

УДК 539.42; 539.536

## Статистическая оценка повреждаемости и сопротивления разрушению керамики при локальном разрушении кромки индентором Роквелла

**Хворостяный В. В.; Родичев Ю. М.; Качинская И. Р.**

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

*Аннотация.* В работе представлено решение задачи обоснованного определения гарантированного уровня параметров повреждаемости и сопротивления разрушению кромок керамических материалов в условиях их локального нагружения методом царапания индентором Роквелла поверхности образца до скалывания кромки ( $S+EF$  метод). Статистическая обработка экспериментальных результатов выполнена на основе статистического распределения Вейбулла. Получены уточненные диаграммы разрушения керамики, построенные для параметра повреждаемости кромки при различных значениях вероятности разрушения. Показано, что для достоверного определения механического поведения хрупких материалов при краевом локальном нагружении с позиций их конструкционной прочности, необходимо оперировать комплексом полученных результатов, включающего экспериментальные и статистические данные. Предложенный подход позволяет значительно повысить точность определения критических размеров поврежденных кромок материалов и величин их сопротивления разрушению, что важно для прогнозирования работоспособности ответственных элементов конструкций и деталей машин.

В экспериментальных исследованиях локального разрушения кромок образцов или технических изделий керамических материалов с использованием различных типов инденторов и пуансонов в качестве критериев повреждаемости и сопротивления разрушению традиционно рассматривают средние значения характерного размера скола и отношения приложенной нагрузки к этому размеру скола соответственно [1 – 4]. В соответствии со стандартом [5] повреждения кромки описывают с помощью величины расстояния разрушения  $L$ , принимаемой как расстояние от кромки образца до наиболее отдаленной точки на шраме образованного скола на плоскости нагружения. Сопротивление разрушению кромки  $F_{RS}$  вычисляют как среднее значение отношения разрушающей нагрузки к расстоянию разрушения. Следует заметить, что определение конструкционной прочности материалов по средним значениям может быть недостаточным для достоверного прогнозирования несущей способности ответственных элементов конструкций при локальных нагружениях.

При проектировании или целенаправленном выборе материалов наиболее важными являются данные об экстремальных случаях разрушения кромок. С этой проблемой сталкиваются непосредственно при работе керамического или твердосплавного инструмента, функционировании стеклянных элементов строительства и дизайна, использовании стоматологических и эндопротезов в восстановительной медицине. Существующие в настоящее время методы исследования механического поведения хрупких материалов в условиях локального краевого нагружения (в том числе метод царапания индентором поверхности образца до скалывания его кромки) рассматриваются как доступные, информативные и перспективные, обеспечивающие решение научно-практических задач прочности и надежности материалов. При этом актуальным является вопрос учета статистической природы краевых повреждений и обоснование способов прогнозирования уровня сопротивления разрушению и степени повреждаемости материалов при различных рабочих условиях.

В связи с выше изложенным в представленной работе была сформулирована и решена задача определения гарантированного уровня параметров повреждаемости и сопротивления разрушению кромки современных керамических материалов. Этому посвящено аналитическое изучение закономерностей их разрушения с использованием статистического

анализа эмпирических данных на основе статистического распределения Вейбулла [6]. Экспериментальные зависимости распределения были построены для характеристик повреждаемости кромки ( $1/L_i$ ) и ее сопротивления разрушению ( $P_i/L_i$ ) для исследуемых керамических материалов при различных приложенных к индентору нагрузках. Функция двухпараметрического распределения Вейбулла на диаграмме вероятностей отображается в виде прямой линии, а соответствующие статистические параметры (параметр формы  $\alpha$  и параметр масштаба  $\lambda$ ) находили методом наименьших квадратов. Такой подход позволяет получить статистически аргументированные оценки параметров, используемые для описания механического поведения хрупких материалов при краевом локальном нагружении, т.е. более точно определить локальную прочность материалов и сделать достоверное прогнозирование их повреждаемости и сопротивления разрушению при заданном уровне вероятности разрушения.

Построение диаграмм разрушения (зависимостей «разрушающая нагрузка  $P$  – расстояние разрушения  $L$ ») является «классическим» представлением результатов испытаний методами краевого скалывания на первом этапе их анализа (рис. 1, а). Наиболее часто используют линейную аппроксимацию экспериментальных точек на диаграмме, что отображает закономерности процесса краевого скалывания и специфику разброса опытных данных. Кроме линейной может быть применены степенная [2] или полиномиальная [3] аппроксимации, которые в некоторых случаях являются более точными. В ряде работ, например в [2, 7], величина «краевой вязкости» как мера сопротивления скалыванию кромки определялась тангенсом угла наклона аппроксимирующей линии. Во многих исследованиях керамики, стекла, композитов и твердых сплавов при краевом локальном нагружении основной акцент делался на установление корреляционных зависимостей между параметром сопротивления разрушению при скалывании кромки и трещиностойкостью материалов. Как важное дополнение к этим изучением и для расширения возможностей использования результатов испытаний на практике следует отнести данные их статистической обработки. В соответствие с этими данными были построены диаграммы разрушения керамических материалов, на которых по оси абсцисс отложены значения параметра повреждаемости кромки  $L$ , вычисленного для разных уровней вероятности разрушения  $F$ . На рис. 1, б показана диаграмма, полученная с учетом статистического анализа для диоксидциркониевой керамики Mg-PSZ марки SF-S-TS. Важно отметить, что величина повреждаемости кромки, определенная для низких значений вероятности разрушения ( $F=0,10\dots0,005$ ) превышает соответствующие средние эмпирические данные в 1,1 – 1,5 раза. Для наименьшего уровня вероятности разрушения  $F=0,005$ , представленного в расчетах настоящего исследования (означает, что в 0,5% случаев происходит разрушение кромки и отвечает возникновению наибольших краевых повреждений) параметр  $L$  характеризует в 1,3 – 1,5 раз большие локальные повреждения кромки изучаемого материала.

Для определения работоспособности технических изделий из керамических материалов в условиях их локального разрушения при контактном взаимодействии индентора и кромки, необходимо получение достоверных оценок с высокой доверительной вероятностью заданных предельных уровней краевых повреждений. Исследование механического поведения хрупких материалов с позиций их конструкционной прочности выполнялось на основе детального анализа гарантированного уровня параметров повреждаемости и сопротивления разрушению при низком значении вероятности разрушения, удовлетворяющем требованиям по надежности. Принятый в работе уровень вероятности разрушения, равный 0,01, который можно допустить в первом приближении (для расчетов ответственных конструкций с повышенной надежностью он равен 0,001) соответствует появлению неблагоприятных случаев повреждения кромки керамического материала, что может привести к неприемлемым для его дальнейшей эксплуатации итогам.

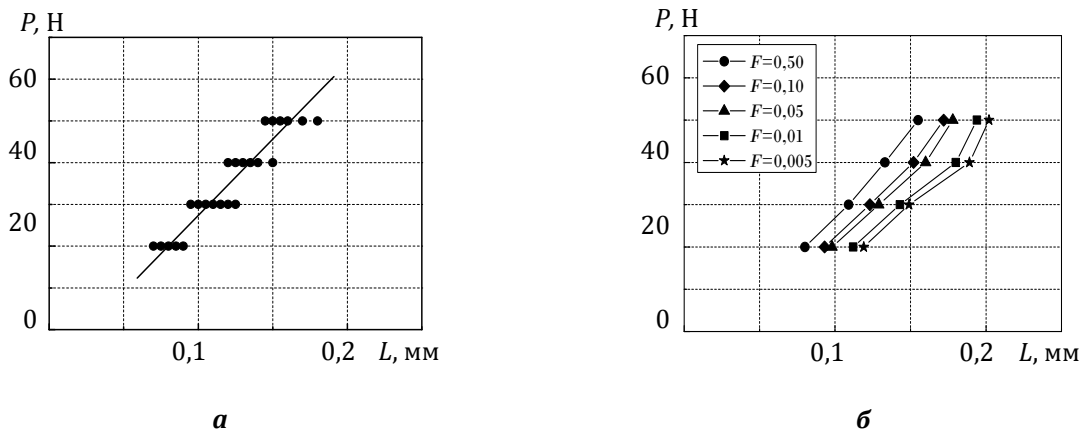


Рис. 1 Диаграммы разрушения керамики Mg-PSZ (SF-S-TS) при скалывании кромки S+EF методом: по экспериментальным результатам (а) и по данным их статистического анализа (б)

Определяя параметры повреждаемости кромки и ее сопротивления разрушению при заданном уровне вероятности, соответственно величины  $L^{0,01}$  и  $F_{RS}^{0,01}$ , выполняли их сравнение со средними и экстремальными экспериментальными значениями. Сопоставление результатов повреждаемости кромок керамики осуществлялось для массива испытаний, полученного при нагрузке на индентор  $P=30$  Н. Это значение нагрузки является некоторым средним из всего диапазона приложенного нагружения. Таким образом, определено, что прогнозируемые вероятностные повреждения кромки больше чем средние эмпирические значения на 15...30% и также превышают максимальные эмпирические значения приблизительно на 10...15% (табл. 1). Отличие между статистически обоснованными и средними экспериментальными значениями сопротивления разрушению кромки исследуемых керамических материалов достигает 1,4 – 1,6 раза. Сопоставление расчетных статистических данных и минимальных опытных результатов показывает их различие на 10...25% (табл. 2). В этой связи можно констатировать, что для достоверного прогнозирования масштаба разрушения керамики при краевом локальном нагружении необходимо оперировать не только данными, полученными из экспериментов, но также следует учитывать результаты аналитического рассмотрения закономерностей повреждаемости материалов с использованием статистического анализа [8]. Предложенный подход дает возможность повысить информативность и значимость получаемых эмпирических результатов, основываясь на которые производится оценка конструкционной прочности хрупких материалов.

Таблица 1

Сравнение результатов определения повреждаемости кромки из экспериментов и их статистического анализа (нагрузка на индентор  $P=30$  Н)

Керамика	Экспериментальные данные (мм)		Статистические данные (мм)	$L^{0,01}/L$	$L^{0,01}/L^{\max}$
	$L$	$L^{\max}$	$L^{0,01}$		
SiC HP	0,106	0,115	0,131	1,24	1,14
Y-TZP	0,077	0,080	0,089	1,16	1,11
Mg-PSZ (SF-S-TS)	0,111	0,125	0,143	1,29	1,14



Таблица 2

## Сравнение результатов определения сопротивления разрушению кромки из экспериментов и их статистического анализа (весь диапазон примененных нагрузок)

Керамика	Экспериментальные данные (Н/мм)		Статистические данные (Н/мм)	$F_{RS}/F_{RS}^{0,01}$	$F_{RS}^{min}/F_{RS}^{0,01}$
	$F_{RS}$	$F_{RS}^{min}$	$F_{RS}^{0,01}$		
SiC HP	278	235	186	1,49	1,26
Y-TZP	395	308	281	1,41	1,10
Mg-PSZ (SF-S-TS)	284	222	178	1,60	1,25

## Выводы:

1. Выполнен статистический анализ на основе распределения Вейбулла результатов механических испытаний современной керамики методом царапания индентором Роквелла поверхности образца до скалывания кромки. Получены статистически обоснованные оценки с высокой доверительной вероятностью параметров повреждаемости и сопротивления разрушению изучаемых материалов.
2. Построены диаграммы разрушения керамики при краевом нагружении по данным статистической обработки экспериментальных результатов, демонстрирующие предельно возможные повреждения кромок при различных вероятностях разрушения.
3. Представленный подход прогнозирования механического поведения керамических материалов в условиях локального разрушения кромок, учитывающий особенности статистического распределения параметров разрушения и требования по надежности, позволяет более точно определять критические размеры повреждений. Полученные сведения могут быть использованы при решении оптимизационных задач при проектировании ответственных элементов конструкций, а также служить основой для выбора материалов или режимов работы.

## Список литературы

1. McCormick N. J. Edge flaking of brittle materials / N. J. McCormick, E. A. Almond // J. Hard Mater. – 1990. – 1. – P. 25 – 51.
2. Quinn J. «Edge toughness» and material properties related to the machining of dental ceramics / J. Quinn, L. Su, L. Flanders, I. Lloyd // Machining Science and Technology. – 2000. – 4. – P. 291 – 304.
3. Morrell R. Edge chipping of hard metals / R. Morrell, A. J. Gant // Int. J. Refract. Met. & Hard Mater. – 2001. – 19. – P. 293 – 301.
4. Gogotsi G. A. Fracture behaviour of Y-TZP ceramics: New outcomes / G. A. Gogotsi, V. I. Galenko, S. P. Mudrik, B. I. Ozersky, V. V. Khvorostyany, T. A. Khristevich // Ceramics International. – 2010. – 36. – P. 345 – 350.
5. Advanced technical ceramics – Mechanical properties of monolithic ceramics at room temperature – Part 9: Method of test for edge-chip resistance. CEN/TS 834-9. – [Current from 2010-08-15]. – CEN, 2010. – 12 p. – (European Standard).
6. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Weibull statistics for strength data. ISO 20501:2003 Ed 1 (R09). – [Current from 2003-12-01]. – ISO/TC 206, 2003. – 33 p. – (International Standard).
7. Gogotsi G. A. Evaluation of fracture resistance of ceramics: Edge fracture tests / G. A. Gogotsi, S. P. Mudrik, V. I. Galenko // Ceram. Int. – 2007. – 33. – P. 315 – 320.
8. Родичев Ю. М. Оценка локальной прочности и повреждаемости хрупких материалов по параметрам статистического распределения экспериментальных данных / Ю. М. Родичев, Е. Б. Сорока, А. А. Шабета и др. // Вісник Тернопільського національного університету. – 2013. – № 4. – С. 161 – 173.