

Механическое поведение керамики и стекла при локальных разрушениях кромок образцов индентором Роквелла

В. В. Хворостяный

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

Экспериментально исследовано механическое поведение керамики и стекла в условиях локального нагружения образцов индентором согласно представленной методике испытаний. Оценено влияние царапания на сопротивление разрушению материала при сопоставлении результатов испытаний, полученных двумя методами, предусматривающими повреждение кромки образца при царапании (S+EF метод) и без такового (EF метод). На основе анализа экспериментальных данных показаны закономерности разрушения исследуемых хрупких материалов в таких условиях испытаний.

Ключевые слова: керамика, царапание, скалывание кромки, шрам скола, сопротивление разрушению.

Введение. В настоящее время много внимания уделяется разработке новых методов испытаний для определения сопротивления хрупких материалов разрушению в условиях локального механического нагружения. Один из таких методов – метод краевого скалывания. Его суть заключается в определении сопротивления разрушению кромки образца при внедрении индентора посредством измерения разрушающей нагрузки, приложенной к последнему, и характерного размера образованного скола [1–3]. Ранее [4, 5] этот метод был назван EF методом (Edge fracture (flaking) method). Среди таких достоинств метода, как простота практического применения, воспроизводимость результатов испытаний и их достоверность, необходимо отметить то, что он не основан на каких-либо модельных представлениях. Это позволяет получать объективные данные о механическом поведении хрупких материалов. Испытания на царапание индентором поверхности образца до момента скалывания его кромки позволили модифицировать предложенный метод [6], получивший название S+EF метода (Scratch+Edge fracture method) [7, 8]. Таким образом, во время эксперимента воспроизводились условия, наиболее близкие к реальным эксплуатационным или технологическим процессам для хрупких материалов. Например, это широко используемая керамика функционального назначения, в том числе и в медицинской практике, работоспособность которой определяется такими механическими свойствами, как трещиностойкость, твердость, износостойкость и др. Результаты экспериментов методом царапания индентором поверхности образца до скалывания его кромки позволили сформулировать важные практические рекомендации для регулирования более эффективного процесса обработки хрупких керамических материалов, принимая во внимание их механические свойства [9]. При этом, несомненно, важно было оценить влияние привнесенной царапанием концентрации напряжений в условиях локального нагружения индентором.

Как известно, при испытаниях на царапание индентором определяли твердость материала. Благодаря удобству, простоте и доступности метода царапания он применялся в качестве материаловедческих проб [10–12]. Сочетание царапания и скалывания кромки позволило начать разработку нового экспериментального метода с более широкими возможностями. По сути, метод подобен стандартным методам определения трещиностойкости хрупких материалов, поскольку разрушение инициируется из концентратора напряжений (царапины) на поверхности образца. Однако

существует и различие между ними, состоящее в том, что стандартные методы являются методами с фиксированными концентраторами напряжений, а S+EF метод – методом с произвольным (ненормированным) концентратором напряжений. В работах [13–15] была предпринята попытка с помощью метода локального скалывания кромок образцов хрупких материалов определять их трещиностойкость.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты определения сопротивления разрушению хрупких материалов в условиях локального механического нагружения. Сопоставление опытных данных, полученных S+EF и EF методами, позволяет оценить влияние предварительного нанесения царапины на сопротивление разрушению кромки образца материала.

Методика испытаний и используемые материалы. Эксперименты методом царапания индентором поверхности образца хрупкого материала до момента скалывания его кромки проводили на описанной в [8] экспериментальной установке (рис. 1). При этом использовали стандартный монокристаллический алмазный индентор Роквелла. Исследуемый образец жестко фиксировался в специальном креплении на двухкоординатном предметном столике так, чтобы его поверхность, подвергающаяся царапанию, находилась в перпендикулярной плоскости к оси индентора.

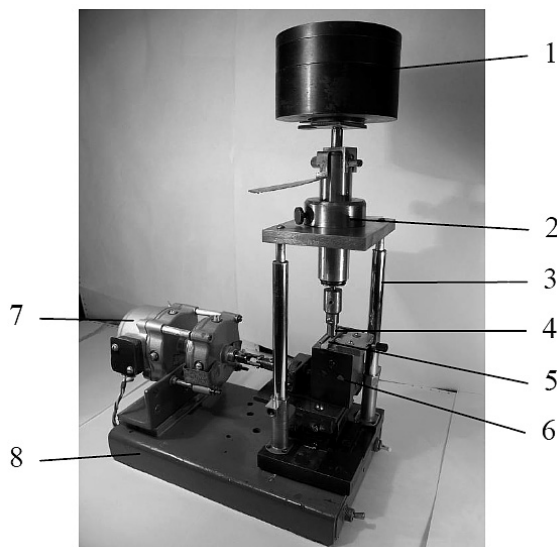


Рис. 1. Установка для испытаний методом царапания индентором поверхности образца до скалывания его кромки: 1 – груз; 2 – направляющий узел; 3 – опорные стойки; 4 – индентор; 5 – образец; 6 – двухкоординатный столик; 7 – электродвигатель; 8 – основание.

Механическое нагружение осуществлялось с помощью стандартных грузов, в качестве которых использовали эталонные массы, а полная прикладываемая нагрузка включала также вес индентора с направляющим штоком. В данных испытаниях реализуется мягкий режим нагружения, а применяемые нормальные нагрузки варьируются в диапазоне 10...50 Н.

До момента касания поверхности образца индентор перемещался вертикально без удара, затем на расстоянии 1,0–1,5 мм от кромки он внедрялся в образец. Перемещение предметного столика с испытуемым образцом с помощью электродвигателя обеспечивало царапание поверхности образца до момента скалывания его кромки. Скорость царапания во время экспериментов оставалась постоянной (5 мм/мин), а направление царапания было перпендикулярным к кромке образца.

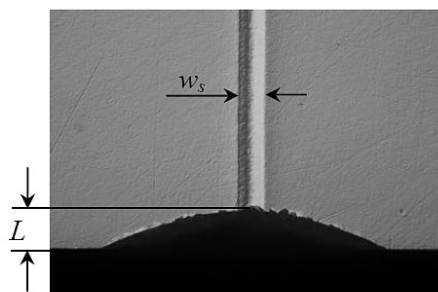


Рис. 2. Измерение расстояния разрушения L и ширины царапины w_s при испытаниях методом царапания индентором поверхности образца до скалывания его кромки.

Чтобы располагать достоверными данными статистической обработки, для каждого материала проводили не менее 40 испытаний. После каждого опыта индентор протирали мягкой тканью, чтобы убрать возможные прилипшие частички разрушившегося материала. Кроме того, после каждой серии испытаний целостность индентора проверяли на оптическом бинокулярном микроскопе Olympus 51MX. С помощью микроскопа и компьютерной программы QuickPHOTO Micro 2.3 на испытанных образцах измеряли величины размера скалывания кромки (расстояние разрушения L) – рис. 2. Использование компьютерной программы позволило увеличить точность измерений до 1 мкм. По значениям расстояния разрушения L и нагрузки P_f , вызвавшей скол, строили диаграммы разрушения (зависимости $P_f - L$), иллюстрирующие характер механического поведения изучаемого материала при локальном разрушении. В качестве критерия разрушения принимали среднее значение отношения разрушающей нагрузки P_f к расстоянию разрушения L для рассматриваемого массива измерений, получившего название сопротивление разрушению F_{RS} :

$$F_{RS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{fi}}{L_i}, \quad (1)$$

где n – количество экспериментов.

Данные, полученные при царапании индентором Роквелла, использовали для определения механической характеристики материала – твердости при царапании, которая вычислялась как отношение нормальной нагрузки к площади нагружения. При использовании индентора с вершиной круглого поперечного сечения применяется следующее выражение [9]:

$$H_S = \frac{8P_f}{\pi w_s^2}, \quad (2)$$

где H_S – твердость при царапании, МПа; P_f – прикладываемая нормальная нагрузка, Н; w_s – измеренная ширина царапины, мм.

Объектом исследования служили хрупкие материалы: оксидная, карбидокремниевая и диоксидциркониевая керамика; листовое и кварцевое стекло. Оксид скандия, оксид алюминия и карбид кремния являются линейно-упругими однофазными изотропными керамическими материалами, при этом для субмикронного оксида алюминия характерна структура с размером зерна менее микрометра. В качестве диоксидциркониевых керамических материалов использовали Y-TZP керамику, которая состояла только из метастабильных тетрагональных частиц и получена добавлением оксида иттрия (~3 моль%), и Mg-PSZ, частично стабилизированную оксидом магния. Кера-

мика Y-TZP является мелкозернистой и линейно-упругой, тогда как Mg-PSZ – пористая и крупнозернистая. Специфическая особенность диоксидциркониевой керамики состоит в том, что под воздействием механических нагрузок повышается ее прочность. Основным механизмом упрочнения – фазовый переход из тетрагональной фазы ZrO_2 в моноклинную под действием прикладываемых нагрузок с появлением у фронта развивающейся трещины сжимающих напряжений, которые подавляют ее дальнейшее распространение (эффект нелинейно возрастающей R -кривой) [16]. Известно, что механизм трансформационного упрочнения более выражен в Y-TZP керамике, чем в Mg-PSZ [17].

Силикатные стекла представляют особый интерес, так как в различных исследованиях они используются как модельный материал. Являясь упругим мало деформирующимся материалом, стекло хрупкое и склонное к катастрофическому разрушению. С учетом предложенного разделения стекол на “нормальные” и “аномальные” [18, 19] будем использовать соответственно листовое [20] и кварцевое оптическое [21]. Листовое стекло содержит 70...75% оксида кремния, промышленно изготавливается для различных целей, кварцевое – более 99% оксида кремния, прозрачное в видимой и инфракрасной областях спектра и предназначено для изделий, работающих при прохождении света в одном направлении.

Подготовка образцов к испытаниям включала их шлифование и полирование алмазными пастами. Для легко повреждаемых при механической обработке материалов (например, стекло) использовали пакетное полирование, обеспечивающее получение более качественных кромок образцов. Контроль состояния кромок осуществляли с помощью микроскопа до выполнения испытаний. Приемлемыми считались кромки с локальными повреждениями порядка 10...20 мкм.

Результаты испытаний. Механическое поведение керамических материалов и стекла исследовали при царапании индентором Роквелла поверхности образца до скалывания его кромки согласно описанной выше методике. Минимальное значение прикладываемой нормальной нагрузки на индентор составляло 10 Н, что соответствовало локальным разрушениям кромки со значениями L не меньше 0,06 мм. Выборка экспериментальных данных была ограничена верхним пределом значения расстояния разрушения L , не превышающего 0,4 мм, исходя из соображений, изложенных в [22–24]. При этом применяемые максимальные нагрузки ограничили значениями, которые не превышали 50 Н.

Представленные на рис. 3 диаграммы разрушения исследуемых хрупких материалов демонстрируют особенности их механического поведения в условиях локального повреждения кромок образцов в указанных диапазонах прикладываемой нагрузки и расстояния разрушения. Линейная аппроксимация экспериментальных результатов отображает специфику их разброса и закономерности процесса краевого скалывания.

Характерные шрамы сколов на образцах, испытанных по S+EF методу, показаны на рис. 4.

В качестве критерия разрушения принято сопротивление разрушению F_{RS} , значения которого для рассматриваемых материалов представлены в таблице. Установлено, что величина F_{RS} практически не зависит от применяемой нагрузки для исследуемых материалов, за исключением диоксидциркониевой керамики, для которой обнаружена тенденция к увеличению с ростом нагрузки. При этом необходимо отметить, что согласно EF методу величину сопротивления разрушению F_R можно назвать условно постоянной, так как для большинства материалов она возрастает с повышением прикладываемой на индентор нагрузки. Исходя из этого метод царапания вплоть до скалывания кромки образца имеет преимущество перед методом краевого скалывания. Эти методы отличаются тем, что в соответствии с первым источник разрушения находится непосредственно в формирующейся во время испы-

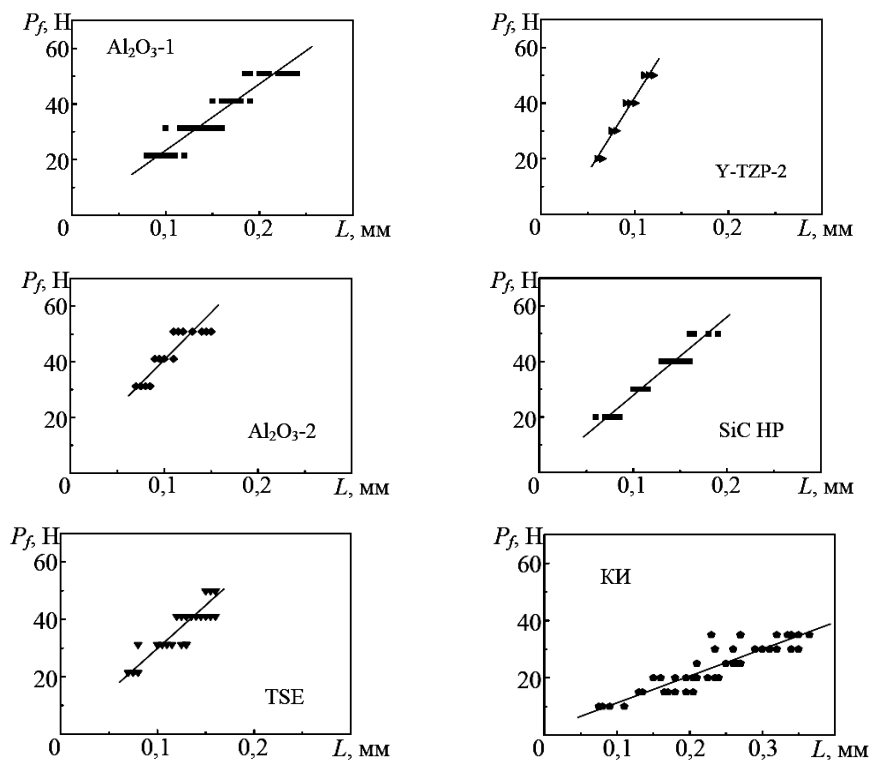


Рис. 3. Диаграммы разрушения керамических материалов и стекла.

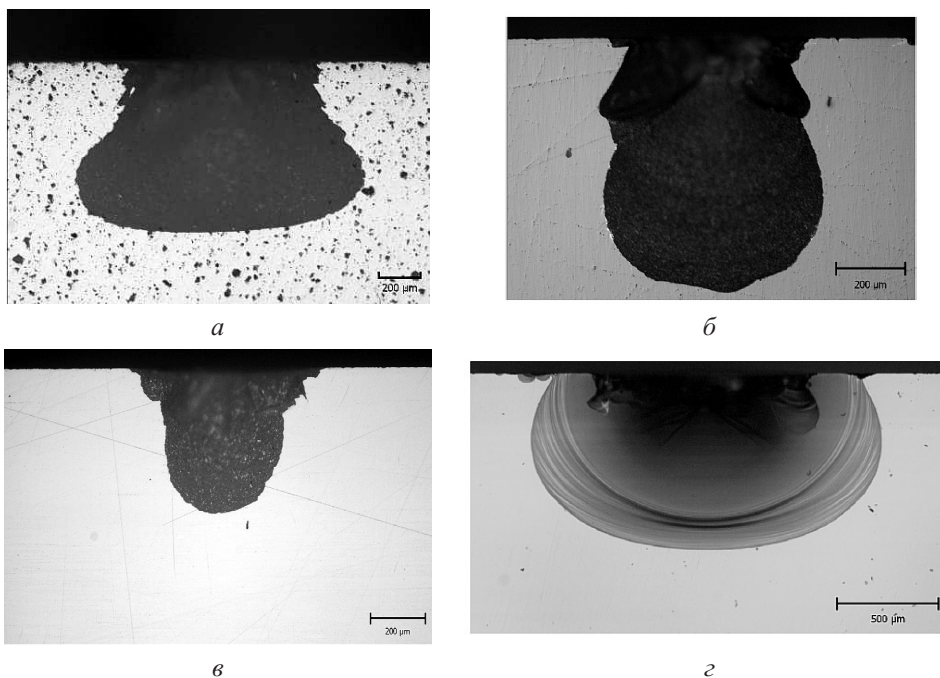


Рис. 4. Характерные шрамы сколов на образцах керамики и стекла, испытанных методом царапания индентором их поверхности до скалывания кромки (фрактограммы выполнены в направлении перпендикулярно внедрению индентора): а – Al₂O₃-1; б – Al₂O₃-2; в – Y-TZP-1; г – листовое стекло.

Результаты испытаний хрупких материалов при царапании индентором Роквелла поверхности образца до скалывания его кромки

Материал	Обозначение	F_{RS} , Н/мм	H_S , ГПа	K_{Ic} , МПа · м ^{1/2}
Оксид скандия	Sc ₂ O ₃	101 ± 12	10,9 ± 0,6	1,49 ± 0,04
Оксид алюминия Duralbit 90	Al ₂ O ₃ -1	234 ± 23	15,9 ± 0,5	3,01 ± 0,09
Оксид алюминия субмикронный	Al ₂ O ₃ -2	411 ± 32	45,3 ± 3,7	3,43 ± 0,20
Карбид кремния горячепрессованный	SiC HP	278 ± 20	25,0 ± 2,1	2,53 ± 0,08
Диоксидциркониевая керамика Y-TZP	Y-TZP-1	331 ± 26	20,2 ± 1,9	3,79 ± 0,14
	Y-TZP-2	395 ± 44	19,6 ± 1,1	7,57 ± 0,30
Диоксидциркониевая керамика Mg-PSZ	TSE	299 ± 28	13,2 ± 1,3	4,88 ± 0,12
	TS-grade	316 ± 29	14,4 ± 1,4	9,04 ± 0,32
Стекло листовое	ЛС	99 ± 23	7,2 ± 0,5	0,66 ± 0,06
Стекло кварцевое оптическое КИ	КИ	103 ± 17	5,0 ± 0,3	0,77 ± 0,04

Примечание. K_{Ic} – критический коэффициент интенсивности напряжений.

тания царапине (не нормированном концентраторе напряжений, из которого страгивается разрушающая трещина), в то время как согласно второму методу на создание подобного источника затрачивается часть энергии разрушения на начальном этапе внедрения индентора. Другими словами, если упрощенно рассматривать разрушение кромки как трехэтапный процесс (образование зародыша макротрещины, ее старт и распространение), то согласно EF методу полная энергия разрушения расходуется на всех трех этапах, а согласно S+EF методу – преимущественно на втором и третьем. Разрушение при царапании поверхностного слоя влечет за собой формирование концентратора напряжений, и дальнейшее повреждение кромки зависит от механических свойств конкретного материала.

Вероятно, что при использовании S+EF метода с увеличением нагрузки на индентор может изменяться уровень привнесенной концентрации напряжений. Ее определение при испытаниях на царапание вплоть до скалывания кромки образца является достаточно сложной задачей. Вместе с тем для оценки эффекта концентрации напряжений широко используется способ сопоставления результатов механических испытаний гладких образцов с таковыми образцов с концентраторами при различных условиях нагружения [25]. Сравнение экспериментальных данных, полученных S+EF и EF методами, позволяет оценить влияние царапания на величину сопротивления разрушению исследуемых материалов. Результаты испытаний на краевое скалывание (EF метод) использовали из ранее опубликованных работ [5, 8, 26–28].

Поскольку для большинства материалов величина сопротивления разрушению F_{RS} в основном не зависит от прикладываемой на индентор нагрузки, она также не зависит от ширины царапины. Это означает, что изменение концентрации напряжений не влияет на величину сопротивления разрушению F_{RS} . Однако для хрупких материалов с разными механическими свойствами наличие одинаковой (по ширине) царапины по-разному влияет на сопротивление скалыванию кромки образца.

Рассмотрим два условных случая разрушения кромки образца хрупкого материала: при статическом нагружении индентора вблизи свободной кромки образца (EF метод) и царапание индентором поверхности образца до скалывания его кромки (S+EF метод). Полагаем, что оба случая характеризуются эквивалентными повреждениями кромки, т.е. равенством значений расстояния разрушения L . Им соответствуют некоторые значения прикладываемой нормальной нагрузки P_f . Определим величины сопротивления разрушению F_R и F_{RS} , сравнение которых позволяет оценить степень влияния предварительного царапания на процесс разрушения.

В действительности имеем дело с массивами экспериментальных данных и сравнение возможно, если оперировать средними значениями L . За основу приняты результаты испытаний по S+EF методу, для которых известны значения прикладываемых нагрузок, полученные измерением величины расстояния разрушения, на основании чего вычислены значения сопротивления разрушению. Для каждого уровня прикладываемой нагрузки была выполнена серия испытаний (обычно от 10 до 20 опытов для трех–шести уровней нагрузки). Учитывая, что рассматриваются ограниченные объемы испытаний, необходимо указать степень точности и надежности получаемых оценок средних значений L и P_f . Чтобы получить такую точность, использовали метод математической статистики построения доверительных интервалов [29, 30]. Суть метода состоит в том, что, выбрав некоторую достаточно большую вероятность β такой, чтобы событие считалось практически достоверным, находим значение ε , для которого выполняется следующее условие:

$$P(\bar{\theta} - \varepsilon < \theta < \bar{\theta} + \varepsilon) = \beta, \quad (3)$$

где $\bar{\theta}$ является оценкой величины θ .

Это равенство означает, что с вероятностью β доверительный интервал при многократном повторении опыта накрывает истинное значение величины θ , т.е. это интервал значений θ , совпадающих с опытными данными и не противоречащих им.

Статистическая обработка экспериментальных результатов состоит в следующем:

1) для каждого массива экспериментальных данных, что соответствуют определенным уровням прикладываемой на индентор нагрузки при испытаниях по S+EF методу, найдены средние значения расстояния разрушения, для которых строили доверительные интервалы, задавая надежность β , равную 0,99;

2) экспериментальные результаты, которые попадали в эти доверительные интервалы, образовывали выборки данных, для них вычисляли средние значения сопротивления разрушению F_{RS}^* ;

3) из всего объема результатов испытаний по EF методу были вычленены выборки данных, которые соответствовали ранее определенным доверительным интервалам, и для каждой из них вычислены средние значения сопротивления разрушению F_R^* .

Сопоставление величины F_{RS}^* с F_R^* в характерных диапазонах значений расстояния разрушения (рис. 5) свидетельствует о различной степени влияния предварительного царапания на способность материалов сопротивляться локальному разрушению кромок образцов. Из рис. 5,а видно, что для обычной линейно-упругой керамики отмечается сравнительно небольшое уменьшение сопротивления разрушению. Различие между F_{RS}^* и F_R^* увеличивается в случае если скалывание происходит все дальше от кромки образца. Наибольший эффект от привнесенного царапания наблюдается при испытаниях силикатных стекол во всем диапазоне значений расстояния разрушения (рис. 5,б). Это обусловлено тем, что из-за хрупкости стекла его несущая способность при возникновении поверхностных трещин значительно снижается.

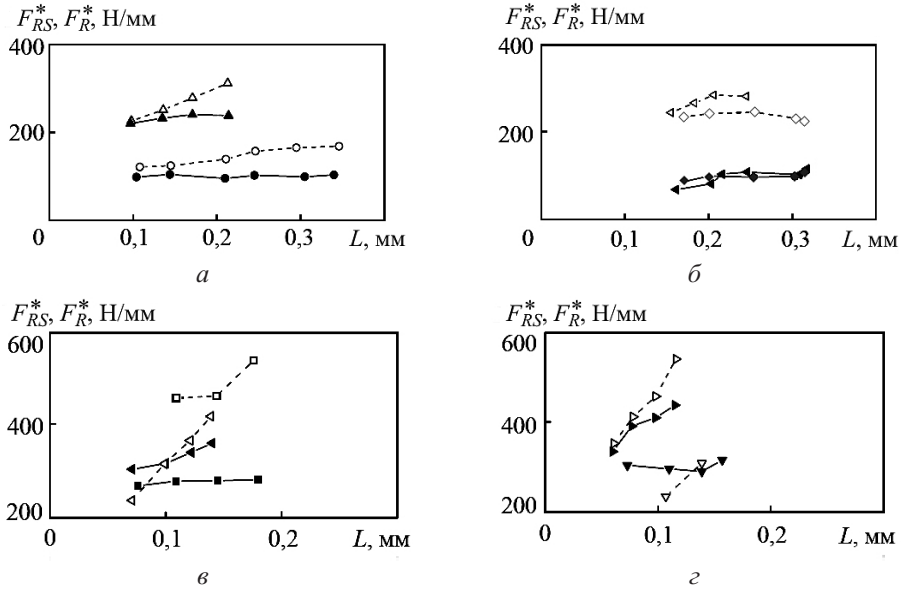


Рис. 5. Диаграммы сравнения результатов испытаний методами S+EF (темные точки) и EF (светлые точки): *a* – Sc_2O_3 (●, ○), Al_2O_3-1 (▲, △); *б* – листовое стекло (◄, ◃), стекло кварцевое оптическое КИ (◆, ◇); *в* – SiC HP (■, □), Y-TZP-1 (◄, ◃); *г* – TSE (▼, ▽), Y-TZP-2 (►, ▷).

Линейно-упругая керамика, обладающая повышенным сопротивлением разрушению на этапе внедрения индентора, более чувствительна к предваряющему скалыванию царапанию поверхности образца, чем обычная керамика (рис. 5, в). Сдирание поверхностных слоев, благодаря которым она в большей мере сопротивляется локальным контактным давлениям, приводит к значительному уменьшению этой способности. Уровень чувствительности к царапанию у диоксидциркониевой керамики такой же, как и у обычной, а существенное различие между ними заключается в том, что как при испытаниях по методу EF, так и по методу S+EF величина сопротивления разрушению возрастает с увеличением расстояния разрушения (рис. 5, в, г), что соответствует существующей для этого материала зависимости трещиностойкости от длины трещины. Следует отметить, что для диоксидциркониевой керамики присущ механизм трансформационного упрочнения при силовых воздействиях. Эта способность материала сопротивляться продвижению трещины отображена на представленных диаграммах и проявляется для двух методов краевого скалывания при изменении значения L (характер изменения сопротивления разрушению при использовании EF метода больше выражен). Для указанных материалов на этапе распространения трещины расходуется некоторая дополнительная накопленная упругая энергия, в то время как для линейно-упругой однофазной керамики этот этап характеризуется катастрофическим разрушением [19].

Выводы

1. Экспериментально исследованы керамика и стекло в условиях локального разрушения кромок образцов при внедрении индентора Роквелла.
2. Достаточно подробно изложены методика проведения испытаний и предложенный способ анализа полученных результатов, позволяющий получать новые сведения о способности различных хрупких материалов сопротивляться разрушению.

3. Оценено влияние предварительного царапания до скалывания кромки образца на величину сопротивления разрушению материала.

4. Показаны особенности характера изменения этой оценки по мере увеличения расстояния разрушения для обычной линейно-упругой керамики, керамики с повышенным сопротивлением разрушению на этапе внедрения индентора и зарождения опасной трещины, фазотрансформирующейся керамики, а также для различного силикатного стекла.

Резюме

Експериментально досліджено механічну поведінку кераміки та скла під час локального навантаження зразків індентором згідно з представленою методикою випробувань. Оцінено вплив подряпини на опір руйнуванню матеріалу при зіставленні результатів випробувань, отриманих за двома методами, згідно з якими передбачається пошкодження кромки зразка при дряпанні (S+EF метод) та без (EF метод). Показано закономірності руйнування досліджуваних крихких матеріалів за таких умов випробувань на основі аналізу експериментальних даних.

1. *Almond E. and McCormick N.* Constant geometry edge flaking of brittle materials // *Nature*. – 1986. – **321**. – P. 53 – 55.
2. *McCormick N. and Almond E.* Edge flaking of brittle materials // *J. Hard Mater.* – 1990. – **1**. – P. 25 – 51.
3. *Morrell R. and Gant A.* Edge chipping – what does it tell us? // *Fractography of Glasses and Ceramics IV* / Eds. J. R. Varner and G. D. Quinn. – Westerville: American Ceramic Society, 2001. – P. 23 – 41.
4. *Gogotsi G., Mudrik S., and Rendtel A.* Sensitivity of silicon carbide and other ceramics to edge fracture: method and results // *28th Int. Conf. Advanced Ceramics and Composites B: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Vol. 25, Issue 4* / Eds. E. Lara-Curzio and M. J. Readey. – Westerville: American Ceramic Society, 2004. – P. 237 – 246.
5. *Gogotsi G., Mudrik S., and Galenko V.* Evaluation of fracture resistance of ceramics: Edge fracture tests // *Ceram. Int.* – 2007. – **33**. – P. 315 – 320.
6. *Quinn J., Su L., Flanders L., and Lloyd I.* Edge toughness and material properties related to the machining of dental ceramics // *Mach. Sci. Technol.* – 2000. – **4**. – P. 291 – 304.
7. *Гогоци Г. А., Островой Д. Ю., Озерский Б. И., Гогоци Ю. Г.* Методики и оборудование для механических испытаний наноструктурных и других хрупких материалов // *Международ. конф. “Современное материаловедение: достижения и проблемы”* (Киев, 26–30 сент. 2005). – Киев, 2005. – С. 907 – 908.
8. *Гогоци Г. А., Галенко В. И., Мудрик С. П. и др.* Разрушение стекла при краевом скалывании // *Пробл. прочности*. – 2007. – № 6. – С. 103 – 112.
9. *Flanders L. A., Quinn J. B., Wilson O. C., Jr., and Lloyd I. K.* Scratch hardness and chipping of dental ceramics under different environments // *Dental Mater.* – 2003. – **19**. – P. 716 – 724.
10. *Марковец М. П.* Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
11. *Давиденков Н. Н.* Динамическая прочность и хрупкость металлов. Т. 1. – Киев: Наук. думка, 1981. – 704 с.

12. Бурман Л. Л., Рогов В. В. Оценка обрабатываемости хрупких материалов по их склерометрической твердости // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 2. – С. 56 – 59.
13. Petit F., Descamps P., Erauw J. P., and Cambier F. Toughness (K_{Ic}) measurement by a sliding indentation method // Key Eng. Mater. – 2002. – **206-213**. – P. 629 – 632.
14. Chai H. and Lawn B. A universal relation for edge chipping from sharp contacts in brittle materials: A simple means of toughness evaluation // Acta Mater. – 2007. – **55**. – P. 2555 – 2561.
15. Petit F., Vandeneede V., and Cambier F. Ceramic toughness assessment through edge chipping measurements – Influence of interfacial friction // J. Eur. Ceram. Soc. – 2009. – **29**. – P. 2135 – 2141.
16. Физика твердого тела: Энциклопедический словарь. Т. 1 / Под ред. В. Г. Барьяхтара. – Киев: Наук. думка, 1996. – 656 с.
17. Лебеденко И. Ю., Хван В. И., Деев М. С., Лебеденко А. И. Цирконий, циркон, диоксид циркония // Российский стомат. журн. – 2008. – № 4. – С. 50 – 54.
18. Arora A., Marshall D. B., Lawn B. R., and Swain M. V. Indentation deformation/fracture of normal and anomalous glasses // J. Non-Cryst. Sol. – 1979. – **31**. – P. 415 – 428.
19. Burghard Z., Zimmermann A., Rodel J., et al. Crack opening profiles of indentation crack in normal and anomalous glasses // Acta Mater. – 2004. – **52**. – P. 293 – 297.
20. ГОСТ 111-2001. Стекло листовое. Технические условия. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 33 с.
21. ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 31 с.
22. Gogotsi G. A., Galenko V. I., Mudrik S. P., et al. Fracture resistance estimation of elastic ceramics in edge flaking: EF baseline // J. Eur. Ceram. Soc. – 2010. – **30**. – P. 1223 – 1228.
23. Батанова О. А., Гогоци Г. А., Матвиенко Ю. Г. Численный анализ результатов эксперимента по скалыванию кромок образца // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – **77**, № 7. – С. 53 – 56.
24. Батанова О. А., Гогоци Г. А., Матвиенко Ю. Г. Численный анализ результатов испытаний на сопротивление разрушению конструкционной керамики на основе нитрида кремния // Тр. междунар. науч.-техн. конф. “Живучесть и конструкционное материаловедение” (М., 22–24 окт. 2012). – М., 2012. – С. 16 – 25.
25. Мавлютов Р. Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. – М.: Наука, 1981. – 142 с.
26. Gogotsi G. A. and Mudrik S. P. Fracture barrier estimation by the edge fracture test method // Ceram. Int. – 2009. – **35**. – P. 1871 – 1875.
27. Gogotsi G. A. Fracture behaviour of Mg-PSZ ceramics: Comparative estimates // Ibid. – P. 2735 – 2740.
28. Gogotsi G. A., Galenko V. I., Mudrik S. P., et al. Fracture behaviour of Y-TZP ceramics: New outcomes // Ibid. – 2010. – **36**. – P. 345 – 350.
29. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
30. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

Поступила 03. 10. 2013