

Исследование микрорастрескивания керамических материалов методом акустической эмиссии

А. В. Дроздов

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

drozdov@ipp.kiev.ua

Приведены результаты исследований микрорастрескивания таких композиционных керамических материалов, как электротехнический фарфор и нитридкремниевая керамика, с использованием метода акустической эмиссии. Уточнено аналитическое выражение, описывающее кинетику накопления микротрещин. Изучено влияние скорости нагружения на характеристики прочности керамики и особенности акустической эмиссии при ее микрорастрескивании. Установлена зависимость суммарного счета акустической эмиссии от площади напряженной поверхности образцов. Введено понятие модуля микрорастрескивания композиционных керамических материалов и показано его несоответствие модулю Вейбулла при прочностных испытаниях керамики.

Ключевые слова: керамические материалы, микрорастрескивание, акустическая эмиссия, суммарный счет, распределение Вейбулла, модуль микрорастрескивания.

Введение. Метод акустической эмиссии (АЭ) является эффективным для исследования процессов разрушения керамических материалов как на макро-, так и на микроуровнях [1, 2]. Это обусловлено тем, что указанные процессы, представляющие разрушение связей в структуре хрупких материалов, сопровождаются выделением упругой энергии, которая может быть зарегистрирована высокочувствительной аппаратурой. Основными процессами разрушения и соответственно источниками АЭ при нагружении керамических материалов являются микрорастрескивание и докритический рост трещин (ДРТ).

Стадия ДРТ предшествует катастрофическому разрушению многих керамических материалов и может быть зарегистрирована по сигналам АЭ. Установлено, что для поликристаллических керамических материалов суммарный счет АЭ N прямо пропорционален приращению длины развивающейся трещины за время наблюдения [2], а скорость счета \dot{N} , в свою очередь, пропорциональна скорости докритического роста трещины [1, 3]. Зависимость скорости роста трещины V от коэффициента интенсивности напряжений K_1 обычно описывают степенным уравнением [1]:

$$V = \frac{da}{dt} = A^* \left(\frac{K_1}{K_{1c}} \right)^n = A(K_1)^n, \quad (1)$$

где a – длина трещины; t – время; A^* , A , n – параметры, зависящие от материала, температуры и окружающей среды; K_{1c} – критический коэффициент интенсивности напряжений.

Коэффициент интенсивности напряжений K_1 связан с действующим в материале напряжением σ и трещиной длиной a следующим соотношением:

$$K_1 = Y\sigma\sqrt{a}, \quad (2)$$

где Y – геометрический фактор.

В результате многочисленных экспериментальных исследований [1–6] было установлено, что для большинства керамических материалов в условиях комнатной температуры параметр n (показатель скорости роста трещины) находится в пределах 30...300, более низкие его значения 12...16 характерны для стекла. Анализ выражений (1) и (2) свидетельствует о том, что процесс докритического роста трещины при постоянной или возрастающей нагрузке является лавинообразным и проявляется на относительно коротком конечном участке нагружения, заканчиваясь катастрофическим разрушением.

Другим характерным источником АЭ при механическом нагружении керамики является образование рассеянных по объему или поверхности материала не взаимодействующих микротрещин. Такое микрорастрескивание имеет место для гетерогенных керамических материалов и происходит вследствие анизотропии упругих свойств и различия коэффициентов термического расширения структурных компонентов, что приводит к появлению дополнительных остаточных напряжений [7]. Микрорастрескивание может также инициироваться образующимися при механической обработке керамических материалов поверхностными трещинами [1]. Положительная роль микрорастрескивания заключается в том, что это один из возможных механизмов повышения вязкости разрушения керамических материалов [7, 8]. Так, при разработке таких материалов может быть поставлена цель создания контролируемых микротрещин, которые могли бы увеличить показатели трещиностойкости при сохранении высокой прочности [8]. Поэтому знание закономерностей процесса микрорастрескивания является важным (полезным) как при изучении особенностей их механического поведения и разрушения на микро- и макроуровнях, так и при разработке новых материалов с повышенной вязкостью разрушения.

В работах [9–11] разработан подход к описанию процесса микрорастрескивания при нагружении образцов из поликристаллического оксида алюминия и электротехнического фарфора, который представляет собой композиционный керамический материал, содержащий частицы кварца в стеклянной матрице. В основу этого подхода положено статистическое распределение Вейбулла, базирующееся на концепции наименее прочного звена. Согласно этому распределению вероятность разрушения P от величины напряжения σ определяется выражением [12]

$$P = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma - \sigma_n}{\sigma_0} \right)^m \right], \quad (3)$$

где σ_n – напряжение, ниже которого вероятность разрушения равна нулю; σ_0 – характеристическое напряжение, или нормирующая величина; m – модуль Вейбулла, или коэффициент гомогенности.

Выражение (3) известно как трехпараметрическое распределение Вейбулла, которое при $\sigma_n = 0$ преобразуется в двухпараметрическое распределение:

$$P = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]. \quad (4)$$

Поскольку при ограниченном количестве испытанных образцов эмпирическая функция вероятности разрушения в одинаковой степени согласуется с распределениями (3) и (4), для оценки прочности керамических материалов наиболее часто применяется более простое двухпараметрическое распределение Вейбулла (4).

В основу анализа процесса микрорастрескивания керамических материалов [9–11] положено представление о том, что материал состоит из элементарных объемов, и возникновение микротрещины в каждом из объемов подчиняется двухпараметрическому распределению Вейбулла. При невысокой плотности образующихся не взаимодействующих микротрещин, т.е. при низких значениях вероятности разрушения P , можно воспользоваться следующим приближенным выражением [7]:

$$\frac{\eta}{\chi+1} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m, \quad (5)$$

где η – количество образующихся микротрещин; χ – общее количество потенциально возможных микротрещин.

Поскольку микрорастрескивание композиционных керамических материалов сопровождается дискретной АЭ, регистрируемые при этом события, или величина суммарного счета N , пропорциональны количеству образующихся микротрещин, и поэтому диаграммы напряжение σ – суммарный счет N также могут описываться степенной зависимостью, аналогичной (5). В работах [9, 11] проанализированы особенности АЭ при нагружении электротехнического фарфора. В результате установлено, что показатель степени m , вычисленный по параметрам АЭ ($m = 4$), согласуется с результатами определения модуля Вейбулла при испытании образцов на прочность. Аналогично при испытании оксида алюминия типа Lucalox показано, что $m = 10$, и это, как утверждается в [10], соответствует модулю Вейбулла для поликристаллических керамических материалов. К сожалению, в [10] не представлены непосредственно статистические характеристики прочности исследованных материалов и поэтому утверждения о соответствии между показателями степени m при микрорастрескивании и модулями Вейбулла, вероятно, требуют большего обоснования. Следует отметить, что в работах [9–11] особенности микрорастрескивания проанализированы по результатам регистрации скорости счета АЭ, которая является производной от суммарного счета N АЭ и имеет более выраженный по сравнению с последним дискретный характер, больше зависит от параметров регистрирующей аппаратуры, что в итоге затрудняет обработку и анализ экспериментальных данных.

Целью настоящей работы является уточнение методом АЭ закономерностей микрорастрескивания гетерогенных поликристаллических керамических материалов при их механическом нагружении.

Выбор материалов для исследований. Для выбора конкретных керамических материалов, проявляющих микрорастрескивание, предварительно были проведены испытания прочности различной керамики на изгиб с регистрацией АЭ. Для этого использовали специально разработанное оборудование, обеспечивающее изгиб керамических образцов по трех- и четырехточечной схемам, а также регистрацию параметров АЭ [13]. В качестве информативного параметра АЭ был выбран суммарный счет, являющийся интегральным параметром, отражающим кинетику процессов как микро-, так и макроразрушения керамических материалов при их нагружении.

С целью сравнения для каждого из исследованных материалов определяли диаграммы относительное напряжение σ/σ_b – суммарный счет N АЭ (σ_b – предел прочности при изгибе). В результате проведенных испытаний получены три типичные диаграммы при нагружении керамических материалов (рис. 1).

Для диаграммы 1 (рис. 1) отмечается практическое отсутствие или незначительная активность АЭ вплоть до самого момента разрушения, наблюдаются отдельные скачки по суммарному счету, которые могут быть вызваны разрушением материала в местах приложения нагрузки к образцу или трением между нагружающими элементами и поверхностью образца. Использование тонких прокладок из поливинил-

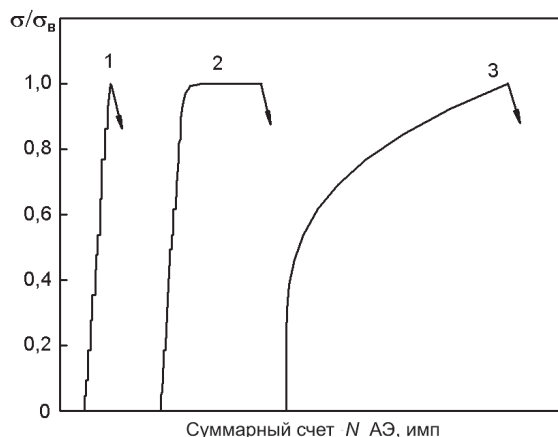


Рис. 1. Типичные диаграммы $\sigma/\sigma_{\text{в}} - N$ АЭ при нагружении керамических материалов.

хлоридной ленты или тефлона между нагружающими роликами и поверхностью образца позволяет существенно снизить либо устранить эти эффекты. Описанный тип диаграммы АЭ характерен для высокопрочных керамических материалов (предел прочности составляет 200 МПа и выше), монокристаллов или таких аморфных материалов, как стекло.

Диаграмма 2 (рис. 1) характеризуется незначительной активностью АЭ на начальном участке нагружения и заметным ростом суммарного счета N на конечном при постоянной или падающей нагрузке, а также и последующим катастрофическим разрушением (резкое падение нагрузки). Это свидетельствует об отсутствии заметного микрорастрескивания на начальном этапе нагружения и о наличии в данных материалах стадии докритического роста макротрещины. Такой тип диаграммы имеет место при испытании керамических материалов с относительно крупным размером зерен.

Для диаграммы 3 (рис. 1) имеет место монотонный рост суммарного счета N АЭ (и скорости счета) при нагружении образцов вплоть до момента их катастрофического разрушения. Диаграммы напряжение–суммарный счет N наблюдаются для электротехнического фарфора, нитридкремниевой керамики типа НКККМ [14] и некоторых других композиционных керамических материалов, что обусловлено процессом их постепенного микрорастрескивания при механическом нагружении [9].

С учетом изложенного в качестве объекта дальнейших исследований были выбраны материалы, которые проявляли микрорастрескивание, сопровождаемое АЭ (на рис. 1 диаграмма 3), а именно: электротехнический фарфор, который состоит из стекловидной фазы с равномерно распределенными в ней частицами кварца или муллита, а также нитридкремниевая керамика из трех фаз, содержащая зерна нитрида кремния и оксида магния. Следует отметить, что для обоих материалов характерны линейные диаграммы деформирования.

Особенности обработки экспериментальных данных. Для исследования особенностей микрорастрескивания были проведены испытания на прочность образцов размером $3,5 \times 5,0 \times 50$ мм в условиях четырехточечного изгиба с базой нагружения 40/20 мм. Испытания выполняли на оборудовании, включающем прецизионный нагружающий узел и систему регистрации параметров АЭ [13]. Для устранения посторонних акустических шумов между нагружающими роликами и образцом устанавливали прокладку из тонкой поливинилхлоридной ленты.

Поскольку сигналы АЭ практически отсутствовали на начальном участке нагружения, а характер зарегистрированных диаграмм был плавным, без заметных скачков

и переломов вплоть до самого момента разрушения, была предпринята попытка аппроксимировать зависимость суммарного счета N от действующих напряжений σ более общим выражением, вытекающим из трехпараметрического распределения Вейбулла:

$$N = \begin{cases} 0 & \text{при } \sigma \leq \sigma_A; \\ B(\sigma - \sigma_A)^\mu & \text{при } \sigma > \sigma_A, \end{cases} \quad (6)$$

где B и μ – параметры микрорастрескивания; σ_A – напряжение появления сигналов АЭ.

Априори предполагали, что параметр микрорастрескивания μ , назовем его модулем микрорастрескивания, отличается от модуля Вейбулла m , определяемого по рассеиванию значений пределов прочности образцов. Модуль μ при фиксированном значении напряжения σ_A определяли по экспериментальным данным для каждого образца с использованием метода наименьших квадратов. Для этого выражение (6) преобразовывали к виду

$$\ln(N) = \mu \ln(\sigma - \sigma_A) + \ln(B). \quad (7)$$

Поскольку фиксация напряжения σ_A затруднена и имеет выраженный субъективный характер, определение модуля μ осуществляли путем последовательного перебора различных значений напряжений σ_{Ai} .

При этом полученная сумма квадратов отклонений S_i расчетных данных N_{pj} от экспериментальных $N_{эj}$ служила мерой согласия предложенной степенной функции (6) при фиксированном значении σ_{Ai} :

$$S_i = \sum_{j=1}^k (N_{pj} - N_{эj})^2, \quad (8)$$

где k – количество точек для аппроксимации.

Для удобства представления и сравнения результатов расчета, полученных для каждого значения σ_{Ai} , определяли приведенное значение суммы квадратов отклонений рассчитанных и экспериментальных данных \bar{S}_i по формуле

$$\bar{S}_i = \frac{S_i}{S_{\max}}, \quad (9)$$

где S_{\max} – максимальное значение суммы квадратов отклонений для рассматриваемого диапазона изменения напряжений σ_A .

Результаты расчета зависимости \bar{S}_i от σ_A для испытанных на изгиб образцов из электротехнического фарфора и нитридкремниевой керамики свидетельствуют о ее четко выраженном минимуме (рис. 2). Для образца из электротехнического фарфора при изменении σ_A от 0 до 20 МПа приведенное значение суммы квадратов отклонений уменьшалось почти в 1000 раз. Поэтому значения модуля микрорастрескивания μ и напряжения σ_A выбирали при минимальном значении зависимости \bar{S}_i .

Такой характер зависимости может быть обусловлен тем, что значение суммарного счета N к моменту разрушения образца составляет порядка 10^5 , а количество событий АЭ, отражающее количество зарегистрированных микротрещин, – $(1,5... \dots 2,0) \cdot 10^4$. Это является достаточно большим числом и поэтому неравномерность процесса микрорастрескивания при нагружении материала незаметна. Аналогичные

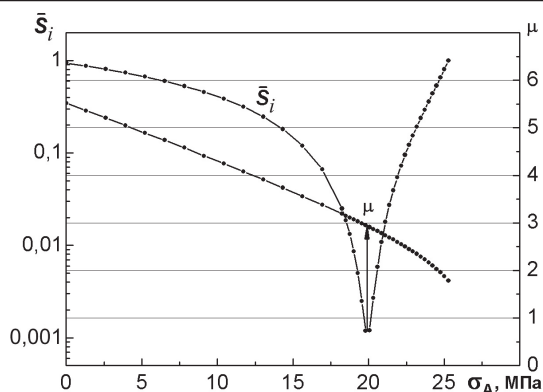


Рис. 2. Зависимость \bar{S}_i от σ_A для образца из электротехнического фарфора (скорость нагружения 0,75 МПа/с).

зависимости $\bar{S}_i - \sigma_A$ были получены также для образцов из нитридикремниевой керамики. Отметим, что для 90...95% зарегистрированных экспериментальных диаграмм напряжение σ – суммарный счет N АЭ, полученных при испытании образцов из обоих материалов, имели четко выраженный минимум расчетных зависимостей $\bar{S}_i - \sigma_A$. Обработке не подвергали данные испытаний отдельных образцов, для которых наблюдали небольшие скачки суммарного счета N на начальном участке нагружения, что, вероятно, связано с неудачной их установкой на нагружающих опорах либо возможным наличием посторонних частиц в зонах контакта нагружающих роликов с образцом.

В результате выполненных расчетов установлено, что модуль микрорастрескивания μ как для образцов из электротехнического фарфора, так и из нитридикремниевой керамики находится в пределах 2,4...3,7 при среднем значении 3,0. Важно, что значения μ и σ_A , определенные по минимуму зависимости $\bar{S}_i - \sigma_A$, практически не зависят от количества экспериментальных точек (5–50), использованных для расчета. Значение параметра микрорастрескивания B в выражении (6) зависит от чувствительности аппаратуры АЭ и качества акустического контакта между конкретным образцом и приемным преобразователем АЭ. Для электротехнического фарфора разброс значений B составил два раза, для нитридикремниевой керамики – более четырех раз.

Влияние скорости нагружения на характеристики прочности и параметры микрорастрескивания. Особенности АЭ, сопровождающей микрорастрескивание электротехнического фарфора и нитридикремниевой керамики, исследовали при испытании на прочность в условиях четырехточечного изгиба образцов размером $3,5 \times 5,0 \times 50$ мм при различных скоростях нагружения. Для получения представительных данных количество испытанных образцов для каждой скорости нагружения составляло не менее десяти. Результаты испытаний и параметры микрорастрескивания вышеуказанных материалов представлены в табл. 1. Кривые распределения пределов прочности для выбранных материалов при различных скоростях нагружения приведены на рис. 3. Модуль Вейбулла определяли методом наименьших квадратов по экспериментальным данным в координатах $\ln(\ln(1/(1-P(\sigma)))) - \ln(\sigma)$. Как видно, изменение скорости нагружения существенно влияет на среднее значение прочности электротехнического фарфора при сохранении малого разброса по прочности отдельных образцов и соответственно высоких значений модуля Вейбулла $m = 31...36$ (рис. 3,а). Для нитридикремниевой керамики обнаружено слабое влияние скорости нагружения на предел прочности при сравнительно большем разбросе полученных данных и более низких значениях m (15...21) – рис. 3,б.

Т а б л и ц а 1

Результаты испытаний прочности образцов из электротехнического фарфора и нитридкремниевой керамики при четырехточечном изгибе

Материал	Скорость нагружения $\dot{\sigma}$, МПа/с	Количество образцов	Предел прочности σ_B , МПа	m	σ_A , МПа	μ
Электротехнический фарфор	0,04	10	73,1	32	14,0	3,1
	0,75	22	79,3	31	17,5	3,0
	12,00	12	85,6	36	21,0	3,0
Нитридкремниевая керамика	0,15	33	172,0	21	27,5	2,9
	1,80	32	176,0	16	37,0	3,0
	50,00	33	181,0	15	47,0	3,0

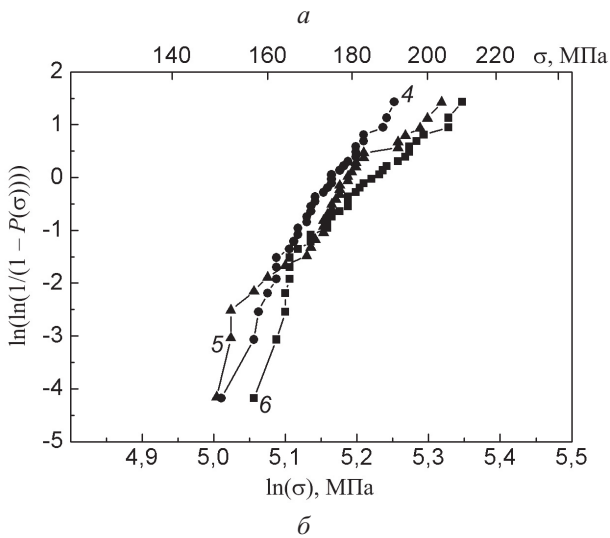
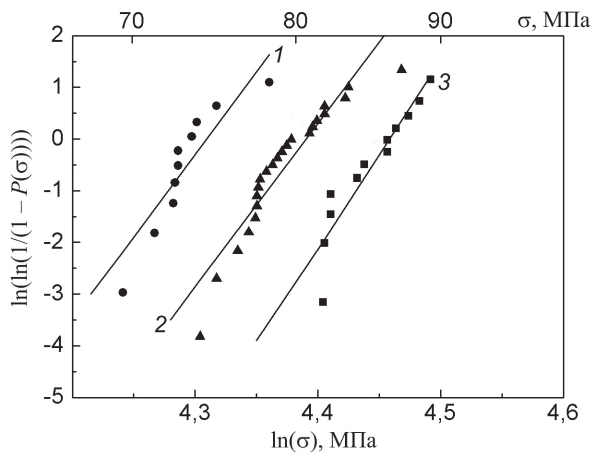


Рис. 3. Распределение пределов прочности электротехнического фарфора (а) и нитридкремниевой керамики (б) при различных скоростях нагружения: 1 – $\dot{\sigma} = 0,04$ МПа/с, $m = 32$; 2 – $\dot{\sigma} = 0,75$ МПа/с, $m = 31$; 3 – $\dot{\sigma} = 12$ МПа/с, $m = 36$; 4 – $\dot{\sigma} = 0,15$ МПа/с; 5 – $\dot{\sigma} = 1,8$ МПа/с; 6 – $\dot{\sigma} = 50$ МПа/с.

Диаграммы напряжение σ – суммарный счет N как для образцов из электротехнического фарфора, так и из нитридокремниевой керамики подобны но, как было указано выше, отличаются значительным разбросом абсолютных значений суммарного счета N при заданном уровне напряжений. Для каждого образца по этой диаграмме определяли параметры микрорастрескивания μ и σ_A из условия минимума приведенного значения суммы квадратов отклонений \bar{S}_i . Средние значения этих параметров при различных скоростях нагружения каждой группы образцов приведены в табл. 1.

Анализируя расчетные данные, можно сделать вывод, что для электротехнического фарфора и нитридокремниевой керамики средние значения модуля микрорастрескивания μ практически совпадают и фактически не зависят от скорости нагружения ($\mu = 2,9...3,1$). Вместе с тем повышение скорости нагружения приводит к увеличению значения σ_A с 14 до 21 МПа для электротехнического фарфора и с 27,5 до 41,0 МПа для нитридокремниевой керамики. Усредненные диаграммы напряжение σ – суммарный счет N для каждой группы образцов представлены на рис. 4. Характерно, что для обоих материалов, даже при самых малых скоростях нагружения, диаграммы удовлетворительно описываются степенной зависимостью (6) и не содержат перед разрушением участка роста суммарного счета N при постоянном напряжении. Это может свидетельствовать об отсутствии для этих материалов какого-либо заметного докритического роста макротрещины.

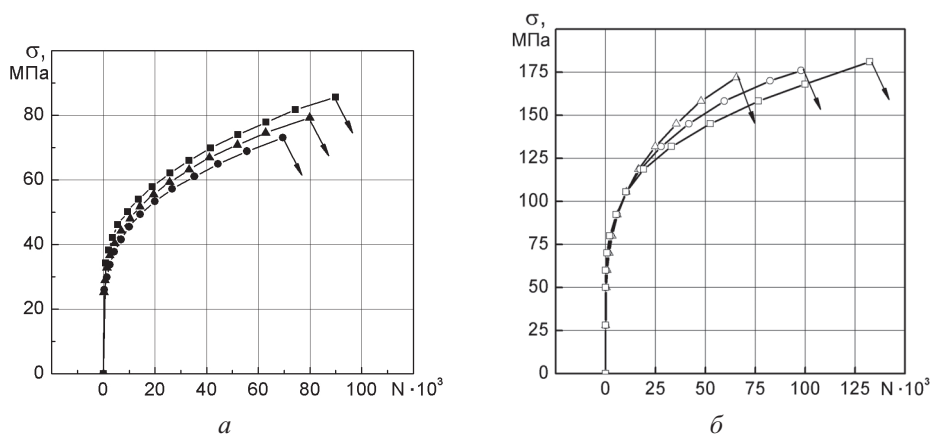


Рис. 4. Усредненные диаграммы напряжение σ – суммарный счет N при различных скоростях нагружения для электротехнического фарфора (а) и нитридокремниевой керамики (б): ■ – $\dot{\sigma} = 12$ МПа/с; ▲ – $\dot{\sigma} = 0,75$ МПа/с; ● – $\dot{\sigma} = 0,04$ МПа/с; △ – $\dot{\sigma} = 0,15$ МПа/с; ○ – $\dot{\sigma} = 1,8$ МПа/с; □ – $\dot{\sigma} = 50$ МПа/с.

Исследование влияния размеров образцов и вида нагружения на особенности микрорастрескивания. Представляет интерес, какое распределение рассеянных микротрещин (объемное или поверхностное) наблюдается при нагружении композиционных керамических материалов. Если принять во внимание, что поверхность материалов может взаимодействовать с окружающей средой, что приводит к активации разрыва отдельных связей, процесс микрорастрескивания может быть преимущественно поверхностным. Возможное образование поверхностных трещин в результате механической обработки образцов также может служить источником возникновения микротрещин при нагружении.

С целью установления объемного или поверхностного характера микрорастрескивания были испытаны образцы из нитридокремниевой керамики размером $3,5 \times 5,0 \times 50$ и $5,0 \times 5,0 \times 100$ мм в условиях четырехточечного изгиба при сопоставимых скоростях

нагружения. Для образцов размером $3,5 \times 5,0 \times 50$ мм расстояние между внутренними и наружными нагружающими роликами составляло 20 и 40 мм соответственно, скорость нагружения – 1,8 МПа/с, для образцов размером $5,0 \times 5,0 \times 100$ мм – соответственно 40 и 80 мм, скорость нагружения – 1,5 МПа/с. Отношения эффективных напряженных объемов и напряженных площадей поверхностей для образцов указанных размеров равны соответственно 0,35 и 0,5. На рис. 5,а представлены усредненные диаграммы напряжение σ – суммарный счет N . Значения суммарного счета при одинаковом напряжении для двух типоразмеров образцов находятся в пределах 0,45...0,55, что соответствует отношению площадей напряженных поверхностей образцов.

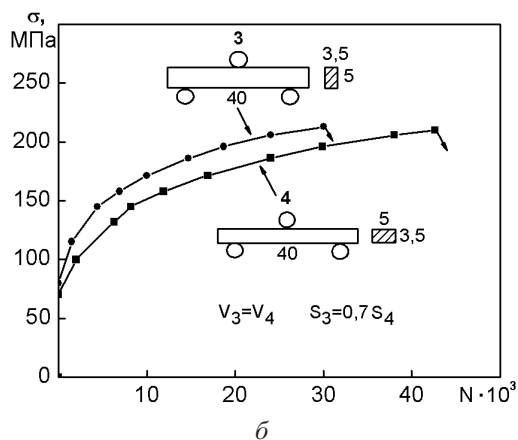
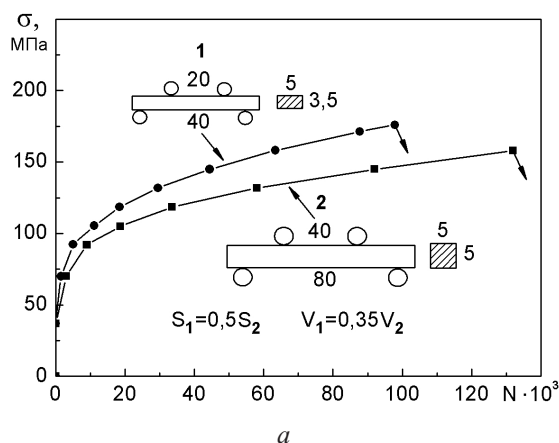


Рис. 5. Усредненные диаграммы напряжение σ – суммарный счет N при четырехточечном (а) и трехточечном (б) изгибе образцов из нитридкремниевой керамики.

Дополнительно были испытаны две группы образцов размером $3,5 \times 5,0 \times 50$ мм при трехточечном изгибе, которые по-разному устанавливали на опорах (рис. 5,б). Отношения эффективных напряженных объемов и напряженных площадей поверхностей составляли соответственно 1,0 и 0,7. Как видно, суммарный счет АЭ коррелирует с площадью напряженной поверхности образцов.

Необходимо отметить, что абсолютное значение суммарного счета АЭ при трехточечном изгибе было меньше, чем при четырехточечном, а зависимость суммарного счета N от напряжения σ для каждого из образцов в большинстве случаев не могла удовлетворительно описываться выражением (6). Минимальные значения отно-

сительных отклонений \bar{S}_i составляли более 4%, часто для испытанных образцов вообще было невозможно определить минимум этих отклонений, напряжение σ_A появления сигналов АЭ колебалось в пределах 0...100 МПа, а показатель микрорастрескивания μ имел большой разброс (1,45...6,3). Такой эффект может быть обусловлен неоднородным напряженным состоянием образца, меньшим числом образующихся микротрещин, недостаточной чувствительностью аппаратуры, а также сравнительно большим вкладом паразитных сигналов, которые не удалось полностью исключить. Поэтому параметры микрорастрескивания при трехточечном изгибе не рассчитывали.

Модуль микрорастрескивания μ , характеризующий процесс накопления микротрещин и полученный при испытании образцов, по схеме трех- и четырехточечного изгиба, существенно меньше модуля Вейбулла (табл. 2), что не отвечает предположению о соответствии этих величин [9, 11].

Т а б л и ц а 2

Результаты испытаний прочности образцов из нитридокремниевой керамики при различных схемах нагружения

Схема нагружения	Размер образца, мм	Количество образцов	Предел прочности σ_B , МПа	m	σ_A^* , МПа	μ^*
Четырехточечный изгиб	5,0 × 3,5 × 50	32	176	16	37,0	3,0
	5,0 × 5,0 × 90	12	158	17	47,0	3,1
Трехточечный изгиб	3,5 × 5,0 × 50	23	213	15	–	–
	5,0 × 3,5 × 50	32	212	26	–	–

Примечание. Звездочкой отмечены средние значения.

Таким образом, сравнение результатов испытаний образцов разного размера и при различных схемах нагружения показывает, что для данного материала имеет место преимущественно рассеянное по его поверхности микрорастрескивание, т.е. микротрещины образуются на поверхности материала.

Представляется целесообразным для дальнейшего исследования процесса микрорастрескивания провести испытания материалов при однородном напряженно-деформированном состоянии, а именно: при растяжении образца. Это позволило бы проверить и уточнить закономерности АЭ, сопутствующей микрорастрескиванию, и разработать модель микрорастрескивания композиционных керамических материалов. Однако испытания керамики на растяжение – трудновыполнимая задача. Это обусловлено сложностью обеспечения равномерного растяжения образца с исключением возможных изгибающих моментов, а также необходимостью наличия достаточно большого объема материала.

Поскольку рассмотрены результаты испытаний только двух материалов, представляет интерес распространение вышеотмеченных особенностей процесса микрорастрескивания на другие существующие композиционные керамические материалы.

Выводы

1. Использование метода АЭ позволяет зарегистрировать процесс микрорастрескивания композиционных керамических материалов при их механическом нагружении. На основании полученных данных для электротехнического фарфора и нитридокремниевой керамики предложено более точное выражение, позволяющее описать

накопление микротрещин и диаграммы напряжение σ – суммарный счет N при нагружении с учетом напряжений появления сигналов АЭ.

2. Проведена оценка статистических характеристик прочности исследованных материалов и определены значения модуля Вейбулла, характеризующего рассеяние пределов прочности испытанных образцов при различных скоростях нагружения, размерах образцов и схемах нагружения. Введено понятие модуля микрорастрескивания, который описывает кинетику микрорастрескивания при монотонном увеличении напряжений, и показано, что его значения существенно отличаются от значений модуля Вейбулла.

3. Для нитриднекремниевой керамики рассеянное микрорастрескивание является преимущественно поверхностным, что следует из сравнения значений суммарного счета АЭ при фиксированном уровне напряжений при различных размерах образцов и схемах нагружения.

Резюме

Представлено результати досліджень мікророзтріскування таких композиційних керамічних матеріалів, як електротехнічний фарфор та нітриднекремнієва кераміка, з використанням методу акустичної емісії. Уточнено аналітичний вираз, який описує кінетику накопичення микротріщин. Вивчено вплив швидкості навантаження на характеристики міцності кераміки та особливості акустичної емісії при мікророзтріскуванні. Установлено зв'язок між сумарним підрахунком акустичної емісії і площею напруженої поверхні зразків. Введено поняття модуля мікророзтріскування композиційних керамічних матеріалів і встановлено його невідповідність модулю Вейбулла при випробуваннях кераміки на міцність.

1. *Эванс А. Г., Лэнгдон Т. Г.* Конструкционная керамика. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.
2. *Drozдов A. V., Galenko V. O., Gogotsi G. A., and Swain M. V.* Acoustic emission during micro- and macrocrack growth in Mg-PSZ // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1991. – 8. – P. 1922 – 1927.
3. *Писаренко Г. С., Гогоци Г. А., Дроздов А. В., Неговский А. Н.* Исследование прочности керамики в условиях механических и тепловых воздействий с использованием акустической эмиссии // *Пробл. прочности.* – 1982. – № 4. – С. 3 – 8.
4. *Писаренко Г. С., Гогоци Г. А., Завада В. П.* Трещиностойкость конструкционной керамики // Там же. – 1985. – № 4. – С. 3 – 8.
5. *Sclosa S., Dailly D. F., and Hastings G. W.* Fracture toughness of hot isostatically pressed alumina // *Trans. J. Br. Ceram. Soc.* – 1982. – 81. – P. 148 – 151.
6. *De Aza A. H., Chevalier J., Fantozzi G., et al.* Crack growth resistance of alumina, zirconia and zirconia toughened alumina ceramics for joint prostheses // *Biomaterials.* – 2002. – 23. – P. 937 – 945.
7. *Баринов С. М.* Трещиностойкость конструкционной машиностроительной керамики // *Итоги науки и техники. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.* – М., 1988. – Т. 1. – С. 72 – 132.
8. *Геворкян Э. С., Чижикала В. А., Мельник О. М.* Некоторые особенности структурообразования материалов на основе нанопорошков частично стабилизированного диоксида циркония горячим прессованием с прямым пропуском тока // *Вісн. Харків. нац. ун-ту. Сер. Хімія.* – 2011. – 3. – С. 50 – 54.
9. *Evans A. G. and Linzer M.* Failure prediction in structural ceramics using acoustic emission // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1973. – 56. – P. 575 – 581.

10. *Evans A. G., Linzer M., and Russel L. R.* Acoustic emission and crack propagation in polycrystalline alumina // *Mater. Sci. Eng.* – 1974. – **15**. – P. 253 – 261.
11. *Evans A. G.* Residual stress measurements using acoustic emission // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1975. – **58**. – P. 239 – 243.
12. *Weibull W. A.* Statistical distribution function of wide applicability // *J. Appl. Mech.* – 1951. – **18**. – P. 293 – 297.
13. *Дроздов А. В., Кутняк В. В., Неговский А. Н.* Экспериментальное оборудование для оценки характеристик прочности керамических материалов // *Пробл. прочности.* – 1999. – № 5. – С. 117 – 126.
14. *Гогоци Г. А., Завада В. П., Щербина О. Д.* Прочность и трещиностойкость керамики. Сообщ. 2. Нитридокремниевая керамика // *Там же.* – 1984. – № 12. – С. 11 – 15.

Поступила 22. 05. 2013