

Метод прогнозирования прочности пористой керамики

М. М. Алексюк

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Описана модель разрушения керамических материалов, согласно которой керамика рассматривается как пористый неоднородный материал композиционной структуры. Учитывается роль пор как концентраторов напряжений, при этом имеют значение их размеры, геометрическая форма и ориентация относительно направления действия наибольших растягивающих напряжений. В качестве разрушающего принято напряжение на поверхности пор в местах наибольшей концентрации, равное пределу прочности связующей фазы керамики.

Рассмотрены вероятные размеры и форма пор исходя из размеров кристаллов наполнителя и их объемного содержания. Предложены модель разрушения и метод математического определения прочности керамики, в котором учитываются прочность компонентов, их объемное содержание, форма и размеры возможных внутренних дефектов.

Ключевые слова: пористая керамика, прочность, математическая модель разрушения, структура материала, концентрация напряжений.

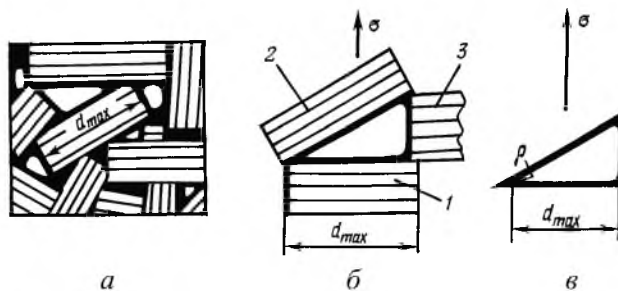
Керамические материалы при сравнительно малой плотности обладают высокой прочностью и жаростойкостью, что обуславливает их большую перспективность при изготовлении деталей высокотемпературной энергетической техники.

В настоящей статье предлагается метод оценки прочности керамики исходя из структуры и механических свойств составляющих компонентов. Рассматриваются традиционные керамические материалы, наполнителем для которых служат кристаллы окислов алюминия Al_2O_3 , соединенные стеклообразной связкой. В качестве последней используется окись кремния SiO_2 с соответствующими присадками [1]. Технология получения керамических деталей следующая. Смешиваются исходные компоненты и из полученной массы формуруются конструкционные элементы, которые затем проходят термообработку. При нагреве связующие материалы расплавляются и соединяют кристаллы наполнителя в единое целое. Однако в процессе перемешивания, прессования и термообработки изделий появляются различные группировки кристаллов наполнителя, внутри которых вследствие низкой вязкости связующего образуются пустотелые объемы-поры, их содержание в обычной керамике равно 0,1...20% (рисунок).

Прочность керамической композиции оценивается с помощью известной формулы [2], которая для двухфазных материалов имеет вид

$$\sigma_k = \beta \sigma_n V_n + \sigma_{m_c} (1 - V_n),$$

где σ_k – прочность керамики; β – коэффициент однородности распределения напряжений в кристаллах наполнителя; σ_n – напряжение в наполнителе при разрушении матрицы; V_n – объемное содержание наполнителя; σ_{m_c} – прочность матрицы с порами.



Структурная модель керамического материала: *a* – общий вид сечения материала, *б* – геометрическая форма поры типа “клин”, *в* – размеры поры типа “клин”.

Составляющие элементы керамики, такие как окислы алюминия и кремния, представляют собой материалы с ковалентной или ионной межатомной связью, что определяет высокое сопротивление сдвигу и практическое отсутствие пластического течения вплоть до разрушения. При упругом деформировании керамики напряжение в каждом из компонентов устанавливается в соответствии с величиной модуля упругости, что выражается соотношением

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_{m_c}} = \frac{E_n}{E_{m_c}} = C; \quad \sigma_n = C\sigma_{m_c},$$

где E_n и E_{m_c} – модули упругости наполнителя и матрицы; C – коэффициент, равный отношению модулей упругости. После подстановки значения σ_n в формулу прочности керамики она принимает вид

$$\sigma_k = \sigma_{m_c} [V_n(\beta C - 1) + 1]. \quad (1)$$

Таким образом, разрушение керамики наступает в том случае, когда напряжения в матрице достигают предельных значений прочности.

В процессе нагружения поры выполняют роль концентраторов напряжений и влияют на силовое поле по двум механизмам. Согласно первому, поры уменьшают поперечное сечение нагруженного тела, увеличивая напряжение за счет этого фактора, согласно второму – концентрируют растягивающие напряжения в результате отражения волн от свободных поверхностей пустотелых дефектов [3, 4].

Величина концентрации напряжений при действии каждого механизма оценивается в виде соответствующих коэффициентов концентрации: для первого – K_F , для второго – K_d . С учетом концентрации напряжений прочность поврежденной порами матрицы равна

$$\sigma_{m_c} = \sigma_m / (K_F + K_d), \quad (2)$$

где σ_m – прочность (сплошного) материала матрицы.

Расчет коэффициента K_F основывается на определении действия пор как факторов уменьшения силового сечения:

$$K_F = \frac{F_k - F_{\Pi}}{F_k} = 1 - \frac{V_{\Pi}}{V_k} = 1 - \Pi_k, \quad (3)$$

где F_k и F_{Π} – площадь сечения керамики и пустотелых пор; V_k и V_{Π} – объем керамики и пор; $\Pi_k = V_{\Pi} / V_k$ – пористость керамики.

Малые размеры пор, их многочисленность и произвольная ориентация позволяют предположить, что они распределены по объему керамического материала равномерно. Это дает возможность количественную оценку уменьшения сечения проводить по показателям удельной плотности пористого и сплошного материалов:

$$\Pi_k = \frac{B_k - B_{\Pi}}{B_k},$$

где B_k и B_{Π} – плотность сплошной и пористой керамики.

После подстановки значения Π_k в формулу (3) получим

$$K_F = \frac{B_{\Pi}}{B_k}. \quad (4)$$

Форма и размеры пор образуются случайным образом при перемешивании и спекании компонентов керамики.

В основном поры образуются в матрице между кристаллами, как показано на рисунке, а. Механическое действие пор связано с их геометрическими размерами. Чем больше пора, тем сильнее ее концентрирующее действие. Образование наибольшей поры возможно между наибольшими кристаллами размером d_{\max} , расположенными в виде фигуры типа “клин” (рисунок, а, б). Этот дефект является наиболее опасным местом, определяющим прочность пористой керамики.

Коэффициент концентрации напряжений K_d в этом случае определяется по формуле [5]

$$K_d = \left(1 + \frac{d_{\max}}{2\rho} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где d_{\max} – размер наибольшего кристалла наполнителя в соединении типа клин; ρ – радиус кривизны вершины поры. Наибольшая концентрация напряжений будет достигнута при $d = d_{\max}$ и $\rho = \rho_{\min}$. Величину d_{\max} можно определить с учетом зернистости наполнителя. Кривизна вершин пор ρ формируется в процессе смачивания частиц наполнителя расплавленной матрицей и определяется взаимодействием сил поверхностного натяжения расплавленной матрицы γ с внутренним давлением газовой среды внутри поры σ_0 , равным давлению прессования изделий.

Равновесие сил на поверхности поры описывается уравнением [5]

$$\rho_{\min} \sigma_0 = 2\gamma, \quad (6)$$

откуда

$$\rho_{\min} = \frac{2\gamma}{\sigma_0}. \quad (7)$$

Разрушение керамики происходит в порах наибольшего размера с наиболее острыми вершинами.

Вероятность образования наибольшего дефекта типа клин $P_{d_{\max}}$ определяется путем анализа технологии получения керамики, где указаны состав шихты и процентное содержание кристаллов наполнителя разных размеров.

Пора типа клин образована тремя кристаллами, два из которых (на рисунке, б поз. 1 и 2) имеют наибольший размер d_{\max} , а третий (поз. 3) может быть любого размера d .

Появление каждого из этих кристаллов на своих позициях – взаимонезависимые события, и вероятность их совместной встречи равна произведению вероятностей появления отдельных кристаллов, которые, в свою очередь, соответствуют процентному содержанию данных кристаллов в шихте. Таким образом, вероятность образования дефекта типа клин равна

$$P_{d_{\max}} = C_{d_{\max}}^2 C_d, \quad (8)$$

где $C_{d_{\max}}$ и C_d – процентное содержание частиц размером d_{\max} и d в шихте. Для определенности примем, что размер d равен размеру $d_{\max} / 4$.

Поскольку опасный дефект типа клин может появиться в любом месте напряженного объема керамики, важно определить минимальный объем, где этот дефект обязательно будет. Это позволит выявить нижний предел применимости настоящей модели разрушения.

Уравнение для объема V_1 , который занимает дефект типа клин, имеет вид

$$V_1 = d_{\max}^3, \quad (9)$$

а для объема керамического материала, в котором содержится хотя бы один дефект типа клин,

$$V_{\min} = V_1 / P_{d_{\max}}. \quad (10)$$

Таким образом, при механическом нагружении керамических деталей с напряженным объемом менее V_{\min} наибольший дефект типа клин может отсутствовать. Тогда возможна более высокая прочность и больший разброс ее значений. Поэтому для учета влияния объемных величин на ресурс прочности керамических деталей вводится показатель объемного эффекта в виде коэффициента α_V , отображающего влияние на прочность изменения общего объема V_0 керамической детали.

Величина α_V определяется по соотношению

$$\alpha_V = V_{\min} / V_0. \quad (11)$$

После подстановки значений, найденных по уравнениям (8)–(10), в формулу (11) величина α_V станет зависимой от следующих параметров:

$$\alpha_V = \frac{V_1}{C_{d_{\max}}^2 C_d V_0}. \quad (12)$$

Очевидно, что в случае увеличения объема напряженного материала V_0 объемный коэффициент α_V уменьшается.

Подставив выражения (4), (5), (7), (12) в уравнение (2), получим формулу для расчета прочности материала матрицы, содержащей поры σ_{M_c} :

$$\sigma_{M_c} = \frac{\sigma_M B_{II} \alpha_V}{B_K + B_{II} \left(1 + \frac{d_{\max} \sigma_0}{4\gamma}\right)^{1/2}}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что чем больше объем детали из керамики, тем меньше ее прочность (больше вероятность существования максимальных дефектов).

Изменение прочности керамики с повышением температуры происходит за счет снижения прочности материала матрицы. Этот процесс связан с ее структурной перестройкой при действии высоких температур и оценивается с помощью уравнения [6, 7]

$$\sigma_{M(T)} = \sigma_{M_{300}} [1 - \alpha_T (T - 300)], \quad (14)$$

где $\sigma_{M_{300}}$ и $\sigma_{M(T)}$ – прочность матрицы при 300К и рабочей температуре T ; α_T – коэффициент температурной зависимости прочности матрицы; T – рабочая температура.

Поскольку матрицей служит стеклообразный материал, температурное преобразование структуры носит характер изменения вязкости, что и отображает формула (14).

Общая прочность пористой керамики как композиционного материала определяется формулой (1), преобразованной путем подстановки в нее уравнения (13):

$$\sigma_K = \frac{\sigma_{M(T)} B_{II} \alpha_V}{B_K + B_{II} \left(1 + \frac{d_{\max} \sigma_0}{4\gamma}\right)^{1/2}} [V_H (\beta C - 1) + 1]. \quad (15)$$

Для определения границ применимости предлагаемого метода по формуле (15) были проведены расчеты прочности некоторых известных керамических материалов, состоящих из кристаллического наполнителя и аморфной матрицы.

Результаты расчетов сравнивались с действительными значениями прочности этих материалов, приведенными в технической справочной литературе [1].

С целью упрощения расчетов для всех керамик принимаем: $T = 300$ К, $\alpha_V = 1$, $\gamma = 0,3$ Дж/м², $\sigma_0 = 0,2$ МПа. Остальные исходные данные и результаты расчетов представлены в таблице.

Исходные данные и результаты сравнения расчетных и действительных значений прочности керамических материалов

Наименование керамики	B_k , кг/м ³	B_n , кг/м ³	V_n , %	d_{max} , 10 ⁻⁴ м	β	C	σ_m , МПа	σ_k , МПа		Погрешность, %
								расч.	действ.	
Строительный кирпич	2050	1700	0,30	6,0	0,30	5,5	95	5,70	5,0	14
Огнеупорный кирпич	2640	2200	0,70	4,0	0,20	7,4	105	6,40	8,0	20
Электротехнический фарфор	3630	3300	0,45	0,1	0,20	5,5	105	49,70	45,0	10
Бетон	2400	1600	0,25	30,0	0,25	5,5	95	2,44	2,5	2
Стеатит	2730	2600	0,70	0,01	0,20	7,4	100	75,80	70,0	8

В итоге, прочность керамических материалов, рассчитанная по предложенной модели, от экспериментальных показателей отличается не более чем на 20%.

Анализируя критериальное уравнение (15), можно заключить, что прочность рассматриваемой керамики существенно зависит от размеров кристаллов наполнителя, технологических режимов прессования и термообработки. В частности, уменьшение размеров кристаллов вызывает уменьшение длины формируемых ими наибольших пор d_{max} , а снижение температуры термообработки способствует увеличению поверхностной энергии и росту радиуса кривизны вершин пор, что ведет к уменьшению концентрации напряжений и общему увеличению прочности керамики.

Таким образом, прочность керамики можно прогнозировать исходя из оценки действия структурных факторов как механизмов концентрации локальных напряжений.

Резюме

Описана модель руйнування керамічних матеріалів, згідно з якою кераміка є пористим неоднорідним матеріалом композиційної структури. Враховано, що пори виступають в ролі концентраторів напружень, при цьому мають значення їх розміри, геометрична форма й орієнтація відносно напрямку дії найбільших розтягуючих напружень. За руйнівне прийнято напруження на поверхні пор у місцях найбільшої концентрації, яке рівне границі міцності зв'язувальної фази кераміки.

Розглянуто імовірні розміри і форму пор на основі розмірів кристалів наповнювача та їх об'ємного складу. Запропоновано модель руйнування і метод математичного визначення міцності кераміки, який враховує міцність компонентів, їх об'ємний склад, форму та розміри можливих внутрішніх дефектів.

1. Уайзут. О., Дью-Хьюз Д. Металлы, керамики, полимеры / Пер. с англ. под ред. Б. Я. Любова. – М.: Атомиздат, 1979. – 580 с.
2. Алексюк М. М. Метод определения прочности технических графитов // Пробл. прочности. – 1987. – № 4. – С. 56 – 59.
3. Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения материалов. – Киев: Наук. думка, 1978. – 352 с.
4. Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
5. Красовский А. Я. Хрупкость металлов при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1980. – 340 с.
6. Raj R. and Ashby M. F. Intergranular fracture at elevated temperature // Acta Met. – 1975. – 23. – P. 253 – 266.
7. Фудзиси Т, Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Мир, 1982. – 232 с.

Поступила 01. 06. 98