ti_3SiC_2 использовали порошок титана ПТС-2 (0–280 мкм), кремния КР-1 (размер частиц <20 мкм), углерода (сажа марки ПМ-15 с размером частиц <0.5 мкм). Для синтеза $AlMgB_{14}$ брали порошки алюминия АСД-4 (размер частиц <10 мкм), магния МПФ-3 (размер частиц менее 250 мкм), бора чёрного аморфного (размер частиц 1–5 мкм). Готовили смеси с содержанием в реакционных шихтах 1, 5 и 20 мас.% $AlMgB_{14}$. Процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) проводили в реакторе постоянного давления в атмосфере аргона. Фазовый состав синтезированных продуктов определяли с помощью дифрактометра ДРОН – 2 (излучение CoK-alpha). Микроструктуру изучали с помощью оптической и растровой электронной микроскопии. $AlMgB_{14}$ получали методом СВС с помощью химической печи [6]. СВС-образцы системы Al-Mg-14B представляли пористые спёки, которые легко измельчались до размера частиц ~10 мкм.

3. Результаты

$AlMgB_{14}$ получали методом СВС с помощью химической печи [6]. СВС-образцы представляли пористые спёки, которые легко измельчались до размера частиц ~10 мкм. По данным рентгенофазового анализа основной фазой СВ-синтезированного продукта является $MgAlB_{14}$ (~95 мас.%). На дифрактограмме фиксируется также алюмомагнезиальная шпинель $MgAl_2O_4$ (~5 мас.%) (рис.1). На рис.2 приведена структура поверхности излома. Видно, что СВС – продукт представляет из себя пористый спёк, состоящий из частиц $AlMgB_{14}$, размер которых не превышает 2 мкм.

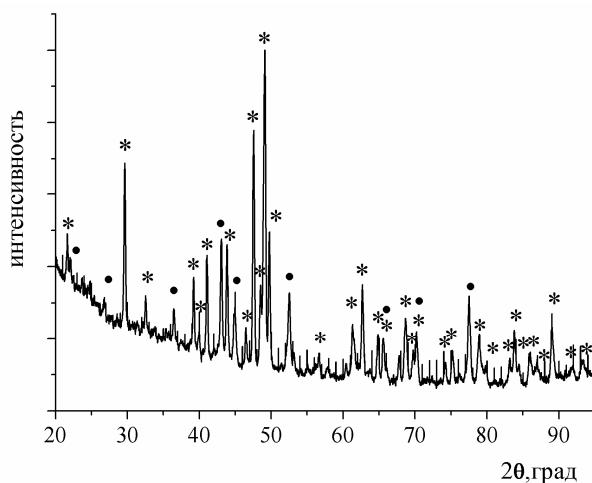


Рис.1. Дифрактограмма синтезированного продукта,
точки * – $AlMgB_{14}$, • – $MgAl_2O_4$.

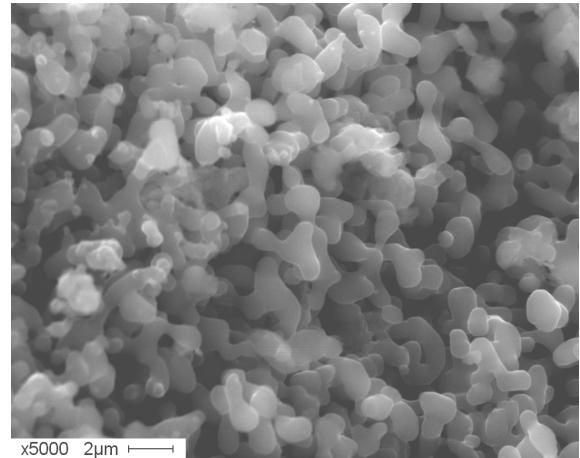


Рис.2. РЭМ – поверхность излома СВС-продукта
 $AlMgB_{14}$.

На рис.3 приведены дифрактограммы продуктов синтеза смесей на основе Ti_3SiC_2 с различным содержанием добавки $AlMgB_{14}$. На рис.3а приведена дифрактограмма продукта, рассчитанного на образование Ti_3SiC_2 . Продукт состоит из Ti_3SiC_2 , TiC и $TiSi_2$. На рис.3б приведена дифрактограмма СВС-продукта состава 99 мас.% Ti_3SiC_2 + 1 мас.% $AlMgB_{14}$. Дополнительно к фазам Ti_3SiC_2 , TiC и $TiSi_2$ на дифрактограмме появились слабые линии, принадлежащие дибориду титана TiB_2 . Введение в исходную смесь 5 мас.% $AlMgB_{14}$ привело к заметному снижению интенсивности основных линий карбосилицида титана и появлению на дифрактограмме линий диборида титана (рис.3в). Увеличение содержания $AlMgB_{14}$ до 20 мас.% привело к существенному изменению фазового состава конечного продукта. В продукте фиксируются диборид титана, карбид титана, карбид кремния и в небольшом

количестве Ti_3SiC_2 (рис.3г). Снижение содержания Ti_3SiC_2 и появление новых фаз при введении в реакционную смесь алюмо – магниевого борида можно объяснить взаимодействием $AlMgB_{14}$ с компонентами реакционной смеси в волне горения, что приводит к нарушению соотношений компонентов для синтеза карбосилицида титана.

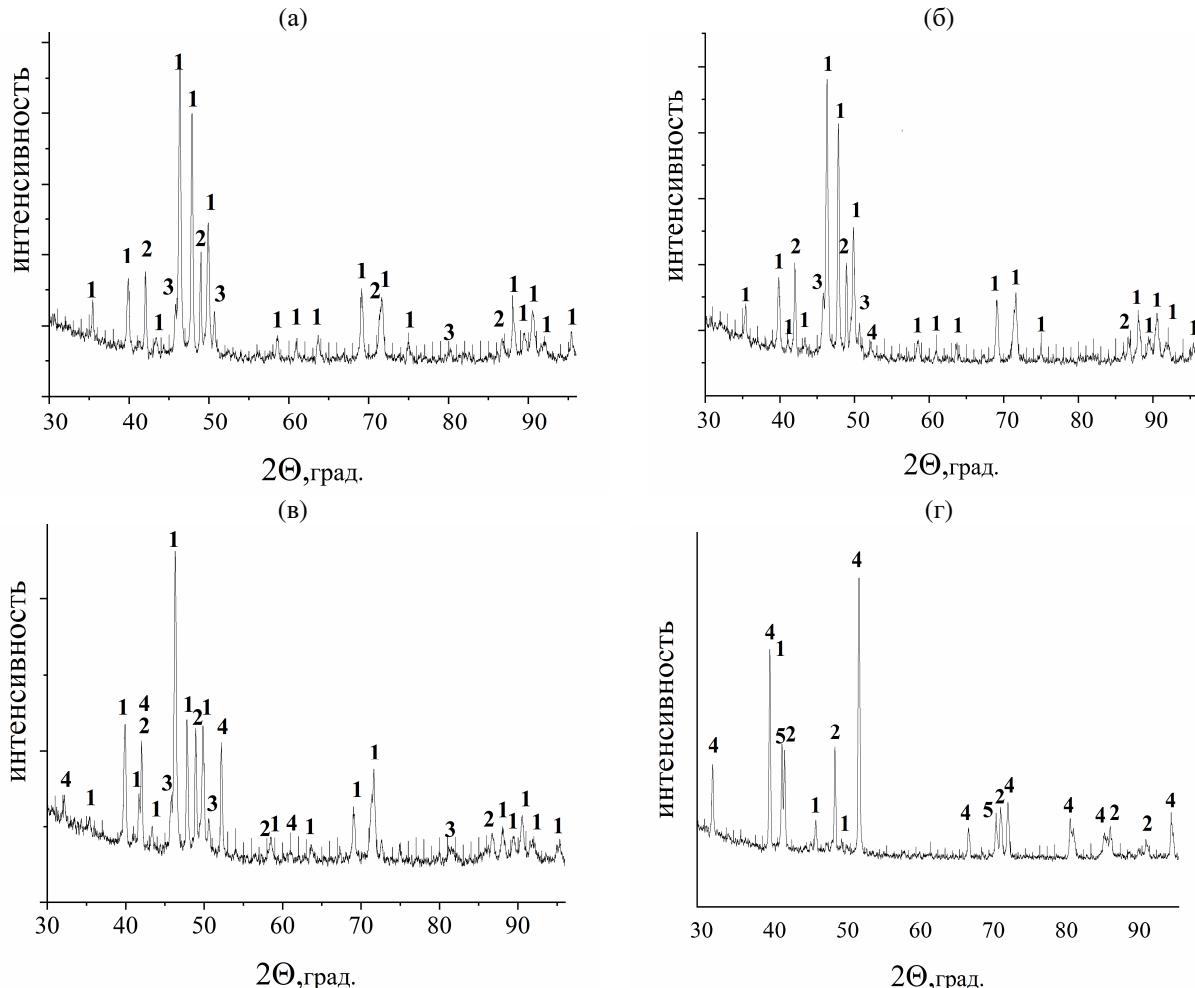


Рис.3. Дифрактограммы CBC – продуктов на основе Ti_3SiC_2 с добавками б – 1, в – 5, г – 20 мас.% $AlMgB_{14}$. 1 – Ti_3SiC_2 , 2 – TiC , 3 – $TiSi_2$, 4 – TiB_2 , 5 – SiC .

Исследования микроструктуры подтверждают результаты рентгенофазового анализа. На рис.4 приведены микроструктуры CBC-продуктов на основе Ti_3SiC_2 с добавками $AlMgB_{14}$. На микрофотографии микроструктуры образца с добавкой 1 мас.% $AlMgB_{14}$ (рис.4а) можно выделить следующие структурные составляющие: пластинчатые кристаллы Ti_3SiC_2 , мелкие округлые частицы светло-серого цвета – карбид титана и более крупные кристаллы тёмного цвета – алюмо-магниевый борид $AlMgB_{14}$. Кристаллы $AlMgB_{14}$ окружены светлыми ободками, что является результатом взаимодействия $AlMgB_{14}$ с компонентами реакционной шихты. Микроструктура образца с добавкой в исходную шихту 5 мас.% $AlMgB_{14}$ показана на рис.4б. Пластинчатые кристаллы Ti_3SiC_2 травлением выявляются менее чётко. Согласно данным рентгенофазового анализа (рис.3в), в продукте фиксируется достаточно большое количество диборида титана. Однако металлографически выявить его не удалось. Наблюдаемые крупные серые частицы – $AlMgB_{14}$. При введении в исходную смесь 20 мас.% $AlMgB_{14}$ в структуре образцов исчезли пластинчатые кристаллы Ti_3SiC_2 . Структура состоит

из мелкодисперсных кристаллов TiB_2 (светлые кристаллы), TiC (розоватого цвета) и SiC (тёмно-серого цвета) (рис.3г).

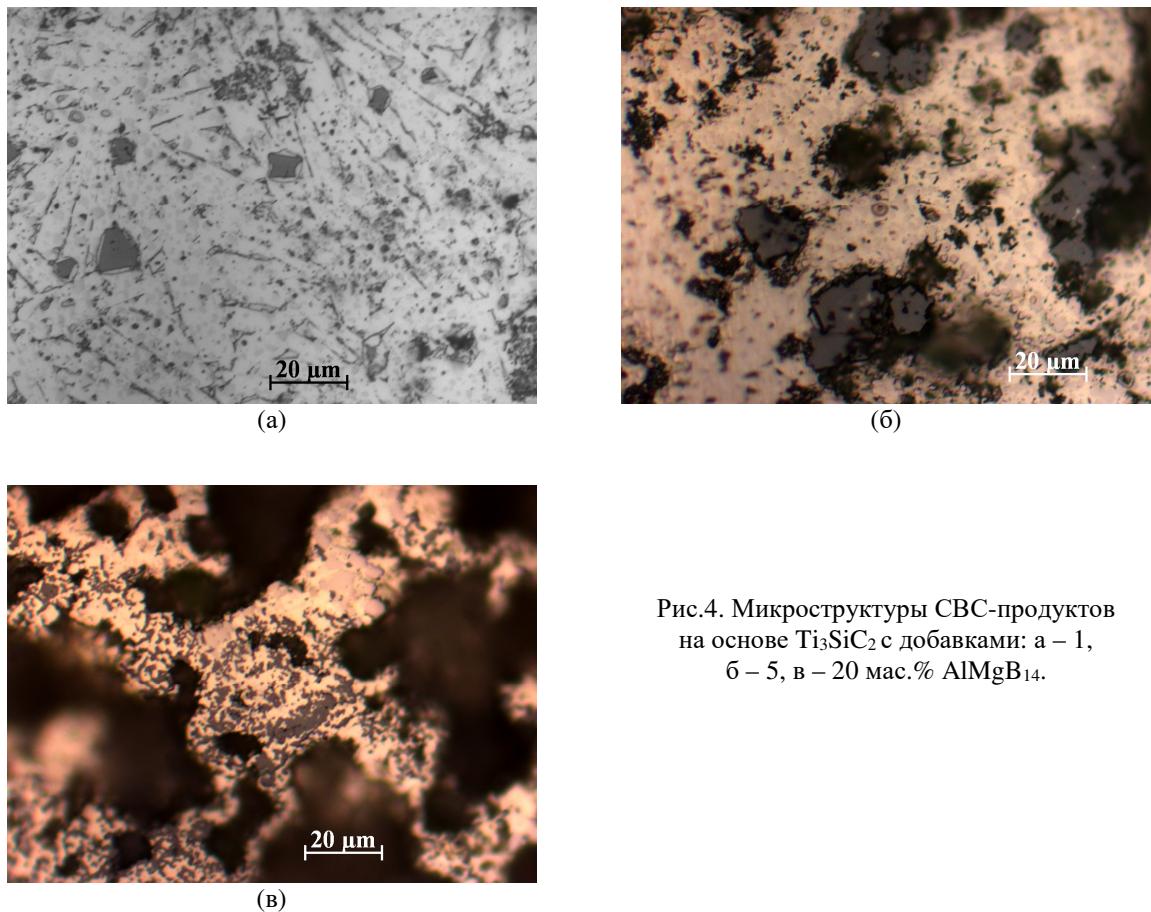


Рис.4. Микроструктуры CBC-продуктов на основе Ti_3SiC_2 с добавками: а – 1, б – 5, в – 20 мас.% $AlMgB_{14}$.

Формирование гетерофазной структуры при введении в исходную шихту 20 мас.% $AlMgB_{14}$ можно объяснить разложением в волне горения борида алюминия-магния и взаимодействием продуктов разложения с компонентами шихты. При этом температура в волне горения должна быть >2250 °C, так как, по данным [7] температура разложения образца « $AlMgB_{14}$ » (94.2 мас.% $AlMgB_{14}$ – 5.8 мас.% $MgAl_2O_4$) составляет 2250 ± 30 °C.

4. Заключение

Исследованиями показано взаимодействие добавки ($AlMgB_{14}$) с компонентами исходной шихты – 3 Ti -Si-2C. Показано, что при введении в исходную смесь 20 мас. % $AlMgB_{14}$ изменяются фазовый состав и микроструктура конечного продукта. Оптимальное количество вводимой добавки ($AlMgB_{14}$) для синтеза должно составлять 5–10 мас.%. Для получения материалов на основе MAX-фаз с более высокими физико-механическими свойствами (включая трибологические) необходимо продолжение данной работы с целью оптимизации как параметров проведения CBC, так и составов исходной шихты.

5. Список литературы

- [1] Barsom M., *J. Prog. Solid State Ch.*, **28**, 201, 2000; doi:10.1016/0079-6786(00)00006-6
- [2] Yuanyuan Z., Aigua Z., Yiqiu J., Jin J., Libo W., Bin W., Qingfeng Z., Myhra S., Summers J., *J. Ceramic International*, **41**, 6950, 2015; doi: 10.1016/j.ceramint.2015.01.150
- [3] Yang I., Gu W., Pan L., Song K., Chen X., Qiu T., *J. Wear*, **271**, 2940, 2011;

doi: 10.1016/j.wear.2011.06.017

[4] Shi X., Wang M., Hu Z., Zhai W., Zhang Q., *J. Mater. Des.*, **45**, 179, 2013;
doi: 10.1016/j.matdes.2012.08.069

[5] Cook B., Harring J., Lewis T., Russell A., *Scripta materialia*, **42**, 2000, P. 597,
doi: 10.1016/S.1359 6462(99)00400-5

[6] Лепакова О.К., Браверман Б.Ш., Афанасьев Н.И. Голобоков Н.Н., *Патент РФ*
№26971146.

[7] Несмелов Д., Удалов Ю., Орданьян С., Данилович Д., Перевислов С., *Четвёртый
междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы
и перспективные технологии»*, Сборник материалов, том III, Москва, Россия, 27–30
ноября, 233, 2018.