

## ЛАМИНИРОВАННЫЕ КОМПОЗИТЫ Nb/Ti<sub>3</sub>Al(Si)C<sub>2</sub>-TiC: МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ И МИКРОСТРУКТУРА

Абдульменова А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИ ТПУ, ИЯТШ, ОБМЗ1,

E-mail: ava75@tpu.ru

МАХ-фазы и композиты на их основе представляют сравнительно новый класс материалов, описываемый общей формулой  $M_{n+1}AX_n$ , где М – переходный металл, А – металл IIIA или IVA периодической таблицы, X – углерод или азот,  $n=1-3$ . Они обладают уникальными свойствами металлов и керамики, такими как высокая температура плавления, малая плотность, высокая прочность и коррозионная стойкость, высокая тепло- и электропроводность [1]. Несмотря на их высокие прочностные свойства при высоких температурах, применение таких композитов в промышленности ограничено из-за их макроскопической хрупкости при низких температурах. Существуют разные подходы для повышения трещиностойкости и улучшения механических свойств материалов [2]. Одним из способов является создание металл/керамических слоистых композитов. Для получения таких композитов был предложен подход, основанный на применении прекерамических бумаг с порошковым наполнителем и металлических фольг из пластичного тугоплавкого металла (ниобия). Для снижения взаимодействия между слоями металла и керамики может быть использован метод искрового плазменного спекания, обеспечивающий высокоскоростной синтез плотных композитов [2]. Целью настоящей работы являлось установление влияния длительности искрового плазменного спекания на микроструктуру и деформационное поведение металл/керамических композитов, полученных из прекерамических бумаг с порошковым наполнителем из МАХ-фазы Ti<sub>3</sub>Al(Si)C<sub>2</sub> и металлических фольг ниобия.

Исходное сырье представляет собой многослойный материал с чередующимися слоями прекерамической бумаги на основе МАХ-фазы Ti<sub>3</sub>Al(Si)C<sub>2</sub> (ТАС) и металлической фольги Nb. Прекерамическая бумага была изготовлена с помощью бумагоделательной машины D7 (Sumet Systems GmbH). Подготовленные бумаги имели следующий состав: 7,3 масс. % волокон целлюлозы, 87 масс. % порошка Ti<sub>3</sub>Al<sub>0,75</sub>Si<sub>0,25</sub>C<sub>2</sub>, 3 масс. % порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 2,7 масс. % добавок для удержания. Фольги Nb укладывались через каждый слой ТАС так, чтобы общее количество слоев составляло 21, а внешние слои были слоями ТАС. Спекание подготовленных стеков проводилось на установке Advanced Technology SPS 10-4 при T = 1250 °C, P = 50 МПа в течение 3, 5 и 20 мин. Микроструктуру и элементный состав спеченных образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на установке Vega 3. Для оценки прочности при изгибе изготовленных композитных материалов были проведены испытания на трехточечный изгиб с использованием испытательной машины А1-7000М (GOTECH). Для механических испытаний были подготовлены прямоугольные балки длиной 18 мм, шириной 2 мм и толщиной 1,7 мм. Расстояние между опорами составляло 16 мм, а скорость перемещения траверсы – 0,05 мм/мин.

В результате спекания композитов сформировалась заданная слоистая структура с чередующимися керамическими слоями, сформированными из прекерамических бумаг, и металлическими слоями из Nb. На границе раздела металл/керамика формируется реакционный слой, обогащенный ниобием, алюминием и кремнием (рис. 1). Формирование данного слоя обусловлено взаимной диффузией элементов МАХ-фазы (преимущественно Al и Si) и Nb. При различных длительностях спекания образуются реакционные слои различной толщины:  $17,0 \pm 1,5$  мкм (3 мин),  $18,3 \pm 0,9$  мкм (5 мин) и  $20,5 \pm 0,2$  мкм (20 мин). Таким образом, с увеличением времени спекания композитов толщина реакционных слоев постепенно увеличивается.

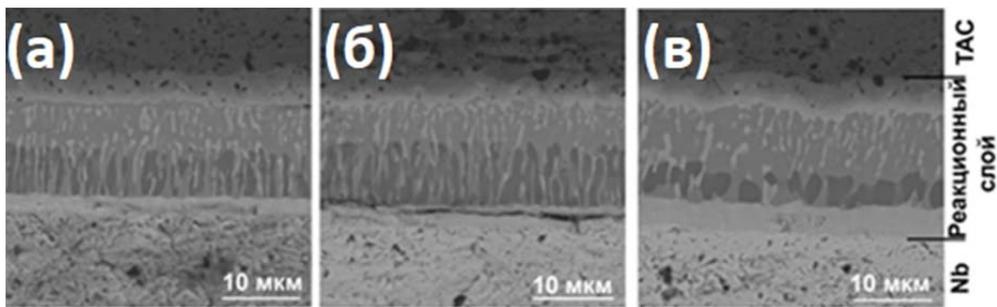


Рис. 1. СЭМ изображения поперечных сечений реакционных слоев ламинированных композитов при времени спекания 3 мин (а), 5 мин (б) и 20 мин (в)

Механические испытания на изгиб продемонстрировали не типичное для хрупких материалов деформационное поведение (рис. 2, а). Полученные ламинированные композиты Nb/TAC имеют хрупко-вязкий механизм разрушения с относительной деформацией более 1 %, что связано со слоистой структурой данных образцов и наличием пластичных слоев Nb. Образование трещин в ламинированных образцах происходит при нагрузке 300 МПа (3 мин), 270 МПа (5 мин), 235 МПа (20 мин) и относительной деформации 0,7 % (3 мин), 0,5 % (5 и 20 мин). При дальнейшей деформации происходит небольшое упрочнение композитов, предел прочности которых составил 320 МПа (3 мин), 330 МПа (5 мин). Анализ данных показал, что при дальнейшей длительности спекания происходит снижение предела прочности на изгиб до 275 МПа (20 мин), что вероятно обусловлено увеличением толщины реакционного слоя и изменением его микроструктуры. Также, ламинированные композиты демонстрируют более высокую работу разрушения, чем монолитные образцы на основе МАХ-фазы  $Ti_3Al(Si)C_2$ . В полученных ламинированных материалах высокая работа разрушения обычно достигается за счет отклонения и разветвления трещин на границах раздела реакционных слоев и пластической деформации слоев Nb (рис. 2, б).

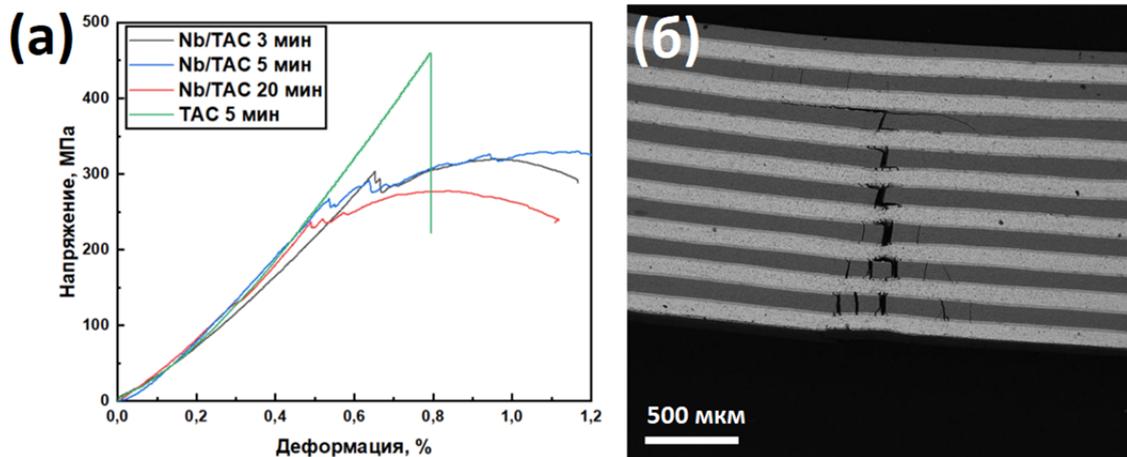


Рис. 2. Деформационные кривые для композита Nb/TAC при различном времени спекания (а). СЭМ изображение поперечного сечения поверхности разрушения при деформации 1,1 % (5 мин) (б)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, проект № 23-19-00109.

### Список литературы

1. Barsoum M.W., Radovic M. Elastic and mechanical properties of the MAX phases // Annual review of materials research. – 2011. – Vol. 41. – P. 195–227.
2. Krotkevich D.G., Kashkarov E.B., Syrtanov M.S., Murashkina T.L., Lider A.M., Schmiedeke S., Travitzky N. Preceramic paper-derived  $Ti_3Al(Si)C_2$ -based composites obtained by spark plasma sintering // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47, № 9. – P. 12221–12227.