

Формирование структуры и свойств композита $MgAl_2O_4:ZrO_2$, полученного методом плазменно-дугового синтеза*

В.В. Шеховцов¹, А.Б. Улмасов¹¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Исследован процесс синтеза и фазообразования композита на основе алюмомагнезиальной шпинели ($MgAl_2O_4$) с введением диоксида циркония (ZrO_2) в среде плазмы дугового разряда. Такие композиты представляют значительный интерес благодаря своей высокой термостойкости, химической устойчивости и отличным механическим свойствам, что открывает широкие перспективы их применения в современной технике. Исследование направлено на выявление влияния ZrO_2 (от 5 до 20 мас.%) на структуру и физические свойства композита $MgAl_2O_4:ZrO_2$. Методом рентгеноструктурного анализа показано, что присутствие катионов Mg^{2+} в расплаве стимулирует стабилизацию ZrO_2 в кубической модификации. Методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа доказано, что введение ZrO_2 приводит к формированию особых межфазных структур, включая локализацию фазы эвтектического состава ($Mg:Al:Zr = 11.40:26.47:27.67$ мас.%) преимущественно по границам зерен с двумя морфологическими признаками: непрерывные дендритные включения и локализованные линейно-столбчатые структурные колонии. Определены особенности спекания керамических изделий на основе продуктов плазменного синтеза в диапазоне температур 1400–1600 °C.

Ключевые слова: шпинель, диоксид циркония, плазменное плавление, синтез, композиты, микроструктура.

Введение

Развитие современных материалов требует постоянного совершенствования технологий синтеза функциональных композитных продуктов с уникальными физико-химическими свойствами [1–3]. Одним из перспективных направлений является получение композиций на основе шпинели ($MgAl_2O_4$), допированных диоксидом циркония (ZrO_2) [4–6]. Эти материалы характеризуются высокой термостойкостью, химической устойчивостью и механической прочностью, что обуславливает их широкое применение в различных отраслях промышленности – от электроники до авиационной техники. Многочисленные исследования, посвященные синтезу и изучению свойств композитов на основе ZrO_2 и алюмомагнезиальной шпинели $MgAl_2O_4$, демонстрируют широкий спектр методов и достигнутых результатов в области материаловедения. Так, согласно данным работы [7], введение добавки в количестве 20 мас.% стабилизированного иттрием диоксида циркония (YPSZ) позволяет существенно повысить твердость материала и вязкость разрушения. Твердость увеличивается с 406 HV до 1314 HV, а вязкость (трещиностойкость) возрастает с диапазона 2.5–3.45 МПа·м^{1/2} до значения 6.1 МПа·м^{1/2}. Оптимальные условия синтеза достигаются при температуре 1600 °C и выдержке продолжительностью два часа. В работах [8, 9] продемонстрировано, что добавление ZrO_2 интенсифицирует процесс образования шпинели и способствует уплотнению ее структуры. Образуется непрерывная сетчатая микроструктура, в которой частицы ZrO_2 формируют взаимосвязанную сетку с частицами MgO и $MgAl_2O_4$. Это обеспечивает равномерное распределение фаз и улучшение механических характеристик материала.

Методы синтеза оказывают решающее влияние на формирование структурных особенностей композитов. Сегодня при создании материалов с участием тугоплавких фаз широко применяется метод искрово-плазменного спекания (Spark Plasma Sintering, SPS), позволяющий формировать высокоплотные композиции с мелкодисперсной структурой, что значительно улучшает их функциональные характеристики. Например, в исследовании [10] было установлено, что использование метода SPS позволяет создавать материалы с размером зерна от 0.5 до 10 мкм, характеризующиеся повышенной стойкостью к деформации и уплотнению. Другим эффективным методом является горячее прессование (Hot Pressing, HP-sintering). Так, при обработке композита путем горячего прессования при температуре 1600 °C и осевом давлении 50 МПа, со скоростями нагрева 100 °C/мин в интервале температур 30–1500 °C и 20 °C/мин в диапазоне 1500–1600 °C, удалось достичь относительной плотности материала 99.61%, твердости 18.29 ГПа и вязкости разрушения при вдавливании 9.15 МПа·м^{1/2} [11].

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003).