

КВД приводит к повышению значений микротвердости на середине радиуса дисков по сравнению с исходными состояниями. Изменение микротвердости со степенью деформации происходит немонотонно – на начальных этапах деформирования она изменяется быстрее, а затем выходит на насыщение. Наибольшие значения микротвердости достигаются после  $N=1/4$  (6,5 ГПа) для 2,5V-стали и после  $N=1/2$  (6,0 ГПа) для 0V-стали, рисунок 1. Высокие значения микротвердости образцов исследуемых сталей после КВД связаны с комплексным эффектом твердорастворного упрочнения, субструктурного упрочнения и дисперсионного твердения.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-2086.2019.8) на 2019-2020 гг.*

#### Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы, М.: ИКЦ Академкнига. 2007. – 400 с.
2. Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications//Prog. Mater. Sci. –2008. V.53. pp. 893–979.
3. Gavriljuk V., Berns H. High nitrogen steels. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999. p 378.
4. Dong F.Y., Zhang P., Pang J.C. et al. Strength, damage and fracture behaviors of high-nitrogen austenitic stainless steel processed by high-pressure torsion// Scr. Mater. – 2014. –V 96. – p.5-8.
5. Макаров А.В., Лучко С.Н., Шабашов В.А. и др. Структурно-фазовые превращения и микромеханические свойства высокоазотистой аустенитной стали, деформированной сдвигом под давлением//ФММ. – 2017. – Т.118. №1. – Р. 55-68.

### ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ VN И MWCNT НА ПОЛИМОРФНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ В МАТРИЦЕ $\gamma$ -ТЗР ПРИ РАЗРУШЕНИИ

*И.П. МАРТЫШИНА<sup>1</sup>, А.С. БУЯКОВ<sup>1,2,3</sup>, Д.А. ТКАЧЕВ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет

<sup>2</sup>Томский политехнический университет

<sup>3</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [irinaerofeva1995@mail.ru](mailto:irinaerofeva1995@mail.ru)

Керамические материалы находят широкое применение в различных областях науки и техники. Большинство керамик на основе оксидов, боридов и карбидов металлов существенно превосходят конструкционные стали по прочности и стойкости к высоким температурам и химически-агрессивным средам. Тем не менее, низкая вязкость разрушения и сопротивление распространению трещин ограничивают применение керамических материалов в условиях ударных, или циклических нагрузок.

Основным подходом к увеличению трещиностойкости керамик является их армирование высокомодульными частицами, например углеродными нанотрубками. Прирост трещиностойкости в данном случае происходит за счет затрат энергии распространяющейся трещины на работу трения при вытягивании нанотрубок, возникающих на её пути.

Иным способом повышения вязкости разрушения керамической матрицы является организация условий реализации так называемого механизма Кука-Гордона, заключающегося в рассеивании энергии фронта трещины на относительно слабых межфазных границах матрица-включение. Основным условием реализации этого механизма является пятикратная разница, между модулем упругости матрицы, и низко модульного включения [1]. В работах [2, 3] было показано, что введение низко модульных частиц

гексагонального нитрида бора ( $h$ -BN) в матрицу стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония (Y-TZP) в количестве 0.25 мас. % приводят к существенному приросту трещиностойкости.

Однако остается открытым вопрос вклада трансформационного упрочнения Y-TZP на трещиностойкость композита. Известно, что стабилизированный в тетрагональной модификации диоксид циркония способен испытывать мартенситное превращение в моноклинную модификацию под действием напряжений, в том числе, возникающих во фронте распространяющейся трещины. Моноклинная модификация диоксида циркония обладает меньшей прочностью и модулем упругости, чем тетрагональная, что приводит к рассеиванию энергии трещины и постепенной её остановке.

Целью данной работы являлось оценить влияние частиц MWCNT и  $h$ -BN на реализацию мартенситного тетрагонально-моноклинного превращения в Y-TZP керамике.

В работе исследованы керамические композиционные материалы на основе Y-TZP с армирующими включениями  $h$ -BN, MWCNT и  $h$ -BN и MWCNT одновременно в количестве до 5 мас. %. Керамики получены путем смешивания исходных порошковых составов в шаровой мельнице в среде этанола и последующего горячего прессования при температуре 1800 °C в защитной атмосфере аргона. Давление прессования составляло 40 МПа.

Для исследования реализации мартенситного тетрагонально-моноклинного превращения в композите на основе Y-TZP керамические образцы подвергались сжатию до разрушения в универсальной испытательной машине DevotransGP. Доля моноклинной фазы оценена с помощью рентгеноструктурного анализа по интенсивности рефлексов тетрагональной и моноклинной фаз диоксида циркония.

На рисунке 1 показаны зависимости процентного содержания моноклинной фазы на поверхности разрушения керамического композита. Поскольку анализ фазового состава полированной поверхности образцов керамики Y-TZP не выявил присутствия моноклинной модификации диоксида циркония, то следует считать, что вся моноклинная фаза на поверхности разрушения является результатом мартенситного превращения во фронтальной зоне распространяющейся трещины.

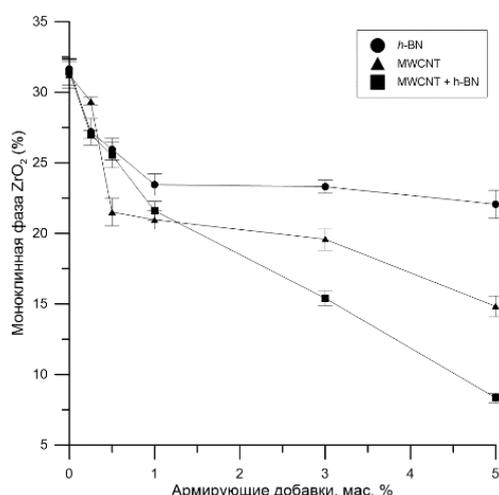


Рисунок 1 – Зависимость доли моноклинной фазы ZrO<sub>2</sub> на поверхности разрушения от количества армирующих включений  $h$ -BN и MWCNT

Согласно полученным данным, мартенситное превращение ZrO<sub>2</sub> имело место как в керамике Y-TZP, так и в керамике, содержащей включения  $h$ -BN и MWCNT. Однако объемная доля моноклинной фазы диоксида циркония в керамике уменьшалась с увеличением объемной доли армирующих включений. Уменьшение объемной доли моноклинной фазы диоксида циркония, образовавшейся при разрушении, может быть

связано с наблюдаемым для Y-TZP композитов уменьшением размера зерна тетрагональной фазы диоксида циркония [4].

Таким образом, показано, что введение армирующих частиц *h*-BN и MWCNT в Y-TZP матрицу позволяет создать условия для возникновения эффекта трансформационного упрочнения путем тетрагонально-моноклинного фазового превращения, что одновременно с реализацией механизма Кука-Гордона и упрочнения с помощью высокомолекулярных углеродных нанотрубок может стать основной для создания толерантных к дефектам структур в керамиках и получить принципиально новый класс материалов, способных к длительной эксплуатации в экстремальных условиях.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00304*

#### **Список литературы**

1. Cook J., Gordon J.E., Evans C.C., Marsh D.M. A Mechanism for the Control of Crack Propagation in All-Brittle Systems. Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci, The Royal Society, 1964, T. 282, № 1391, С. 508–520.
2. Буяков А. С., Мировой Ю. А., Буякова С. П. Влияние низкомолекулярных включений BN на свойства Y-TZP керамики //Перспективные материалы. – 2019. – №. 4. – С. 49-56.
3. Lei Chen, Yihe Huang, Yujin Wang, Haifeng Shen, Jiancun Rao, Yu Zhou // Effect of ZrO<sub>2</sub> content on microstructure, mechanical properties and thermal shock resistance of (ZrB<sub>2</sub>3Y-ZrO<sub>2</sub>)/BN composites. Materials Science & Engineering. 2013, no. 573, pp. 106–110.
4. Mazaheri M., Simchi A., Golestani-Fard F. // Densification and grain growth of nanocrystalline 3Y-TZP during two-step sintering. Journal of the European Ceramic Society. 2008, T. 28, №. 15, pp. 2933-2939.

## **МЕТОД ПРЯМОГО ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ДИОКСИДА ТИТАНА**

*Д.А. НАНЗАНОВ, Ю.Н. ВЫМПИНА*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: [dnanzanov@yandex.ru](mailto:dnanzanov@yandex.ru)

В наши дни диоксид титана TiO<sub>2</sub> является широко известным сорбентом и фотокатализатором. Помимо таких свойств, как низкая стоимость, химическая стабильность и механическая устойчивость, диоксид титана обладает каталитической активностью и нетоксичностью. Порошок диоксида титана используется в радиоэлектронной промышленности, медицине, в частности, для очистки воды и воздуха.

В последнее время возрос интерес к получению наноразмерных порошков диоксида титана. Уменьшение размера частиц позволяет увеличить площадь удельной поверхности материала и уменьшает расстояние до зоны поверхностной реакции [1-3]. Это позволяет увеличить число реакций, происходящих на поверхности частиц, и ведет к лучшему разделению электронно-дырочных пар [4].

В данной работе рассмотрен новый способ получения ультрадисперсного порошка диоксида титана методом плазмодинамического синтеза (ПДС). Преимуществами представленного метода является его быстроедействие (время протекания процесса 10<sup>-3</sup>с), отсутствие необходимости в предварительной подготовке материала и его одностадийность. Помимо этого, метод является безопасным и экологически чистым.

Процесс синтеза основан на генерации высокоскоростной низкотемпературной электроэрозионной плазмы с использованием импульсного сильноточного высоковольтного