

УДК 666.7

**ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ ВОЛОКНАМИ SiC ЛАМИНАТОВ НА ОСНОВЕ $Ti_3Al(Si)C_2$,
ПОЛУЧЕННЫЕ ИСКРОВОМ ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ ПРЕКЕРАМИЧЕСКИХ БУМАГ**

А.Е. Жданов, Е.Б. Кашкаров, Н.С. Пушилина

Научный руководитель: к.т.н. М.С. Сыртанов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: aez14@tpu.ru

**EFFECT OF SiC FIBER REINFORCEMENT OF $Ti_3Al(Si)C_2$ -BASED LAMINATES OBTAINED BY
SPARK PLASMA SINTERING OF PRE-CERAMIC PAPERS**

A.E. Zhdanov, E.B. Kashkarov, N.S. Pushilina

Scientific Supervisor: Ph.D., M.S. Syrtanov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

Email: aez14@tpu.ru

Abstract. *SiC/Ti₃Al(Si)C₂-based composites are analyzed. SiC fibers have a strong influence on the bending strength values and fracture mechanisms of sintered composite materials. It was found that the use of a coating on SiC fibers with subsequent reinforcement of Ti₃SiC₂ laminates increases their strength by 20% compared to laminates with reinforced fibers without coating. The Vickers hardness of reinforced laminates is 9±1 GPa.*

Введение. Материалы на основе SiC_v/Ti₃Al(Si)C₂ МАХ-фазы обладают свойствами характерными как для металлов, так и для керамик, такими как высокая прочность на изгиб, небольшой вес, хорошая коррозионная стойкость, устойчивость к тепловым ударам, а также легко обрабатываются [1]. Кроме того, этот класс материалов является прочным и устойчивым к ползучести, а также демонстрирует высокотемпературную пластичность. Благодаря сочетанию таких свойств данный материал имеет большую исследовательскую ценность.

Для синтеза материалов на основе МАХ-фаз используются различные методы, такие как горячее прессование (ГП) или горячее изостатическое прессование, самораспространяющийся высокотемпературный синтез. (СВС) и искровое плазменное спекание (ИПС). В последнее время интерес представляет получение материалов на основе МАХ-фаз с градиентной структурой. Для этого одним из наиболее перспективных методов является использование прекерамической бумаги, которая позволяет быстро получать многокомпонентные системы. Для упрочнения керамической матрицы используется армирующее волокно. Таким образом, целью данной работы явилось изучение влияния армирования волокнами SiC на структуру и композитных материалов на основе Ti₃Al(Si)C₂, полученных из прекерамической бумаги методом ИПС.

Материалы и методы исследования. В качестве исходного материала использовалась прекерамическая бумага с различным порошковым наполнителем на основе МАХ-фазы. Бумага была изготовлена на динамическом ручном листоформирующем станке D7 по методике, подробно описанной в работе [2]. Искровое плазменное спекание проводилось на машине SPS 10-4. В качестве армирующего

материала использовались непрерывные волокна SiC. Осаждение C-покрытия осуществлялось методом химического осаждения из паровой фазы. Макроструктуру и дефекты спеченных композитных материалов изучали методом рентгеновской компьютерной томографии (КТ) на аппарате OreI-MT. КТ-комплекс оснащен рентгеновской трубкой XWT-160-, рентгеновским детектором PaxScan2520V. Микроструктуру и элементный состав анализировали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием Vega3. Твердость по Виккерсу измеряли с помощью микротвердомера КВ 30S. Расчет прочности на изгиб проводили по формуле:

$$\delta_{\max} = \frac{F}{t^2} \left\{ (1 + \nu) + \left[0.485 \ln \frac{R_d}{t} + 0.52 \right] + 0.48 \right\},$$

где ν – коэффициент Пуассона, F – нагрузка на образец, t – толщина образца, R_d – радиус образца.

Результаты и их обсуждение. Твердость по Виккерсу армированных волокном ламинатов на основе $Ti_3Al(Si)C_2$ составила 9 ± 1 ГПа. Высокая твердость ламинатов по сравнению с чистыми МАХ-фазами обусловлена наличием твердых фаз TiC (~25 ГПа) и/или Al_2O_3 (~18 ГПа). Прочность на изгиб спеченных ламинатов суммирована и сопоставлена с литературными данными в таблице 1. Армирование волокном SiC с углеродным покрытием повышает прочность на изгиб ламинатов на основе SiCf/ $Ti_3Al(Si)C_2$ на 20% (до 990 МПа) по сравнению с ламинатами без покрытия. Полученные результаты находятся на том же уровне или превышают значения, полученные в других работах [3].

Таблица 1

*Механические свойства армированных волокнами ламинатов на основе $Ti_3Al(Si)C_2$
и некоторые литературные данные*

Материал	Прочность на изгиб, МПа	Способ и параметры спекания
Композит на основе $Ti_3Al(Si)C_2$	930±60	ИПС, 1250°C, 50 МПа
Ламинат на основе SiCf/ $Ti_3Al(Si)C_2$	780±40	ИПС, 1250°C, 50 МПа
Ламинат на основе C/SiCf/ $Ti_3Al(Si)C_2$	990±70	ИПС, 1250°C, 50 МПа
Композит на основе Ti_3AlC_2 со вторичными фазами Ti_2AlC и TiC	900	ГП, 1300°C, 25 МПа
Композит Al_2O_3/Ti_3AlC_2	500	ГП, 1400°C, 25 МПа

На рисунке 1 показаны СЭМ изображения поверхности $Ti_3Al(Si)C_2$. На основе СЭМ можно сделать вывод, что волокна SiC не растворяется в матрице, структура имеет расслоения характерные для МАХ-фаз. Границы раздела волокно-покрытие играют важную роль в сопротивлении разрушению за счет прогиба и разветвления трещин на этих границах раздела.

Элементный анализ показывает содержание фазы TiC и Al_2O_3 как примесных композитов.

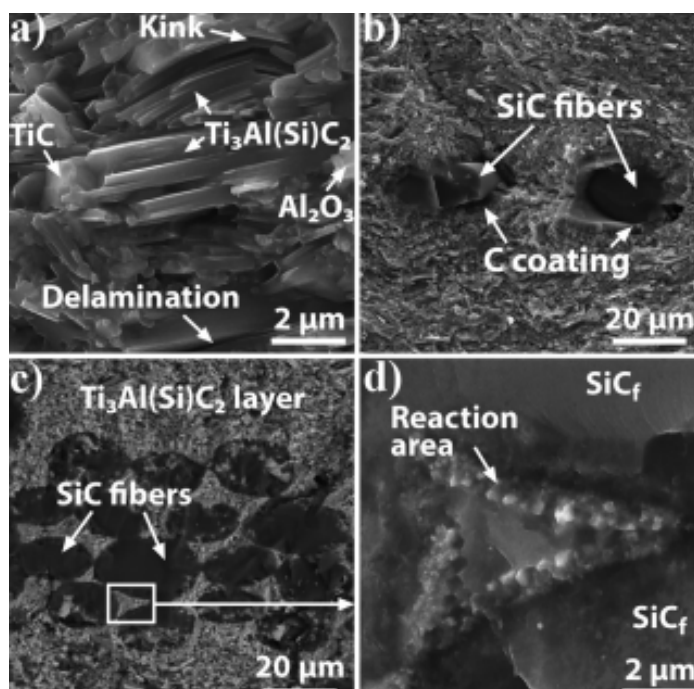


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности разрушения слоя на основе (а) $Ti_3Al(Si)C_2$, (б) слоя $Ti_3Al(Si)C_2$, армированного углеродным покрытием SiC-волокном, (в) слоя $Ti_3Al(Si)C_2$, армированного непокрытым SiC-волокном, и (г) увеличенной площади реакционной зоны между волокном и слоями на основе МАХ-фазы

Выводы. В ходе работы были изучены композиты на основе $SiC_f/Ti_3Al(Si)C_2$. Волокна SiC оказывают сильное влияние на значения прочности на изгиб и механизмы разрушения спеченных композитных материалов. Было установлено, что использование углеродного покрытия на волокна SiC с последующим армированием ламинатов $Ti_3Al(Si)C_2$ повышает их прочность на 20% по сравнению с ламинатами упрочненными волокнами без покрытия. Твердость по Виккерсу армированных ламинатов составляет 9 ± 1 ГПа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта 19-19-00192.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barsoum M.W. The $MN+1AX_n$ phases: A new class of solids: Thermodynamically stable nanolaminates // Progress in Solid State Chemistry. – 2000. – Vol. 28, Issues 1–4. – P. 201-281.
2. Kashkarov E.B., Syrtanov M.S., Sedanova E.P., Ivashutenko A.S., Lider A.M., Travitzky N. Fabrication of Paper-Derived Ti_3SiC_2 -Based Materials by Spark Plasma Sintering // Advanced Engineering Materials – 2020. – Vol. 22, Issues 6. – P. 2000136.
3. Guo S., Hu C., Gao H., Tanaka Y., Kagawa Y. SiC(SCS-6) fiber-reinforced Ti_3AlC_2 matrix composites: Interfacial characterization and mechanical behavior // Journal of the European Ceramic Society. 2015. – Vol. 35, Issues 5. – P. 1375–1384.