

## Сопротивление керамики разрушению: базовая диаграмма и R-линия

Г. А. Гогоци

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

*Проанализированы современные методы определения трещиностойкости керамики и показано, что процесс разрушения образцов можно разделить на три этапа: формирование концентратора напряжения, зарождение и распространение трещины. Отмечено, что стандартные методы позволяют проводить определения трещиностойкости на втором и третьем этапах, а обсуждаемый метод EF – на всех трех этапах; при этом испытания можно выполнять на образцах малых размеров. Сопротивление скалыванию  $F_R$  определяли с помощью индентора Роквелла на образцах оксидной и неоксидной линейно-упругой и неупругой керамики, а также керамических композитов. Установлено, что величины  $F_R$  для гомогенной линейно-упругой керамики инвариантны (не зависят от нагрузки скалывания и размеров шрама скола). Показано, что на диаграмме сопротивление скалыванию – критический коэффициент интенсивности напряжений слева от базовой линии находятся экспериментальные данные для керамики с повышенным сопротивлением повреждению по сравнению с гомогенной линейно-упругой керамикой, экспериментальные значения которой укладываются на эту линию. Справа от базовой линии находятся экспериментальные данные для керамики с повышенным сопротивлением распространению трещин. Предложены диаграммы сопротивления керамики распространению трещин (R-линии), аналогичные известным R-кривым, но определяемые при скалывании кромок керамических образцов. Для гомогенной линейно-упругой керамики эти линии – плоские, что свидетельствует об инвариантности ее поверхностной энергии.*

**Ключевые слова:** керамика, трещиностойкость, индентирование, сопротивление скалыванию, R-линии.

### 1. Введение.


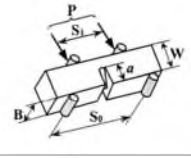

1.1. *Керамика и оценки трещиностойкости.* В эпоху технического прогресса интерес к современной технической керамике непрерывно возрастает. И хотя на разработку этих материалов тратятся значительные силы и средства, они все еще не способны конкурировать с металлами при интенсивных силовых нагрузках. Например, широко разрекламированная диоксидциркониевая “керамическая сталь” ( $K_{Ic} \sim 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ) [1], как и ламинарные (слоистые) композиты из оксида алюминия с диоксидом циркония ( $K_{Ic} \sim 30 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ) [2], при практическом применении оказалась значительно хуже сопротивляющейся разрушению, чем предполагалось на основании результатов лабораторных исследований ее трещиностойкости.

Трещиностойкость керамики долгое время оценивали различными методами, предназначенными для испытания металлов. И лишь в 90-х годах прошлого века начали стандартизировать методы ее испытания на трещиностойкость, а также проводить международные исследования с целью сравнительной оценки этих методов (Round Robins [3]). Для таких испытаний рекомендуется применять разрушаемые при изгибе образцы в виде прямоугольных балок, на которые наносятся концентраторы напряжения различной формы (табл. 1) [4]. Интересно, что эти методы не особенно отлича-

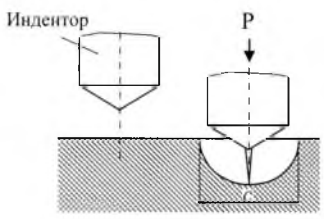
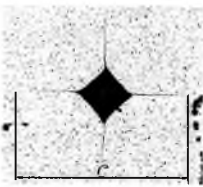
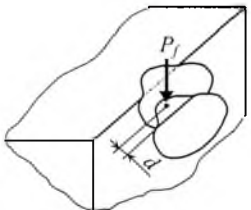
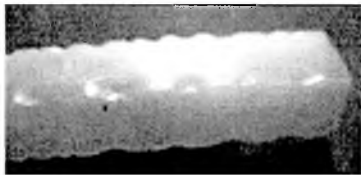
ются от метода, основанного на идеях работы [5], задачей которой была разработка стандарта, предназначенного для испытания металлических материалов. И даже специалисту бывает нелегко выбрать “оптимальный” метод, так как далеко не все они пригодны для оценки различной керамики и не всегда применимы в условиях обычной лаборатории. Возможно поэтому (если судить по публикациям) технологи часто применяют более простые методы испытаний: метод SENB (табл. 1), упрощенный (трещина заменена пропилом) вариант метода SEPB, расчетные формулы для которого взяты из [5], и метод IF [6] (табл. 2), основанный на анализе трещин, образовавшихся при внедрении индентора в полированную поверхность образца. Следует заметить, что, в отличие от случая металлических материалов [7], результаты исследования трещиностойкости керамики пока еще редко применяются при конструкторских расчетах сопротивления изделий распространению в них опасных трещин, а лишь используются с целью сравнительной численной оценки ее сопротивления разрушению. Иначе говоря, последнее в какой-то степени напоминает эпоху палеолита, когда для изготовления инструментов и оружия приходилось работать с такими хрупкими материалами, как камни.

Т а б л и ц а 1

**Традиционные методы испытания керамики на трещиностойкость  
(объединены этапы 2 и 3 разрушения образца)**

| Образец   | Концентратор напряжения<br>(этап 1 разрушения)  | Характеристика  |
|---|---|---|
|  | SEPB [8]<br><br>(Single Edge<br>Precracked Beam) | Аналогичный используемому при испытаниях металлов. Точность измерения зависит от структуры материала.                                 |
|  | CNB [8]<br><br>(Chevron Notched Beam)            | При испытаниях регистрируют зависимости – прогиб, изготовить точный шевронный надрез в образце технически достаточно сложно.          |
|  | SCF [8]<br><br>(Surface Crack in Flexure)        | Применим для испытания плотных мелкозернистых материалов.   |
|  | SEVNB [9]<br><br>(Single Edge<br>V-Notched Beam) | Оптимальный метод, пригодный для испытания различной керамики, характеризуется ограниченным разбросом экспериментальных данных [3].   |
|  | SENB<br><br>(Single Edge<br>Notched Beam)        | Приближенный (технологический) метод. Значения трещиностойкости могут быть значительно выше, определяемых по стандартным методам [3]. |

Трехэтапные методы других авторов

| Схема метода  | Испытанный образец  |
|---|---|
|  <p data-bbox="486 651 619 678">Метод IF [6]</p>           |  <p data-bbox="943 629 1136 656">Керамика LaCoO<sub>3</sub></p>         |
| <p data-bbox="427 701 687 728">Скалывание кромки [10]</p>  |  <p data-bbox="837 913 1241 940">Диоксидциркониевая керамика Prozug</p> |

1.2. *Анализ методов испытаний.* Разрушение – локальный процесс, который при испытаниях на трещиностойкость можно условно разделить на три этапа: формирование источника разрушения (концентратора напряжения), зарождение трещины и ее неконтролируемое (или контролируемое) распространение. В соответствии с этим подходом современные методы испытаний на трещиностойкость формально делятся на две группы. К первой относятся двухэтапные методы (табл. 1), согласно которым на образец сначала наносится концентратор напряжения, и только после этого образец разрушается при изгибе. Вторая группа объединяет трехэтапные методы, основанные на применении индентора и не предполагающие предварительного формирования концентратора напряжения в образце. Эти группы отличаются тем, что для первой из них необходимы образцы определенной формы и размеров, которые не всегда можно изготовить из испытуемого материала. Для второй группы (табл. 2) используются образцы произвольной формы (или керамические изделия), и при этом разрушается небольшой объем материала. При такой неформальной классификации методов следует обратить внимание на их принципиальные отличия. Вначале рассмотрим методы (табл. 1), которые основываются на представлениях линейной механики разрушения, фактически предполагающей квазихрупкий процесс разрушения материала<sup>1)</sup> [11]. В этом случае поверхностная энергия Гриффитса  $\gamma$  [14] заменена необратимой энергией диссипации в тонком слое пластических деформаций вблизи поверхности трещины ( $\gamma_p$ ), которая в тысячи раз больше величины  $\gamma$  [15]. Керамика рассматривается

<sup>1)</sup> В механике разрушения понятия “материал” и “металл” часто [11, 12] рассматриваются как идентичные. Только в последнее время [13] начали обращать внимание на специфические особенности структуры и процесса разрушения керамики.

как хрупкий материал [16], который разрушается, не достигая предела текучести, значение которого для нее обычно выше предела прочности. Такой подход к изучению керамики равнозначен игнорированию всего многообразия ее структуры и деформационного поведения [17], что может быть причиной недостоверных оценок ее действительного сопротивления разрушению. С представлениями механики разрушения связан также трех-этапный метод IF (табл. 2), согласно которому разрушение керамики осуществляется с помощью индентора, т.е. метод в определенной мере близок к использованному в настоящей работе. Этот метод предусматривает не изучение распространяющихся трещин, что характерно для всех других методов испытаний на трещиностойкость, а анализ остановившихся трещин после внедрения индентора Виккерса в поверхность образца. Он применим только тогда, когда четко видны трещины, образовавшиеся у углов отпечатка индентора (табл. 2), что далеко не всегда реально на практике. Например, на рис. 1 показан отпечаток индентора на поверхности образца керамики Се-TZP, окруженный зоной фазового перехода, что не было обнаружено в [18], и эта керамика ошибочно была представлена как материал, обладающий высокой трещиностойкостью ( $K_{Ic} \sim 30 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ). При сравнении результатов определений  $K_{Ic}$  по методу IF и по методам, указанным в табл. 1, неоднократно обращали внимание на их несовпадение [19, 20]. Для повышения точности результатов, полученных методом IF, был выведен ряд формул, но они оказались неэффективными. Например, результаты расчетов по данным испытаний стекла с использованием 14 таких формул отличались на 300% [21]. Примерно то же имело место для карбида кремния [22], а также для другой керамики. Недостатком этого метода является также то, что для расчетов значений  $K_{Ic}$  необходимы величины модулей упругости керамики, определение которых далеко не всегда простая задача. Поэтому можно согласиться с [19], что он пригоден только для сравнительных оценок керамики в рамках одной лаборатории, но не может быть стандартным методом [23], как это рекомендовалось ранее [24].

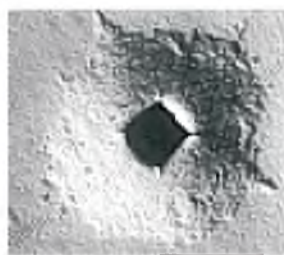


Рис. 1. Отпечаток индентора Виккерса на полированной поверхности образца диоксид-циркониевой керамики Се-TZP.

Кроме того, все вышерассмотренные методы являются методами “непрямых” определений сопротивления керамики разрушению, так как при расчетах величин критических коэффициентов интенсивности напряжений (далее трещиностойкость) по результатам проведенных испытаний используются формулы, корректирующие (идеализирующие) ее реальное механическое поведение.

Прямые определения сопротивления хрупких материалов разрушению начались в далекой древности, когда от удара одного камня по другому откалывались небольшие кусочки, затем из этих камней выбирали наименее разрушенный, который использовался для изготовления инструмента или оружия. К прямым определениям также относятся оценка трещиностойкости [25] по значениям поверхностной энергии Гриффитса  $\gamma$  [14], определение работы разрушения при изгибе (отношение площади под диаграммой нагрузка на образец с концентратором напряжения – прогиб образца к площади поверхности разрушения этого образца) [26], а также метод испытаний, предполагающий скалывание кромок образцов [10] (табл. 2). Последний основан на том, что отношение усилия, вызвавшего скол прямоугольной кромки образца, к любому размеру образовавшегося скола не зависит от величины этого усилия в случае использования индентора Роквелла [27] (правомерность этой зависимости была подтверждена при разрушении кромок образцов инденторами Виккерса и Кнуппа [28–30]). В случае метода [10], который можно рассматривать как прототип метода наших исследований [29, 31], необходимо использовать специальную экспериментальную установку с перемещающимся микроскопом, обеспечивающим точность выбора точки внедрения индентора в поверхность образца. Согласно этому методу характеристика сопротивления хрупкого материала сколу  $M$  определяется как отношение усилия, при котором произошел скол, к расстоянию  $d$  от точки внедрения индентора до кромки образца (табл. 2). Он позволил успешно сравнивать, например, стойкость хрупких материалов к разрушению кромок образцов, в том числе закаленных сталей [32], предназначенных для режущего инструмента, а также стоматологической керамики [33], протезы из которой должны выдерживать скалывающую нагрузку и т.п. Однако оценка сопротивления керамики разрушению по этому методу не соответствуют характеристикам трещиностойкости ( $K_{Ic}$  и  $G_{Ic}$ ), получаемым по стандартным методам [32, 34] (подробней в [29, 31]).

В работе [29] на обычной испытательной установке изучалась сопротивляемость керамики скалыванию и разработан метод EF (международное название Edge Fracture). С помощью этого метода были определены величины сопротивления разрушению керамики при сколе, которые оказались пропорциональными, полученным по традиционному (SEVNB в табл. 1). Однако не все результаты испытаний строго соответствовали этой зависимости. В [31] изучалась только линейно-упругая керамика и была показана пропорциональность результатов испытаний, полученных при скалывании и изгибе образцов, что подтвердило целесообразность дальнейших работ в рассматриваемом направлении.

Целью настоящего исследования<sup>2)</sup> является более глубокое изучение предложенного подхода к оценке сопротивления различных керамических материалов разрушению, без чего невозможно рассматривать его в качестве возможного стандартного метода испытания керамики.

<sup>2)</sup> В исследовании участвовали сотрудники Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины В. И. Галенко, Б. И. Озерский и Т. А. Христович.



**2. Материалы и методика.** Для проведения исследований была выбрана линейно-упругая гомогенная и гетерогенная керамика, а также керамический композит с рассеянной армирующей фазой. Кроме того, исследовалась неупругая керамика. Это позволило получить новую информацию о механическом поведении рассматриваемого класса материалов при скалывании их кромок. Керамика, предназначенная для экспериментов (табл. 3), в основном представляла собой промышленные образцы из разных стран мира и различалась по химическому составу, технологии изготовления и структуре. Характеристикой ее неупругости служила мера хрупкости  $\chi$  [17], равная единице для линейно-упругой керамики и уменьшающаяся при увеличении нелинейности ее деформирования. Образцами служили прямоугольные балки сечением примерно  $3 \times 4$  мм, поверхности которых шлифовались, а затем полировались алмазной пастой. Радиус закругления их кромок составлял не более 20–30 мкм. Подготовленные для исследования образцы вначале испытывались на трещиностойкость по методу SEVNB [35], а затем их обломки использовались в качестве образцов при испытаниях по методу EF.

Т а б л и ц а 3

Характеристики керамики

| Керамика                              | Обозначение                         | $\chi$ | $E$ ,<br>ГПа | $\sigma$ ,<br>МПа | $K_{Ic}$ ,<br>МПа $\cdot$ м <sup>1/2</sup> | $E_{IR}$ ,<br>Н/мм | $F_R$ ,<br>Н/мм | $n$<br>(EF) |
|---------------------------------------|-------------------------------------|--------|--------------|-------------------|--|--------------------|-----------------|-------------|
| Гомогенная линейно-упругая керамика   |                                     |        |              |                   |  |                    |                 |             |
| Оксид скандия                         | Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | 1,00   | 218          | 110               | 1,49                                       | 148                | 176             | 114         |
| Оксид иттрия                          | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 1,00   | 193          | 75                | 3,14                                       | 336                | 292             | 113         |
| Оксид алюминия                        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1   | 1,00   | 322          | 329               | 3,06                                       | 376                | 290             | 185         |
|                                       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2   | 1,00   | 232          | 269               | 2,93                                       | 323                | 267             | 140         |
|                                       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3   | 1,00   | 405          | 192               | 3,13                                       | 379                | 303             | 125         |
|                                       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -4   | 1,00   | –            | –                 | 3,13                                       | 415                | 304             | 115         |
| Диоксид циркония                      | Y-PSZ                               | 1,00   | 197          | 425               | 4,96                                       | 533                | 475             | 125         |
| Нитрид кремния                        | GPSSN                               | 1,00   | 320          | 920               | 5,36                                       | 567                | 502             | 100         |
|                                       | HPSN                                | 1,00   | –            | –                 | 4,16                                       | 403                | 422             | 100         |
|                                       | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>      | 1,00   | 270          | 486               | 4,32                                       | 403                | 395             | 154         |
| Гетерогенная линейно-упругая керамика |                                     |        |              |                   |  |                    |                 |             |
| Диоксид циркония                      | MgO-PSZ                             | 1,00   | 205          | 549               | 3,79                                       | 708                | 474             | 142         |
| Карбид кремния                        | EKasic®T                            | 1,00   | 433          | 600               | 3,48                                       | 388                | 422             | 105         |
| Композит                              | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> +TiC | 1,00   | 291          | 700               | 5,23                                       | 509                | 438             | 203         |
| Неупругая керамика                    |                                     |        |              |                   |  |                    |                 |             |
| Диоксид циркония                      | TS-grade                            | 0,42   | 193          | 609               | 9,20                                       | 696                | 433             | 129         |
|                                       | SF-S-TS                             | 0,61   | 208          | 640               | 5,13                                       | 662                | 438             | 183         |

**Примечание:**  $E$  – модуль упругости,  $\sigma$  – предел прочности,  $K_{Ic}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений,  $E_{IR}$  – характеристика скалывания,  $F_R$  – сопротивление скалыванию,  $n$  – число экспериментальных точек.

При изучении сопротивления керамики скалыванию использовалась методика испытаний, апробированная в [30, 31]. Суть методики заключалась в выборе точки, расположенной вблизи кромки образца, и выполнении скола с помощью стандартного монокристаллического алмазного индентора Роквелла<sup>3)</sup>, к которому прилагалось усилие, регистрировавшееся компьютером. Для получения статистически достоверных опытных данных операция скалывания повторялась многократно. Затем бинокулярным микроскопом Olimpus 51MX на испытанных образцах измеряли размеры шрамов сколов  $L$  (рис. 2), длина которых колебалась от 75 до 500 мкм.



Рис. 2. Схема измерения размеров шрама скола на поверхности испытанного образца.

По значениям размеров шрамов скола  $L$  и нагрузки  $P_f$ , вызвавшей скол, строили диаграммы разрушения (зависимости  $P_f - L$ ). Они были линейными для линейно-упругой керамики и нелинейными для неупругой керамики (рис. 3,а). Эти зависимости послужили основой для анализа результатов экспериментов и получения значений характеристики скола  $E_{IR}$  (табл. 3), определявшейся по методу линейной регрессии [36] как наклон прямой линии, аппроксимирующей экспериментальные точки. Независимость величины характеристики скола от разрушающей нагрузки указывает не только на то, что она может рассматриваться в качестве механической характеристики, но и на то, что энергия разрушения [13] в этих случаях инвариантна.

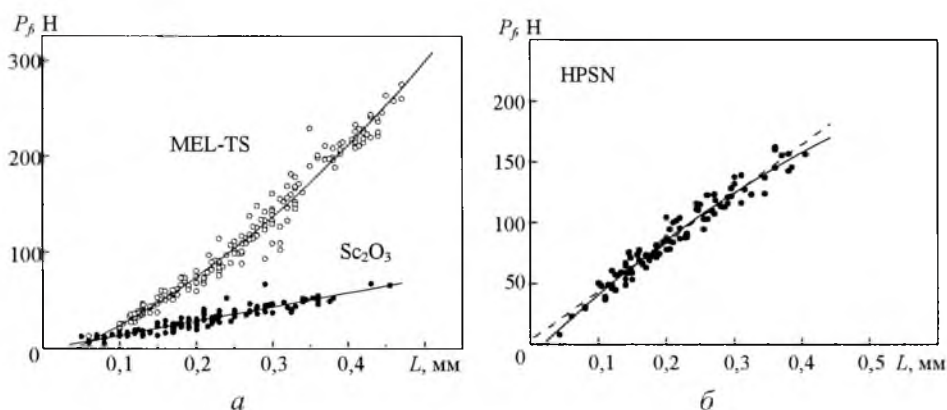


Рис. 3. Диаграммы разрушения.

<sup>3)</sup> Gilmore Diamond Tools, Inc., USA.

### 3. Результаты и их анализ.

3.1. *Базовая линия и коррекция значений  $K_{Ic}$* . Рассматривая результаты предыдущих работ [29, 31] и настоящего исследования, нельзя не заметить, что аппроксимирующая линия на диаграммах разрушения не всегда пересекает начало координат. Для установления возможной причины этого было проведено дополнительное исследование и выявлено, что далеко не во всех случаях эти диаграммы, даже соответствующие гомогенной линейно-упругой керамике, строго линейны (рис. 3,б). Вероятно, такая нелинейность (кроме экспериментальных погрешностей) является одной из причин возможного разброса данных на зависимостях  $E_{tR} - K_{Ic}$ , в том числе и для гомогенной линейно-упругой керамики [31]. Поэтому далее в качестве характеристики сопротивления керамики разрушению рассматривается только сопротивление скалыванию<sup>4)</sup>  $F_R$ , рассчитываемое как среднее значение отношения разрушающей нагрузки при скалывании  $P_f$  к величине шрама скола  $L$  ( $F_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{fi} / L_i$ ,  $n$  – число экспериментальных точек).

Для подтверждения достоверности результатов работы [31] были проведены дополнительные испытания гомогенной линейно-упругой керамики (табл. 3), данные которых также нанесены на диаграмму  $F_R - K_{Ic}$  (рис. 4,а). Из рис. 4,а следует, что появление полученных точек не изменило характер базовой диаграммы. Поэтому она может рассматриваться как “базовая” при дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении. Также видно, что при испытаниях по методу EF керамики, подобной по механическому поведению материалу, исследованному в работе [14], значения характеристик  $F_R$  и  $K_{Ic}$  оказываются пропорциональными. Пропорциональность величин  $F_R$  и  $K_{Ic}$  можно считать своеобразным подтверждением однозначности энергетического и силового подходов к оценке трещиностойкости гомогенного линейно-упругого материала согласно принципам линейной механики разрушения [7, 13].

На основании вышеизложенного в первом приближении можно сделать следующее предположение. Вероятно, обсуждавшиеся результаты определения трещиностойкости, полученные на одних и тех же образцах керамики, поведение которой не противоречит модели твердого тела линейной механики разрушения, можно рассматривать как достоверные, так как они аналогичны, несмотря на то что получены с использованием различных методов испытаний (EF и SEVNB).

Точки, соответствующие результатам определения сопротивления неупругой керамики скалыванию, располагаются справа от базовой линии (рис. 4,б). Там же находятся, например, значения  $F_R$  для композиционной керамики  $Si_3N_4+TiC$ , при скалывании кромок образцов которой возникали дополнительные трещины, а разрушающие трещины иногда останавливались (рис. 5), что связано с характерным, но не всегда контролируемым процессом разрушения. Для выяснения возможной причины такого располо-

<sup>4)</sup> Ранее нами использовался термин “вязкость скалывания” [31]. Однако, приняв во внимание, что термин “вязкость” в механике разрушения [11] относится к пластическому деформированию материалов, ввели более точное определение “сопротивление скалыванию”.



жения опытных данных в качестве примера выбрали керамику TS-grade, для которой характерны нелинейные диаграммы деформирования и разрушения, и предприняли попытку наложить точку ★ на базовую линию (рис. 6,а). В результате оказалось, что получена новая (точнее, скорректированная) характеристика трещиностойкости, которую обозначили  $K_{Ica}$ . По величине она примерно равна начальному значению  $K_R$  на  $R$ -кривой [37] для этой керамики (рис. 6,б).

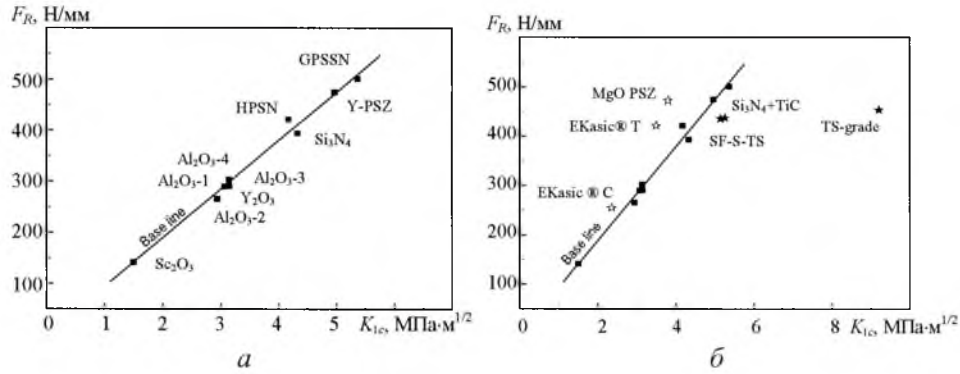


Рис. 4. Зависимости сопротивления скалыванию от критического коэффициента интенсивности напряжений: а – базовая линия, аппроксимирующая результаты испытания линейно-упругой керамики; б – результаты испытаний керамики, не соответствующие базовой линии.

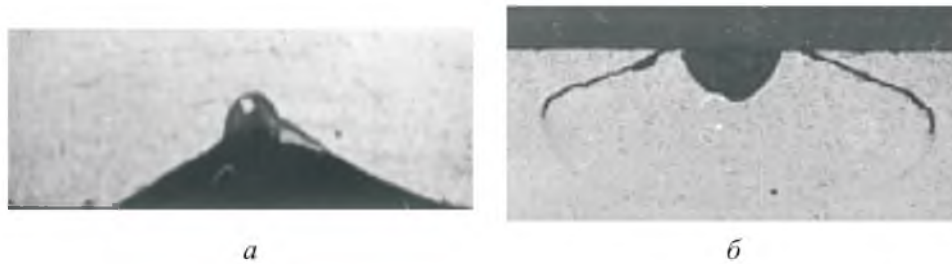


Рис. 5. Зона разрушения образца композиционной керамики  $Si_3N_4+TiC$ : а – вид сверху; б – вид сбоку.

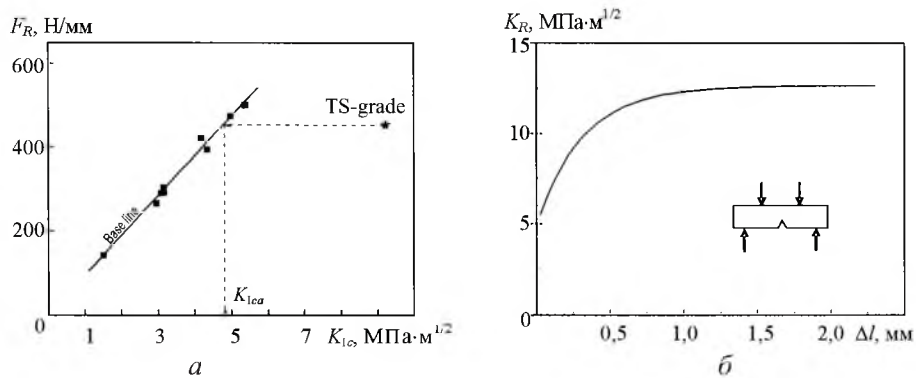


Рис. 6. Корректировка критического коэффициента интенсивности напряжений керамики TS-grade [37].

Точки, соответствующие результатам испытания гетерогенной линейно-упругой керамики, располагаются слева от базовой линии (рис. 4,б). Если сравнить сколы на образцах этой керамики и керамики, точки которой соответствуют базовой линии (например, GPSSN), то представляется, что первая из них лучше сопротивляется разрушению на первом его этапе, когда в образце формируется источник разрушения (образование зоны повреждения керамики). Критерием при таком анализе может служить, например, коэффициент повреждаемости  $k$ , равный отношению ширины ядра повреждения  $K$  к ширине скола  $w$  (рис. 7). Это отчетливо видно на сколах керамики EKasic®, которая используется при изготовлении брони [38].

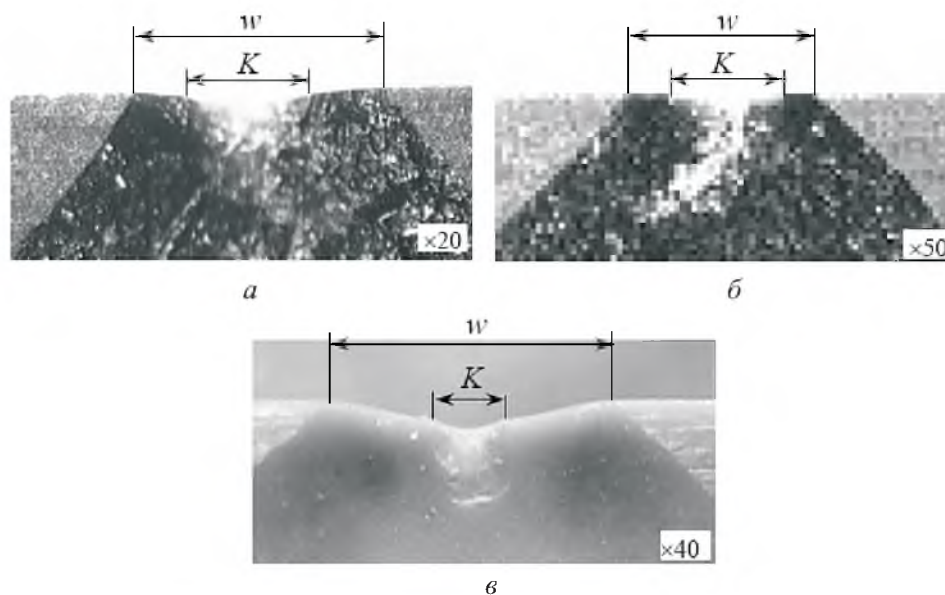


Рис. 7. Шрамы сколов на образцах керамики: *а* – EKasic®; *б* – Tetrabor®; *в* – GPSSN (вид сбоку).

Располагая вышеупомянутой информацией, можно сделать второе предположение. Если в результате испытаний одних и тех же образцов с использованием отличающихся между собой методов EF и SEVNB были получены неоднозначные данные, то это может означать, что либо оба метода, либо один из них являются недостоверными для рассматриваемого случая. Сомнение может вызвать метод SEVNB, но не метод EF, который предполагает прямые измерения, а поэтому на результаты испытаний, полученные при его использовании (как это имело место при применении подобного метода в доисторическую эпоху), не должны влиять особенности испытуемого материала. Однако в действительности это связано с тем, что метод EF ориентирован на оценку сопротивления керамики образованию и срастанию трещины, а особенностью метода SEVNB является возможность определения сопротивления керамики распространению трещины.

Таким образом, полученные данные и их анализ свидетельствуют о том, что метод EF может использоваться наравне с другими методами испытаний на трещиностойкость.

3.2. *Линия сопротивления разрушению (R-линия)*. Установлено, что экспериментальные точки для негомогенной линейно-упругой керамики располагаются слева от базовой линии, вероятно, благодаря повышенной сопротивляемости повреждению (формированию концентратора напряжения). А точки для неупругой и композиционной керамики, обладающей повышенной способностью сопротивляться распространению стартовавшей трещины, находятся справа от базовой линии (рис. 4,б). Иначе говоря, базовая линия может быть полезной при оценке особенностей сопротивления керамики разрушению. Была предпринята попытка более четкого графического представления вышеизложенного путем построения линий сопротивления разрушению (*R*-линии) в виде зависимости сопротивления скалыванию от размеров шрама скола, т.е. от увеличения поверхности разрушения (размеров поверхности шрамов сколов на образце). *R*-линия отличается от известной *R*-кривой [7] тем, что является зависимостью характеристики трещиностойкости от двухкоординатного изменения поверхности разрушения и строится по тем же экспериментальным данным, по которым определяются значения  $F_R$ . В отличие от этого, *R*-кривая является зависимостью трещиностойкости от длины распространяющейся разрушающей трещины (однокоординатное изменение поверхности разрушения). В нашем случае сопротивление росту трещины можно выразить как  $R_{Sf} = dA/dS$  ( $A$  – энергия, необходимая для роста трещины,  $S$  – удельная поверхность разрушения), в случае *R*-кривой – аналогичной величиной  $R = dA/da$ , где  $a$  – длина трещины [3]. Заметим также, что для построения *R*-кривой необходимы результаты испытаний, соответствующие контролируемому распространению трещины, а это обуславливает использование нагружающих систем высокой жесткости. И при этом необходимы дополнительные образцы, помимо тех, которые используются для определения величины  $K_{Ic}$  изучаемой керамики.

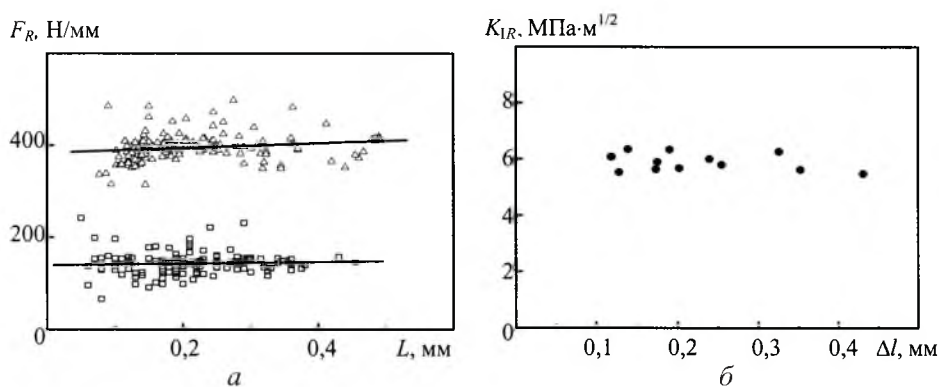


Рис. 8. *R*-линии для  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $\Delta$ ),  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  ( $\square$ ) (а) и *R*-кривая для  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [19] (б).

*R*-линии гомогенной линейно-упругой керамики (например, рис. 8,а) располагаются параллельно оси  $L$ , т.е. являются плоскими. Это свидетельствует об отсутствии у такой керамики механизма, тормозящего распространение трещины, что также подтверждается плоской *R*-кривой подобной керамики (рис. 8,б [19]), которая обусловлена инвариантностью поверх-

ностної енергії [13]. Для остальної кераміки  $R$ -лінії являються зростаючими і можуть бути лінійними або нелінійними (рис. 9,а), а також схожими з початковими участками  $R$ -кривих для тієї ж кераміки (рис. 9,б).

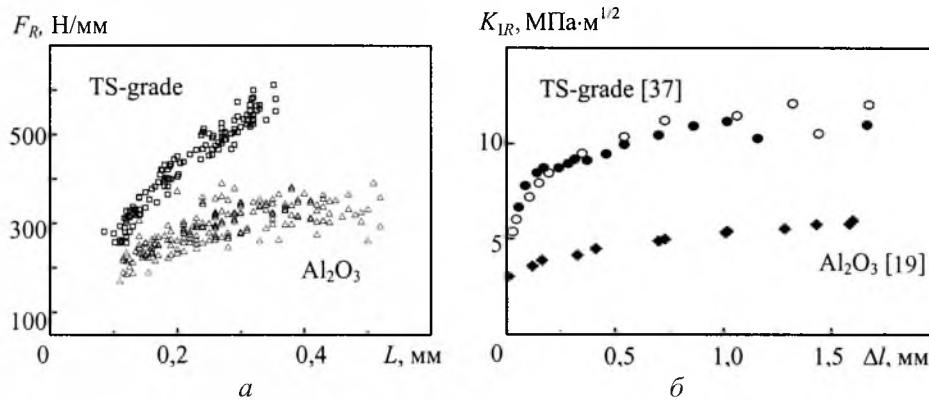


Рис. 9. Нелінійні  $R$ -лінії (а) і  $R$ -криві (б) для діоксидцирконієвої і оксидалюмінієвої кераміки (○ – оптичні, ● – АЕ вимірювання).

В заключення відзначимо, що  $R$ -лінії можуть представляти інтерес для будь-яких досліджень тріщиностійкості кераміки, так як містять цінну інформацію про особливості її руйнування.

## Резюме

Проаналізовано сучасні методи визначення тріщиностійкості кераміки та показано, що процес руйнування зразків можна поділити на три етапи: формування концентратора напруження, зародження і поширення тріщини. Відзначається, що стандартні методи дозволяють проводити визначення на другому і третьому етапах, а метод ЕФ, що обговорюється, – на всіх трьох етапах; при цьому випробування можна проводити на зразках малих розмірів. Опір сколюванню  $F_R$  визначався за допомогою індентора Роквелла на зразках оксидної та неоксидної лінійно-пружної і непружної кераміки, а також керамічних композитів. Установлено, що величини  $F_R$  для гомогенної лінійно-пружної кераміки інваріантні (не залежать від навантаження сколювання і розмірів шраму відколу). Показано, що на діаграмі опір сколюванню – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень ліворуч від базової лінії знаходяться значення для кераміки з підвищеним опором пошкодженню в порівнянні з гомогенною лінійно-пружною керамікою, експериментальні значення якої лягають на цю лінію. Праворуч від базової лінії знаходяться експериментальні значення для кераміки з підвищеним опором поширенню тріщин. Пропонуються діаграми опору кераміки поширенню тріщин ( $R$ -лінії), аналогічні відомим  $R$ -кривим, але визначені шляхом сколювання кромки керамічних зразків. Для гомогенної лінійно-пружної кераміки ці лінії – плоскі, що свідчить про інваріантність її поверхневої енергії.

1. *Garvie R. C., Hannink R. H. J., and Pascoe R. T.* Ceramic steel? // *Nature*. – 1975. – **258**. – P. 703 – 704.
2. *Blatter A. J., Lakshminareyanan R., and Shetty D. K.* Toughening of layered ceramics composites with residual surface compression: Effect of layer thickness // *Eng. Fract. Mech.* – 2001. – **68**. – P. 1 – 7.
3. *Gogotsi G. A.* Fracture toughness studies on ceramics and ceramic particulate composites at different temperature // *Fracture Resistance Testing of Monolithic and Composite Brittle Materials*. – ASTM STP 1409 / J. A. Salem, G. D. Quinn, and M. G. Jenkins (Eds.). – Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2002. – P. 76 – 92.
4. *Гогоци Г. А.* Трещиностойкость современной керамики и керамических композитов // *Порошк. металлургия*. – 2004. – № 7/8. – С. 54 – 67.
5. *Brown W. F. and Srawley J. E.* Plain strain crack toughness testing of high strength metallic materials // *ASTM STP 410*. – Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 1966. – P. 63 – 65.
6. *Evans A. G. and Charles E. A.* Fracture toughness determination by indentation // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1976. – **59**, No. 7-8. – P. 371 – 372.
7. *Broek D.* *The Practical Use of Fracture Mechanics*. – Dordrec: Kluwer, 1989. – 522 p.
8. *ASTM C1421-99.* Standard Test Method for the Determination of Fracture Toughness of Advanced Ceramics at Ambient Temperature // *Annual Book of ASTM Standards*. – Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1999.
9. *CEN/TS 14425-5:2004.* Advanced Technical Ceramics. Test Methods for Determination of Fracture Toughness of Monolithic Ceramics. Pt. 5: Single-Edge V-Notch Beam (SEVNB) Method. – Brussels: CEN, 2004.
10. *McCormick N. and Almond E.* Edge flaking of brittle materials // *J. Hard Mater.* – 1990. – **1**, No. 1. – P. 25 – 51.
11. *Броек Д.* Основы механики разрушения. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.
12. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Партон В. З.* Основы механики разрушения. – Киев: Наук. думка, 1988. – Т. 1. – 487 с.
13. *Anderson T. L.* *Fracture Mechanics: Fundamentals and Application*. – Boca Batton: CRC Press, 1995. – Second edition. – 688 p.
14. *Griffiths A. A.* The phenomena of rupture and flow in solids // *Phil. Trans. Roy. Soc.* – 1920. – **221A**. – P. 163 – 198.
15. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
16. *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
17. *Gogotsi G. A.* Deformation behavior of ceramics // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 1991. – No. 2. – P. 87 – 92.
18. *Tsacuma K.* Mechanical properties and thermal stability of CeO<sub>2</sub> containing tetragonal zirconia polycrystal // *Amer. Ceram. Soc. Bull.* – 1985. – No. 12. – P. 1594 – 1596.



19. *Primas R. J. and Gstrein R.* ESIS TC6 Round Robin on Fracture Toughness // EMPA Report No. 155'088. – Dubendorf: Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 1995.
20. *Fischer H. and Marx R.* Fracture toughness of dental ceramics: comparison of bending and indentation method // *Dental Mater.* – 2002. – No. 1. – P. 112 – 119.
21. *Ray K. K. and Dutta A. K.* Comparative study on indentation fracture toughness evaluations of soda-lime-silica glass // *Brit. Ceram. Trans.* – 1999. – **98**, No. 4. – P. 165 – 171.
22. *Li Z., Ghosh A., Kobayash A., and Bradt R.* Indentation fracture toughness of sintered silicon carbide in the Palmqvist crack regime // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1989. – **72**, No. 6. – P. 904 – 911.
23. *Quinn G. D., Salem J., Isa Bar-On I., Cho K., et al.* Fracture toughness of advanced ceramics at room temperature // *J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol.* – 1992. – No. 97. – P. 579 – 607.
24. *JIS R 1607.* Testing Method for Fracture Toughness Evaluation of High Performance Ceramics. – Tokyo: Japanese Standards Association, 1990.
25. *Wiederhorn S. M.* Brittle fracture and toughening mechanisms in ceramics // *Ann. Res. Mater. Sci.* – 1984. – **14**. – P. 373 – 403.
26. *Clark F., Tattersall H., and Tappin G.* Toughness of ceramics and their work of fracture // *Proc. Brit. Ceram. Soc.* – 1966. – No. 6. – P. 163 – 172.
27. *Almond E. and McCormick N.* Constant geometry edge flaking of brittle materials // *Nature.* – 1986. – **321**. – P. 53 – 55.
28. *Гогоци Г., Мудрик С., Квинн Ж.* Трещиностойкость кромки нитридо-кремниевой керамики: методика и результаты // *Международ. конф. “Новейшие технологии в порошковой металлургии и керамике”*: Тез. докл. – Киев: ИПМ, 2003. – С. 375 – 376.
29. *Gogotsi G. A., Mudrik S. P., and Rendtel A.* Sensitivity of silicon carbide and other ceramics to edge fracture: method and results // *28th Int. Conf. Advances Ceramics and Composites / E. Lara-Curzio and M. Readey (Eds.)*. – Westerville: American Ceramic Society, 2004. – **25**. – P. 156 – 163.
30. *Гогоци Г. А., Мудрик С. П.* Трещиностойкость керамики при скалывании кромок образцов // *Пробл. прочности.* – 2004. – №. 5. – С. 133 – 137.
31. *Гогоци Г. А., Галенко В. И., Озерский Б. И., Христович Т. А.* Сопrotивление керамики разрушению: метод скалывания кромки // *Там же.* – 2005. – №. 5. – P. 84 – 92.
32. *Morrell R. and Gant A.* Edge chipping – what does it tell us? // *Fractography of Glasses and Ceramics IV / J. R. Varner and G. D. Quinn (Eds.)*. – Westerville: American Ceramics Society, 2001. – **122**. – P. 23 – 41.
33. *Quinn J. and Lloyd I.* Flake and scratch size ratios in ceramics // *Ibid.* – P. 57 – 72.
34. *Petit F., Descamps P., Erauw J. P., and Cambier F.* Toughness ( $K_{Ic}$ ) measurement by a sliding indentation method // *Key Eng. Mater.* – 1992. – **206–213**. – P. 629 – 632.

35. *Gogotsi G. A.* Fracture toughness of ceramics and ceramic composites // *Ceram. Int.* – 2003. – **29**. – P. 777 – 784.
36. *Стеннов М. Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1985. – 231 с.
37. *Gogotsi G. A., Drozdov A. V., Zavada V. P., and Swain M. V.* Comparison of the mechanical behavior of partially stabilized zirconia with yttria and magnesia // *J. Austr. Ceram. Soc.* – 1991. – No. 27. – P. 37 – 49.
38. *Schwetz K., Kempf T., Saldsieder D., and Telle R.* Toughness and hardness of LPS–SiC and LPS–SiC based composites // 28th Int. Conf. Advances Ceramics and Composites / E. Lara-Curzio and M. Readey (Eds.). – Westerville: American Ceramics Society, 2004. – **25**. – P. 579 – 588.

Поступила 26. 12. 2005