

## ОРГАНИЗАЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ ДИССИПАТИВНОЙ СТРУКТУРЫ В КЕРАМИКЕ $ZrO_2$

Е.О. ВАСИЛЬЕВА<sup>1</sup>, А.С. БУЯКОВ<sup>1,2,3</sup>, Ю.А. МИРОВОЙ<sup>2,3</sup>, С.П. БУЯКОВА<sup>1,2,3</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: [alesbuyakov@gmail.com](mailto:alesbuyakov@gmail.com)

Керамики – перспективный материал, обладающий уникальным комплексом свойств: высокая температуростойкость, твердость и сопротивление к износу. Однако по сравнению с металлами и полимерами керамическим свойственна низкая устойчивость к динамическим и ударным нагрузкам ввиду крайне низкой трещиностойкости.

Современное состояние материаловедения в области создания конструкционных композиционных материалов говорит о потенциальной возможности увеличения трещиностойкости керамических материалов за счет создания многоуровневой диссипативной структуры, заключающейся в совокупном действии нескольких упрочняющих механизмов. Такой подход основан на введении в керамическую матрицу армирующих частиц, обладающих резко-дифференцированным, по сравнению с матрицей, модулем упругости.

Известно, что введение низкомолекулярных частиц в матрицу композита способствует проявлению механизма Кука-Гордона при распространении трещины, проявляющемся в её разветвлении при разрыве границы раздела фаз [1]. Введение высокомолекулярных частиц, напротив, создает зачастую непреодолимые барьеры на пути трещины [2]. Кроме того, некоторые керамические материалы, например  $ZrO_2$ , обладают собственным механизмом трансформационного упрочнения, заключающимся в мартенситном переходе из тетрагональной в моноклинную фазу под действием напряжений, возникающих во фронтальной зоне трещины. Такой фазовый переход вызывает локальное увеличение объема и значительное снижение модуля упругости, способствующее торможению трещины.

Целью данной работы является исследование возможности формирования многоуровневой диссипативной структуры в керамоматричном композиционном материале и оценка влияния состава на трещиностойкость.

Предметом исследований является композит на основе стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония Y-TZP, содержащий низкомолекулярные частицы нитрида бора BN и высокомолекулярные многослойные углеродные нанотрубки CNT. Керамоматричные композиты получены с помощью горячего прессования при давлении 40 МПа и конечной температуре 1500 °С.

Трещиностойкость измерена индентированием по методу Виккерса с помощью автоматического индентора Duramin-500 при нагрузке 50 Н и оценена по модели [3]. Величина модуля упругости измерена с помощью ультразвукового дефектоскопа Tektronix TDS200. Пористость измерена методом гидростатического взвешивания.

На рисунке 1 показана зависимость трещиностойкости  $K_{IC}$  от состава. Видно, что наибольший прирост трещиностойкости достигается при низких концентрациях наполнителя композита.

При введении 0,25 мас. % частиц BN происходит резкое увеличение  $K_{IC}$  от 11,5 МПа, соответствующих неупрочненному Y-TZP, до порядка 18 МПа. Композит, содержащий одновременно по 0,125 мас. % частиц BN и CNT показал несколько меньшее увеличение трещиностойкости – до 17,5 МПа. Введение 0,25 мас. % углеродных нанотрубок привело к увеличению  $K_{IC}$  до 13,5 МПа.

Дальнейшее увеличение концентрации армирующих частиц в композите, содержащем BN и BN+CNT приводило к резкому падению величины  $K_{IC}$ , однако при увеличении концентрации CNT трещиностойкость практически не изменяется.

Одновременно с увеличением содержания углеродных нанотрубок происходит рост пористости, вплоть до 18 %, в отличие от 3 %, соответствующих неупрочненному диоксиду циркония, что в свою очередь негативно влияет на трещиностойкость материала.

Таким образом в работе показано, что с помощью одновременного введения низко- и высокомодульных частиц в хрупкую керамическую матрицу возможна организация диссипативной структуры одновременно на нано- и микромасштабах, приводящая к значительно более высокому приросту трещиностойкости, по сравнению с традиционным методом упрочнения с помощью нанотрубок и волокон.

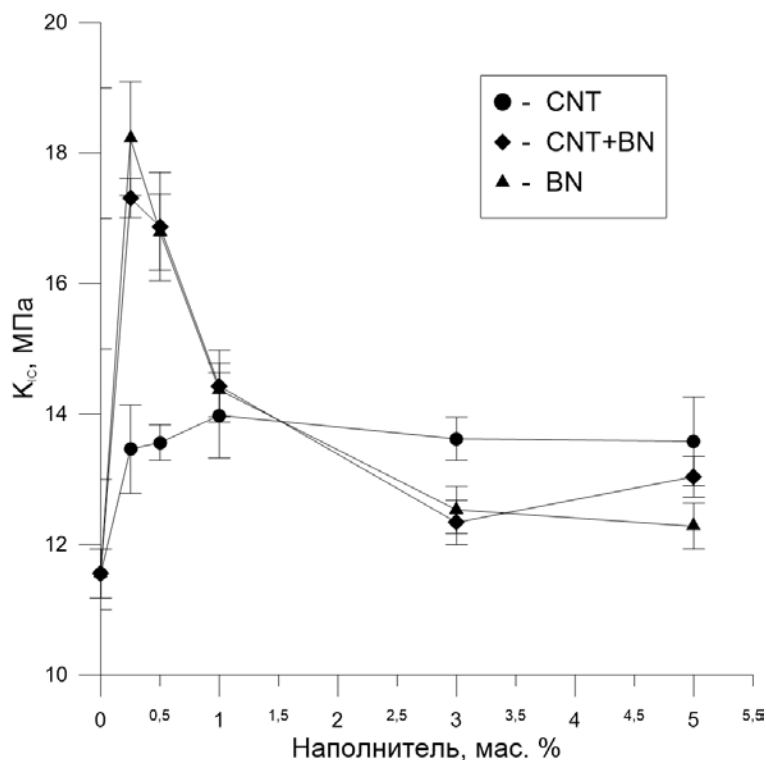


Рисунок 1 - Зависимость трещиностойкости  $K_{IC}$  от мас. % наполнителя

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

#### Список литературы

1. Cook J., Gordon J. E. A mechanism for the control of crack propagation in all-brittle systems //Proc. R. Soc. Lond. A. – 1964. – Т. 282. – №. 1391. – С. 508-520.
2. Zhan G. D. et al. Single-wall carbon nanotubes as attractive toughening agents in alumina-based nanocomposites //Nature materials. – 2003. – Т. 2. – №. 1. – С. 38.
3. Zhan G. D., Kuntz J. D., Wan J., Mukherjee A. K. Zirconia–multiwall carbon nanotubes dense nano-composites with an unusual balance between crack and ageing resistance //Journal of the European Ceramic Society. – 2011. – Т. 31. – №. 6. – С. 1009-1014.