

Анализ структуры и свойств композиционного материала с наноструктурным покрытием показал, что активные атомы кремния и углерода покрытия обеспечивают превращение SiC в покрытие при более низких температурах. При нагреве до температуры 1550 °С графитации алмазов не наблюдается, так как кристаллы алмаза находятся в прочной оболочке карбида кремния, которая не дает возможности кубической решетке алмаза перестроиться в гексагональную с увеличением объема материала. Присутствие в структуре материала оксида алюминия повышает его теплопроводность. Следует отметить, что более высокие технологические характеристики исходных алмазов АСМ 14...10 по сравнению с кристаллами АСМ 7...5 обеспечивают получение качественных наноструктурных покрытий, которые формируют более высокие свойства композиционного материала алмаз – карбид кремния.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Гордеев, С.К.* Композиты алмаз – карбид кремния – новые сверхтвердые, конструкционные материалы для машиностроения / С.К. Гордеев // Вопросы материаловедения. 2001. № 3. С. 31 – 40.
2. Структурообразование карбидокремниевой матрицы в композиции алмаз – карбид кремния / В.Н. Ковалевский [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. 2005. № 5. С. 8 – 14.

УДК 666.792.6

**Е.С. ГОЛУБЦОВА**, канд. техн. наук,  
**Б.А. КАЛЕДИН**, канд. техн. наук,  
**Д.И. ПЛОТНИКОВ** (БНТУ),  
**Н.Б. КАЛЕДИНА** (БГТУ)

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ НАНОМЕТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ КАРБИДА КРЕМНИЯ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ НИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ**

Композиционные материалы с керамическими матрицами могут быть подразделены по размеру структурных единиц на две группы: микрокомпозиты и нанокомпозиты [1]. Упрочняющие фазы, имеющие линейные размеры на уровне микрометров (дисперсные частицы или нитевидные кристаллы), распределены по границам зерен основной (матричной) составляющей. Главная цель введения упрочняющих фаз состоит в повышении трещиностойкости. Нанокомпозиционные материалы по структурному признаку могут быть подразделены на интер- и интер/нано-типы [2]. Для первого и второго типов характерно распределение дисперсных частиц упрочняющей фазы в пределах или по границам

зерен матричной фазы соответственно. При этом обеспечивается повышение таких свойств, как твердость, трещиностойкость, прочность, не только при комнатной температуре, но и при высоких температурах. Нано/нано-структурные композиционные материалы состоят из нанодисперсных частиц обеих фаз. Такая структура обеспечивает повышение не только трещиностойкости и прочности, но и механической обрабатываемости и высокотемпературной пластичности.

Для изготовления нанокompозитов могут быть использованы процессы порошковой металлургии и керамической технологии (смешивание компонентов, формование, спекание без или с применением давления, включая горячее изостатическое прессование).

В ходе исследований был проведен эксперимент для изучения влияния содержания наночастиц SiC размером  $\approx 1$  мкм и температуры испытаний на трещиностойкость ( $K_{1c}$ , МПа·м<sup>0,5</sup>) и предел прочности ( $\sigma_B$ , МПа) в композите Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> – SiC.

Для проведения эксперимента был выбран план 3 × 3 [3], где 3 – три уровня содержания наночастиц SiC (5, 20 и 35 % (по объему)) и три уровня температуры испытаний (1200, 1300 и 1400 °C).

Ошибка воспроизводимости результатов опытов не превысила 1% от среднего значения и соответственно для  $y_1 = K_{1c}$  составила  $S_1 = 0,06$  МПа·м<sup>0,5</sup> и для  $y_2 = \sigma_B - S_2 = 5$  МПа.

В качестве параметров оптимизации были выбраны трещиностойкость  $K_{1c}$  и предел прочности  $\sigma_B$  ( $y_1$  и  $y_2$  соответственно), а в качестве управляемых факторов – содержание SiC ( $x_1$ ) и температура испытания ( $x_2$ ).

Матрица плана 3 × 3 и результаты опытов приведены в табл. 1, где  $x_1$  и  $x_2$  – кодированные уровни факторов.

Таблица 1

Матрица плана 3 × 3

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$y_1$	$y_2$
1	–	–	+	+	+	5,26	692
2	–	0	0	+	0	5,60	815
3	–	+	–	+	+	6,00	939
4	0	–	0	0	+	6,24	1385
5	0	0	0	0	0	6,64	1508
6	0	+	0	0	+	7,04	1632
7	+	–	–	+	+	5,44	985
8	+	0	0	+	0	5,84	1108
9	+	+	+	+	+	6,24	1231

После обработки результатов опыта по методике, приведенной в работе [3], и проверки значимости коэффициентов уравнений были получены адекватные модели:

$$y_1 = K_{1c} = 6,64 + 0,12 x_1 + 0,39x_2 - 0,92x_1^2; \quad (1)$$

$$y_2 = \sigma_B = 1508,5 + 146,3 x_1 + 123,2 x_2 - 546,4 x_1^2. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) видно, что наибольшее влияние на оба параметра оптимизации оказывает содержание наночастиц SiC ( $x_1$ ); влияние температуры испытаний ( $x_2$ ) несколько меньше.

При  $x_2 = +1$  ( $t = 1400$  °C) оба уравнения представлены в виде параболы:

$$y_1 = 7,03 + 0,12 x_1 - 0,92x_1^2; \quad (1a)$$

$$y_2 = 1632 + 146,3 x_1 - 546,4x_1^2. \quad (2a)$$

Уравнение (1a) имеет точку перегиба экстремума  $x_{1e} = \frac{0,12}{2 \cdot 0,92} = 0,065$  (21% (по объему) SiC), в которой  $y_{1s} = 7,21$  МПа·м<sup>0,5</sup>,

а уравнение (2a) имеет точку перегиба экстремума  $x_{1e} = \frac{146,3}{2 \cdot 546,4} = 0,134$  (22% (по объему) SiC), в которой  $y_2 = 1642$  МПа.

Таким образом, зависимость  $K_{1c}$  и  $\sigma_B$  от содержания дисперсной нанофазы немонотонная, максимум  $K_{1c}$  (7,21 МПа·м<sup>0,5</sup>) соответствует содержанию примерно 21% (по объему) SiC в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, а максимум  $\sigma_B$  (1642 МПа) – примерно 22% (по объему) SiC в нитридной керамике. Формирование наноструктуры значительно повышает  $K_{1c}$  и  $\sigma_B$  керамических композитов ( $K_{1c}$  – с 4,5 до 7,2 МПа·м<sup>0,5</sup>, а  $\sigma_B$  – с 850 до 1640 МПа).

Обращает на себя внимание тот факт, что данный композит имеет бóльшие прочность и трещиностойкость при повышенных температурах. Транскристаллитный характер разрушения в композиционных материалах сохраняется вплоть до высоких температур (1200 °C и более). Дисперсные частицы SiC препятствуют протеканию процессов зернограничного проскальзывания и кавитационного образования полостей в пределах зерен матрицы, а также способствуют торможению дислокаций при деформации.

Наноккомпозиты  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$  смешанного нано- и интерструктурного типа проявляют значительную устойчивость к замедленному разрушению, происходящему в результате субкритического подрастания трещины, поскольку частицы  $\text{SiC}$ , расположенные по границам зерен, снижают среднюю скорость подрастания трещины через размягчающуюся при высоких температурах фазу, формируемую спекающимися добавками. В результате этого композиты  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$  сохраняют высокие прочность и трещиностойкость при температуре 1500 °С.

Между  $K_{1c}$  и  $\sigma_b$  существует тесная корреляционная связь, так как коэффициент парной корреляции между этими параметрами оптимизации, рассчитанной по данным, приведенным в табл. 1, оказался равным 0,9383 ( $r_{1,2} = 0,9388$ ), что намного больше табличного (критического) значения  $r_{кр} = 0,7977$  (при уровне значимости  $\alpha = 0,01$  и степени свободы  $f = n - 2 = 7$ ). Это позволяет выразить данную связь в виде корреляционного уравнения

$$y_2 = \sigma_b = 522 y_1 - 2003 \quad (3)$$

или

$$y_1 = 3,84 + 0,02y_2. \quad (3a)$$

Таким образом, определив  $\sigma_b = y_2$ , можно по уравнению (3a) рассчитать  $y_1 = K_{1c}$ .

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что введение наночастиц карбида кремния в композит  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$  резко увеличивает (в 1,6 – 1,9 раза) трещиностойкость и предел прочности при высоких температурах (1200...1400 °С). Между этими характеристиками существует тесная корреляционная связь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Niihara, K. Nano-design and mechanical properties of structural ceramics / K. Niihara // Mat. Inst. Sci. and Res. Osaka Univ. 1992. V. 49. № 1. P. 21–28.
2. Баринов, С.И. Прочность технической керамики / С.И. Баринов, В.Я. Шевченко. М.: Наука, 1996. 154 с.
3. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования экспериментов в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. М.: Статистика, 1974. 192 с.