

ИССЛЕДОВАНИЕ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ ПОСЛЕ САМОЗАЛЕЧИВАНИЯ МАКРОДЕФЕКТОВ

*М.Е. БАШКЕЕВА¹, А. НАРУЦКАЯ¹, Ю.А. МИРОВОЙ^{1,2}, А.Г. БУРЛАЧЕНКО²,
Е.С. ДЕДОВА^{1,2}, С.П. БУЯКОВА^{1,2}*

¹Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: bashkeeva.maria@yandex.ru

Керамические материалы, имеющие температуру плавления выше 3000 °С и подходящие для конструкционных применений при температуре выше 2000 °С, широко известны как сверхвысокотемпературные керамические материалы (Ultra-high-temperature ceramics (УНТС)). Из-за растущих потребностей в гиперзвуковых аэрокосмических аппаратах, транспортных средствах для повторного входа в атмосферу и применениях в энергетике за последние пару десятилетий возрос интерес к УНТС в целом и к диборидам переходных металлов в частности. Это обусловлено тем, что борид циркония обладает относительно высокой теплопроводностью и стойкостью к высокотемпературному окислению, но вместе с этим низкой вязкостью разрушения и высокой хрупкостью [1].

Целью работы является изучение механических свойств керамики на основе диборида циркония после самозалечивания макродефектов.

Материалами для исследований служили керамические композиты ZrB₂-ZrC-SiC с добавкой ZrO₂ от 0, 5, 10, 15 объёмн. %. Композиционные материалы были получены спеканием под давлением 50 МПа при температуре 1900 °С с изотермической выдержкой в течение 10 минут в среде аргона. Фазовый состав композитов анализировался по рентгеновским дифрактограммам, полученным при CuKα излучении.

Вязкость разрушения керамических материалов осуществлялась по методу SEVNB (Singleedge V-notch beam), согласно которому разрушение прямоугольной балки с V-образным надрезом осуществляется при трехточечном изгибе в соответствии со стандартом ISO 23146:2008 [2]. Расчет коэффициента трещиностойкости (K_{Ic}) керамических материалов осуществлялся по формуле:

$$K_{Ic} = \frac{F}{B\sqrt{W}} * \frac{S_1 - S_2}{W} * \frac{3\sqrt{a}}{2(1-\alpha)^{1.5}} * Y,$$

$$\text{где } Y = 1,9887 - 1,326\alpha - \frac{(3,49 - 0,68\alpha + 1,35\alpha^2)\alpha(1-\alpha)}{(1+\alpha)^2}$$

α – относительная глубина надреза, $\alpha = a/W$; F – нагрузка разрушения, МН; S_1 – расстояние между центрами нижних опор, м; S_2 – расстояние между центрами верхних опор, м; B – ширина образца, м; W – толщина образца, м; a – среднее значение глубины концентратора, м.

Зависимость изменения относительной плотности от содержания диоксида циркония представлены на рисунке 1. Видно, что плотность увеличивалась по мере увеличения объемной доли диоксида циркония. Для керамики ZrB₂-ZrC-SiC относительная плотность составила 0,9±0,006, а при содержании диоксида циркония 15 об. % плотность составила 0,95±0,005. [3].

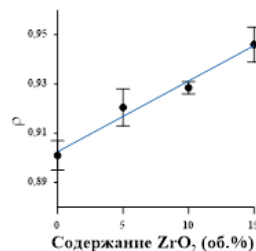
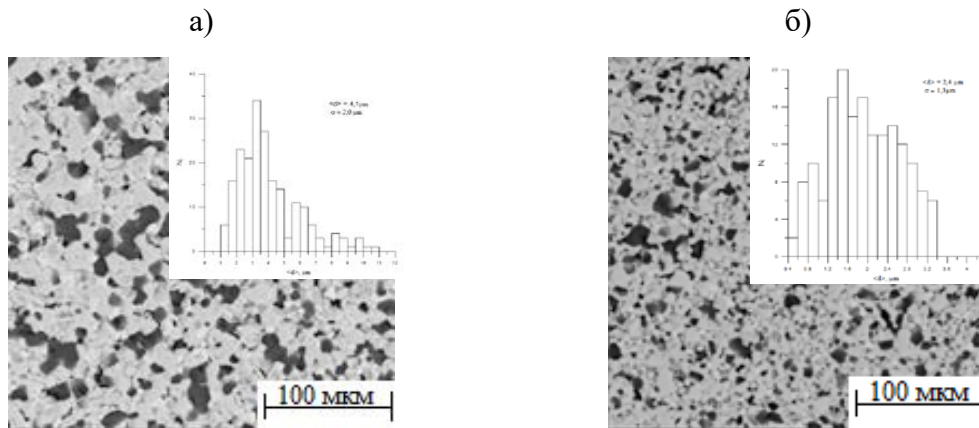


Рисунок 1 – Зависимость относительной плотности керамики ZrB₂-ZrC-SiC от содержания ZrO₂

На рисунке 2 представлены изображения микроструктуры композитов $ZrB_2-ZrC-SiC$, отличных содержанием диоксида циркония. Средний размер зерен в композите $ZrB_2-ZrC-SiC$ составил $4\pm 0,14$ мкм, в композите, с добавкой 15 об. % диоксида циркония, $2,4\pm 0,1$ мкм. Распределение частиц по размерам носило унимодальный характер для композитов всех составов. Рентгенофазовый анализ показал, что полученные композиционные материалы были представлены ZrB_2 в гексагональной фазе, ZrC в кубической модификации и SiC в гексагональной сингонии. По мере введения диоксида циркония в состав исследуемых композитов, рефлексы тетрагонального ZrO_2 появлялись и их интенсивность росла.



а) $ZrB_2-ZrC-SiC$, б) $ZrB_2-ZrC-SiC - 15\text{об}\%ZrO_2$

Рисунок 2 – Изображение и распределение частиц по размерам композитов на основе $ZrB_2-ZrC-SiC$

Увеличение содержания диоксида циркония привело к росту K_{IC} , так, например, для керамики $ZrB_2-ZrC-SiC$ составил $4,2\pm 0,08$ МПа*м^{1/2}, а для композита с содержанием 15 об. % ZrO_2 трещиностойкость составляла $5,7\pm 0,1$ МПа*м^{1/2}.

Коэффициент трещиностойкости керамики $ZrB_2 - ZrC - SiC - ZrO_2$ после термического воздействия увеличивался. Так, величина коэффициента трещиностойкости составила $5,9\pm 0,1$ МПа*м^{1/2} для керамики $ZrB_2 - ZrC - SiC$, нагретой до 1400 °С. По мере роста объемного содержания ZrO_2 вязкость разрушения увеличивалась и составила $11\pm 0,25$ МПа*м^{1/2} для керамики $ZrB_2 - ZrC - SiC - 15 \text{ об.}\%ZrO_2$ после нагрева до 1600 °С.

Механические испытания композитов $ZrB_2-ZrC-SiC-ZrO_2$, проведенные до и после нагрева при различных температурах и, как следствие, самозалечивания дефектов, показали, что реализуется механизм самовосстановления свойств.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИФПМ СО РАН, проект III.23.2.3.

Список литературы

1. Justin, J.F. Ultra high temperature ceramics: densification, properties and thermal stability/ J.F. Justin, A. Jankowiak // AerospaceLab Journal. – 2011. – Iss. 3., AL03-08. – P. 1-11.
2. ISO 23146:2008 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test methods for fracture toughness of monolithic ceramics — Single-edge V-notch beam (SEVNB) method.
3. Ryo I. et al. Oxidation of ZrB_2 and its composites: a review// J Mater Sci. 2018. 53. Pp. 14885–14906.