

# НАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ КЕРАМИКИ ДЛЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ «SPARK PLASMA SINTERING»

Болдин М.С., Чувильдеев В.Н., Сахаров Н.В., Шотин С.В., Котков Д.Н.,  
Нохрин А.В.

*Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. г. Нижний Новгород, Россия*  
[Nokhrin@nifti.unn.ru](mailto:Nokhrin@nifti.unn.ru)

В работе описаны результаты исследований структуры и свойств мелкозернистых композиционных керамик на основе оксида алюминия, полученных методом электронно-импульсного плазменного спекания (ЭИПС, в иностранной литературе – «Spark Plasma Sintering»). Метод ЭИПС основан на принципе высокоскоростного нагрева в вакууме или инертной среде образца и пресс-формы пропусканием последовательности миллисекундных импульсов электрического тока большой мощности при одновременном приложении к образцу давления.

Для спекания керамик использовалась установка «DR. SINTER model SPS-625 Spark Plasma Sintering System» (температура спекания до 2500 °С, скорость нагрева до 2500 °С/мин, усилие прессы до 100 кН, импульсный ток до 5000 А, длительность импульса 3.3 мс, защитная среда – вакуум, автоматическое управление температурой и давлением, прецизионный dilatometer). В работе использовались нано (100 нм) – и ультрадисперсные (0,85–1 мкм) порошки  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также ультрадисперсные ( $\leq 1$  мкм) порошки  $\beta$ -SiC и висеры  $\beta$ -SiC-whiskers (длина 50 мкм, толщина 1 мкм) фирм «Alfa-Aesar» и «Taimei Chemicals Co., Ltd».

Анализ микроструктуры образцов проводился с помощью металлографического микроскопа Leica IM DRM и растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6490 с рентгеновским микроанализатором INCA 350. Оценка среднего размера зерна ( $d_{\text{сред}}$ ) и размера зерна аномального роста ( $d_{\text{аном}}$ ) керамики проводилась методом секущих при помощи программного пакета «Good Grains». Твердость по Виккерсу (Hv) измерялась на автоматизированном микротвердомере «Struers Duramin-5» с нагрузкой 2 кг. Трещиностойкость ( $K_{IC}$ ) определялась на основе длины радиальных трещин от отпечатка индентора Виккерса. Значения  $K_{IC}$  рассчитывались по методу Палмквиста.

Показано, что в чистой керамике Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> без добавления активаторов спекания (традиционно получаемой при температурах более 1700 °С) оптимальная температура ЭИП-спекания может быть снижена до 1250–1400 °С, что позволяет формировать высокоплотную (плотность  $\rho = 3.95$  г/см<sup>3</sup>) однородную структуру с малым размером зерна ( $d = 100$ –200 нм) и высокими прочностными свойствами (твердость  $H_v = 20$ –21 ГПа, трещиностойкость  $K_{IC} = 4.0$ –4.4 МПа·м<sup>1/2</sup>).

Проведенные исследования влияния скорости нагрева ( $V_n$ ) на плотность ( $\rho$ ) и средний размер зерна ( $d_{\text{ср}}$ ) показывают, что зависимость  $d_{\text{ср}}(V_n)$  имеет необычный трехстадийный характер с максимумом, соответствующим скорости нагрева 500–900 °С/мин. Анализ полученных результатов показывает, что на первой стадии увеличение скорости нагрева от 10 до 100 °С/мин приводит к незначительному уменьшению размера зерна керамики Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В интервале скоростей нагрева  $V_n = 100$ –900 °С/мин наблюдается существенное увеличение размеров зерен. Причем скорость аномального роста зерен в большей степени зависит от скорости нагрева. При дальнейшем повышении скорости нагрева до  $V_n = 2500$  °С/мин вновь наблюдается уменьшение размера зерна до 1 мкм. (Следует отметить, что это весьма неожиданный результат, поскольку традиционно предполагается, что увеличение скорости нагрева должно приводить к уменьшению среднего размера зерна из-за уменьшения времени протекания диффузионных процессов).

Описаны результаты исследований возможности повышения характеристик твердости, трещиностойкости и износостойкости в керамиках  $Al_2O_3$  за счет введения нано- и ультрадисперсных частиц и вискерев SiC, а также оптимизации режимов ЭИПС. Показано, что формирование в керамиках на основе оксида алюминия высокоплотной композиционной структуры с использованием метода ЭИПС позволяет обеспечить одновременное повышение твердости и трещиностойкости за счет формирования однородной высокоплотной мелкозернистой структуры.

Установлено, что введение армирующих волокон SiC (вискерев) в структуру керамики  $Al_2O_3$ , получаемой методом ЭИПС, приводит к повышению в несколько раз износостойкости керамики в паре трения со сталью как по сравнению с чистым оксидом алюминия, так и по сравнению с керамикой  $Al_2O_3$ , упрочненной нано- и/или ультрадисперсными частицами SiC.

В работе обсуждаются механизмы ЭИПС оксидных керамик. Показано, что ключевым аспектом в процессе спекания этим методом является возможность обеспечения очень высокой скорости нагрева образцов, при которой принципиальное значение приобретают аспекты, связанные с неравновесным состоянием основных элементов дефектной структуры спекаемых материалов. Установлено, что ключевые особенности процессов эволюции структуры в спекаемых керамиках определяются неравновесным состоянием межзеренных и межфазных границ и, в частности, особенностями их взаимодействия с дефектами кристаллической решетки (вакансиями и дислокациями), а также упрочняющими дисперсными частицами второй фазы.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №12-08-01123-а), а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».*

## **СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА КОМПАКТНОГО И ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА В РЕЗУЛЬТАТЕ СИЛОВОГО И ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**Александров В.М., Лобачев В.А., Киршина Н.В.**

*Обособленное хозяйственное структурное подразделение «Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством» (ОХП «НИИ ИП с ОП»), г. Минск, Республика Беларусь,*

[impuls@bn.by](mailto:impuls@bn.by)

Благодаря присутствию в структуре компактно-пористых материалов (КПМ) различных материалов в виде компактной и пористой составляющих, требования, предъявляемые к их свойствам, несколько отличаются от традиционных [1]. Выполненные рядом исследователей работы по изучению работоспособности КПМ показали, что несмотря на то, что воздействие внешней среды испытывает поверхность пористого материала, основной причиной их разрушения является недостаточная связь между материалом пористого слоя и подложки [2], что обуславливает необходимость контроля прочности сцепления (качество соединения) пористой и компактной составляющих.

Измерение прочности сцепления пористой и компактной составляющей компактно-пористого материала заключается в проведении количественного и качественного контроля изделий, а также в изучении процессов, происходящих на границе контакта между пористой и компактной составляющей КПМ и на подложке [3].