

## **АНИЗОТРОПНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МАХ-ФАЗЫ $Ti_3(Si,Al)C_2$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ**

*Ю.Р. Мингазова, студент гр. 0БМ01*

*Е.Б. Кашкаров, к.ф.-м.н. научный сотрудник*

*Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр. Ленина, 30,*

E-mail: [yula.mingazova@mail.ru](mailto:yula.mingazova@mail.ru)

Материалы на основе МАХ фаз являются перспективными для промышленного применения так как обладают набором уникальных свойств характерных для металлов и керамики, таких как высокая температура плавления, высокая тепло- и электропроводность, стойкость к термическим ударам, высокая прочность и коррозионная стойкость [1]. Наиболее хорошо изученными являются МАХ-фазы на основе систем Ti-Si-C и Ti-Al-C [2], свойства которых позволяют их рассматривать для применения в авиакосмической, транспортной и энергетической промышленности.

С целью функционализации могут создаваться функционально-градиентные материалы (ФГМ) на основе МАХ-фаз [3]. В настоящей работе для формирования ФГМ на основе МАХ-фаз системы Ti-Si-Al-C предлагается использования нового подхода, основанного на формировании ламинатов из прекерамических бумаг разного состава с последующим искровым плазменным спеканием (ИПС). Применение прекерамических бумаг позволяет регулировать состав каждого слоя, легко задавать форму листов и обеспечивать равномерную укладку слоев материала [4].

Для формирования ФГМ использовалась прекерамическая бумага с различными порошковыми наполнителями ( $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3Al(Si)C_2$ ). Прекерамическая бумага была изготовлена с помощью бумагодельной машины D7 (Sumet Systems GmbH, Денклинген, Германия). Путем различной укладки, из бумаг с порошковым наполнителем  $Ti_3SiC_2$  (TSC) и  $Ti_3Al(Si)C_2$  (TASC), были подготовлены два “стэка” с различной архитектурой. Первый образец состоял из слоев прекерамической бумаги TSC и TASC, которые были уложены по 3 слоя с четырехкратным повторением (3TASC/3TSC)<sub>4</sub>, наименование образца - ФГМ2-2. Второй образец (ФГМ6-12-6) - 6TASC/12TSC/6TASC. Спекание композитов проводилось методом ИПС на установке Advanced Technology SPS 10-4 в среде вакуума при температуре 1250 °С, давлении 50 МПа, со скоростью нагрева 180 °С/мин в течение 5 минут. Твердость полированных образцов измерялась вдоль поперечного шлифа методом Виккерса на установке KB 30S (Pruftechnik, Германия) при нагрузке 9,8 Н.

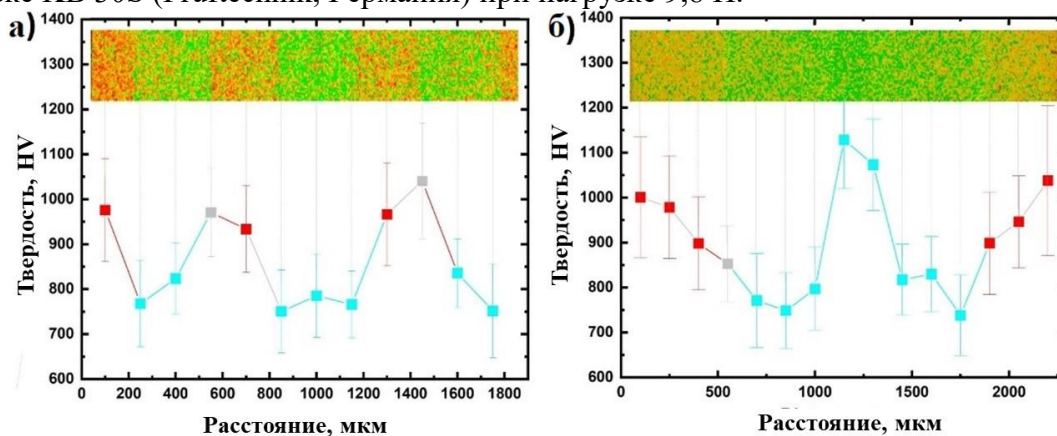


Рис.1. График зависимости твердости градиентных материалов по глубине образца: ФГМ3-3 (а) и ФГМ6-12-6 (б).

Анализ изменения твердости вдоль поперечного сечения проводился на образцах ФГМ3-3 и ФГМ6-12-6. Результаты измерений представлены на рисунке 1. Видно, что

твёрдость слоев композитного материала с преобладающим содержанием МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  варьируется от 740 HV до 820 HV, в то время как твёрдость слоев с  $Ti_3Al(Si)C_2$  выше и варьируется в диапазоне от 880 до 1000 HV. Границы раздела слоев в основном имеют более высокие значения твёрдости, чем слои с МАХ фазой обогащенной кремнием, по-видимому, за счет большего содержания более твердых силицидной и карбидной фаз. Для образца ФГМ6-12-6, можно заметить плавное снижение твёрдости при переходе от внешних слоев  $Ti_3Al(Si)C_2$  и обратный рост этого параметра к центру образца, что связано с повышенным содержанием TiC в данной области.

Индентирование также было использовано для анализа и оценки анизотропии механических свойств ФГМ. Было установлено, что диагональные длины поверхностных отпечатков на поверхности образцов (TTS) почти одинаковы, в то время как на поперечном шлифе (TSS) отпечаток принимает ромбическую форму при той же нагрузке вдавливания (рис. 2). Твёрдость на поверхности TTS (МАХ-фаза  $Ti_3Al(Si)C_2$ ) составила в среднем 10,7 ГПа, на TSS в слое с большим содержанием этой же фазы – 9,5 ГПа. При исследовании анизотропии в слоях на основе  $Ti_3Si(Al)C_2$  также наблюдается аналогичная закономерность: твёрдость TTS составила в среднем 8,7 ГПа, на TSS – 7,8 ГПа.

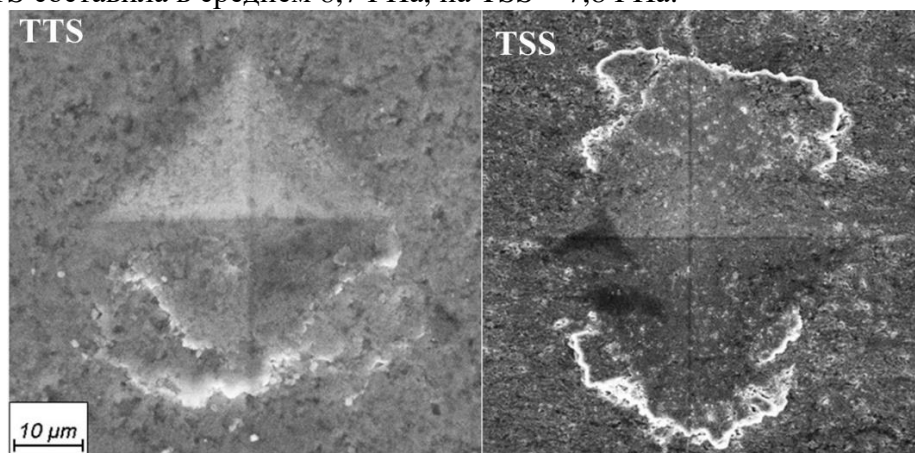


Рис.2. Изображение отпечатков на поверхности (TTS) и поперечном шлифе (TSS) образца

В рамках исследования было показано, что слои композита с преимущественным содержанием  $Ti_3Al(Si)C_2$  являются более твердыми в сравнении со слоями на основе  $Ti_3Si(Al)C_2$ , что обусловлено более высокой долей упрочняющих фаз TiC и  $Al_2O_3$ . Высокие значения твёрдости ФГМ также обусловлены мелкозернистой структурой, формируемой в результате ИПС композитов. Также стоит отметить существенное различие в значениях твёрдости TTS и TSS, которое составляет примерно 11 – 13%, что в свою очередь показывает четкую взаимосвязь между микроструктурой и анизотропными механическими свойствами синтезированных ФГМ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, проект № 19-19-00192.*

#### **Список литературы:**

1. Barsoum M. W., Radovic M. Elastic and mechanical properties of the MAX phases //Annual review of materials research. – 2011. – Т. 41. – С. 195-227.
2. Kisi E. H. et al. Structure and crystal chemistry of  $Ti_3SiC_2$  //Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1998. – Т. 59. – №. 9. – С. 1437-1443.
3. Cai Y. et al. Electrical conductivity and electromagnetic shielding properties of  $Ti_3SiC_2/SiC$  functionally graded materials prepared by positioning impregnation //Journal of the European Ceramic Society. – 2019. – Т. 39. – №. 13. – С. 3643-3650.
4. Travitzky, N., Windsheimer, H., Fey, T. and Greil, P., 2008. Pre-ceramic Paper-Derived Ceramics. Journal of the American Ceramic Society, 91(11), pp.3477-3492.