

ОЦЕНКА ТВЕРДОСТИ И ЛОКАЛЬНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ КЕРАМИКИ И СТЕКЛА МЕТОДОМ ЦАРАПАНИЯ ДО СКАЛЫВАНИЯ КРОМКИ

В.В. Хворостяный, Ю.М. Родичев, Е.Б. Сорока

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. 01014, г. Киев, ул. Тимирязевская, 2.
E-mail: khvorostianyiv.v@ipp.kiev.ua

Приведены результаты экспериментального исследования закономерностей повреждаемости хрупких материалов, таких как стекло и керамика при локальном нагружении методом царапания индентором Роквелла поверхности образца до скалывания кромки. Определены значения твердости при царапании изучаемых хрупких материалов. Показано, что твердость при царапании превышает значения твердости при индентировании стандартным острым индентором преимущественно на 20 %. Представлены зависимости повреждаемости поверхности от нагрузки, а также между твердостью при царапании, повреждаемостью, модулем упругости и критическим коэффициентом интенсивности напряжений. Предложен способ использования экспериментальных диаграмм повреждаемости хрупких материалов для достоверного определения степени их локального разрушения в зависимости от уровня нагрузки. Библиогр. 23, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: керамика, стекло, царапание до скалывания кромки, твердость, расстояние разрушения, диаграммы повреждаемости

Техническая керамика и стекло являются линейно-упругими хрупкими неметаллическими конструкционными материалами, разрушение которых обычно происходит без значительных пластических деформаций. Прочность элементов из этих материалов зависит от состояния и сопротивления поверхности разрушению. Их низкая прочность при действии локальных нагрузок в условиях контактного взаимодействия с твердыми телами и элементами конструкций является сложной проблемой, которая требует учета при выборе сферы и способов применения в различных условиях эксплуатации [1–3].

В настоящее время в связи с трудностями расчетных оценок напряженно-деформированного состояния, механизмов повреждения и предельного состояния хрупких материалов при локальном нагружении, решение проблемных вопросов их прочности в таких условиях осуществляется преимущественно методами экспериментальной механики. Значительное развитие получили методы исследования механического поведения хрупких материалов при краевом локальном нагружении с использованием твердых инденторов или пуносонов [4–8]. При испытаниях, в которых реализуется принцип скалывания кромки твердым индентором, воспроизводятся условия, приближенные к реальным эксплуатационным и технологическим процессам локального разрушения хрупких материалов. Традиционно больше внимания уделялось исследованиям сопротивления разрушению кромки. Важными для практического приложения являются оценки повреждаемости поверхности и

края элементов в таких условиях. Однако закономерности повреждения технической керамики и стекол при локальном нагружении остаются недостаточно изученными. К преимуществам рассмотренных методов можно отнести простоту реализации и возможность применения для аттестации технической керамики и стекол, выбора материала, способов его обработки и контроля качества продукции на производстве. Поэтому исследования механического поведения керамических материалов и стекол при локальном нагружении являются актуальными.

Целью работы было изучение твердости и локальной повреждаемости современной конструкционной керамики и технических стекол методом царапания до скалывания кромки индентором Роквелла.

Экспериментальное исследование хрупких материалов осуществлялось методом царапания поверхности образца до скалывания его кромки (S+EF метод) в соответствии с методикой, изложенной в работах [6, 9]. Следует отметить, что в данных исследованиях учтены основные положения стандарта на метод испытаний по определению сопротивления краевому скалыванию технической керамики [10].

Объектом исследования были современные керамические материалы и стекла разного химического состава. Испытывали образцы оксидной керамики (оксиды скандия, иттрия, алюминия), нитрид кремниевой, карбид кремниевой и диоксид циркониевой керамики, а также листового, оптического и кварцевого стекла. Изученные материалы существенно отличаются по физико-механическим характеристикам, что позволило оценить их влияние на твердость и закономерности повреждения поверхности и края.

Использовали образцы в виде прямоугольных параллелепипедов размерами $3,0 \times 4,0 \times 25,0 \dots 50,0$ мм, которые подвергались операциям механической обработки, включающей этапы шлифования и полирование алмазными пастами. Чистота поверхности, определяемая параметром среднего арифметического отклонения профиля R_a , составляла 1 мкм. Подготовленные кромки образцов были прямоугольными, без явных повреждений, таких как сколы или трещины, качество состояния которых соответствовало требованиям вышеупомянутого стандарта.

Параметром повреждаемости поверхности материала на стадии царапания с постоянной нагрузкой служила величина ширины царапины w_s , определяемая как расстояние между двумя краями образованной упругопластической канавки без учета возможных латеральных трещин или сколов (рис. 1). Под действием нагрузки, приложенной к индентору Роквелла, образуется след его продвижения по поверхности образца, в пределах которого наблюдаются неупругие деформации, смятие поверхностного слоя, образование кольцевых микротрещин Герца и абразивное разрушение, т. е. поверхность материала повреждается. При царапании имеет место сильное сжатие перед индентором и очень сильное растяжение позади него, а сам процесс характеризуется непрерывным нагружением и разгрузкой локальных участков поверхностного слоя материала, подвергающихся воздействию перемещающегося индентора. При этом фронт микротрещин Герца, латеральных трещин и сколов расширяется вперед и назад вдоль направления царапания.

По результатам испытаний были построены диаграммы повреждаемости хрупких материалов на стадии их царапания индентором (рис. 2). Уровень повреждений поверхности образцов линейно возрастал с увеличением приложенной нагрузки в диапазоне от 10 до 30 Н для стекол и от 10 до 50 Н для керамики. Максимальная повреждаемость при царапании была характерна стеклам, для которых по мере возрастания нагрузки ширина царапины изменялась в пределах от 70 до 130 мкм, а вид самой царапины от чередования кольцевых микротрещин Герца до четко очерченной канавки с латеральными трещинами и сколами. Степень

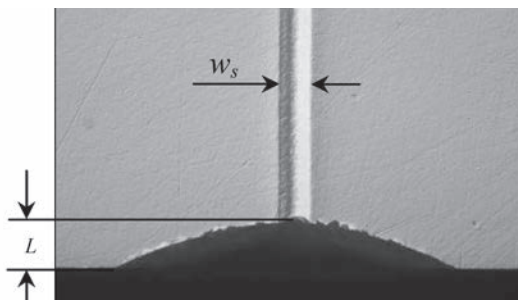


Рис. 1. Измерение расстояния разрушения L и ширины царапины w_s при испытаниях методом царапания индентором поверхности образца до скалывания его кромки

повреждения керамики в зависимости от твердости и уровня нагрузки изменялась в диапазоне от 50 до 90 мкм. Царапина представлялась главным образом без явных признаков конического растрескивания, так что разрушение материала можно охарактеризовать как упругопластическое.

Для описания экспериментальных диаграмм повреждаемости хрупких материалов при царапании были использованы линейные зависимости:

$$w_s = a + bP, \quad (1)$$

где a, b – коэффициенты кривой аппроксимации.

Используя коэффициенты этих уравнений можно прогнозировать степень повреждения поверхности материалов при локальном нагружении с использованием инденторов в рассмотренном диапазоне применяемого усилия.

На основании экспериментальных данных была получена оценка твердости при царапании H_S изучаемых хрупких материалов, которая вычислялась как отношение нормальной нагрузки к площади отпечатка [11]:

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

где P_f – прикладываемая к индентору нормальная нагрузка, Н; w_s – измеренная ширина царапины, мм.

Значения твердости при царапании практически не зависели от уровня приложенной нагрузки. Но для уменьшения погрешности оценку твердости выполняли при нагрузке на индентор P_f равной 30 и 20 Н для керамических материалов и для стекла различных составов, соответственно. За счет проведения многократных испытаний (для каждого уровня применяемой нагрузки было выполнено не менее 10 экспериментов) были получены достоверные средние значения ширины царапины и, соответственно, вычислены средние величины твердости материала при царапании. Измерение ширины царапины выполняли с помощью оптического микроскопа на нескольких участках ее протяженности от места внедрения индентора на поверхности образца до области локального разрушения кромки скалыванием. Преимущественно ширина царапины при заданном уровне нагрузки на индентор оставалась постоянной по всей своей длине для керамики, тогда как для стекла в некоторых случаях наблюдались флуктуации – более заметные отклонения от среднего значения. Среди материалов данного исследования наибольшей твердостью характеризовались горячепрессованный карбид кремния ($H_S = 25,3$ ГПа) и оксид алюминия ($H_S = 21,2$ ГПа). Значительно менее твердым являлось стекло, для которого величина H_S не превышала $5 \dots 6$ ГПа. Полученные результаты определения повреждаемости на стадии царапания и твердости изученных материалов показали, что их повреждаемость при нагрузках $15 \dots 40$ Н почти в 3 раза уменьшается при увеличении твердости (рис. 3). Установленные закономерности повреждения хрупких ма-

териалов в зависимости от их твердости важны для выбора материалов при проектировании изделий.

Установленные значения твердости при царапании были сопоставлены с известными литературными данными о твердости рассматриваемых материалов, полученные другими стандартизованными методами, в частности, при статическом индентировании с использованием инденторов Виккерса или Кнуппа. Результаты сравнения показывают, что значения твердости при царапании H_S превышают значения твердости при индентировании HV (HK) на 10...20 % (табл. 1). Это связано с различными формами инденторов, уровнями нагрузок и способами формирования царапины и отпечатка. Таким образом, полученные результаты более достоверно учитывают особенности локального нагружения и деформирования хрупких материалов при определении твердости методом царапания индентором Роквелла.

Для получения дополнительной оценки конструкционных свойств рассмотренных материалов были построены корреляционные зависимости твердости H_S от их модуля упругости и трещиностойкости. Общие закономерности изменения твердости при царапании керамических материалов с различными значениями вязкости разрушения представлены на диаграмме (рис. 4, а) [20, 21]. Показано, что твердость H_S керамики и стекло нелинейно зависит от модуля Юнга и возрастает при его увеличении (рис. 4, б) [3, 22, 23].

Таким образом, в экспериментах S+EF методом в дополнение к параметрам повреждаемости и сопротивления разрушению материалов можно

Таблица 1. Сравнение экспериментальных значений твердости при царапании керамики и стекла с литературными данными твердости методом индентирования

Материал	Твердость при царапании H_S , ГПа	Твердость при индентировании HV (HK), ГПа
Al_2O_3	21,2	18,2 [12]
		18,0 [13]
Si_3N_4	21,2	16,0 [14]
		18,5 [15]
SiC HP	25,3	21,0 [13]
		24,0 [15]
Y-TZP	18,8	14,0 [12]
		17,8 [16]
Mg-PSZ	12,4	10,0...12,0 [17]
		10,0 [18]
Техническое стекло	6,8	5,9 [16]
		5,0...6,5 [19]

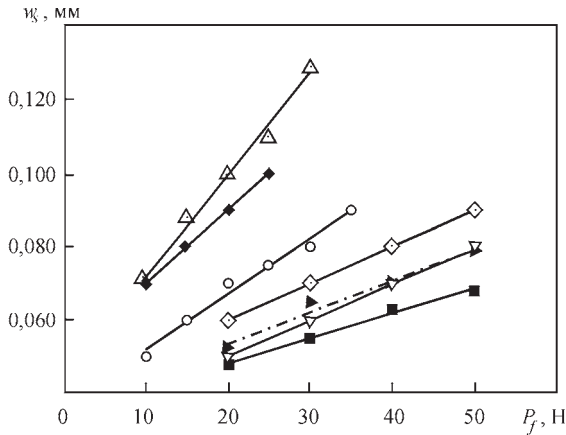


Рис. 2. Диаграмма зависимости повреждаемости поверхности образцов (параметра ширины царапины w_s) от приложенной к индентору нагрузки P_f для хрупких материалов, испытанных S+EF методом: Δ – стекло кварцевое КИ; \blacklozenge – тяжелый флинт ТФ-2; \circ – Sc_2O_3 ; \blacklozenge – SF-S-TS; ∇ – Al_2O_3 -1; \blacktriangleright – Y-TZP-2; \blacksquare – SiC HP

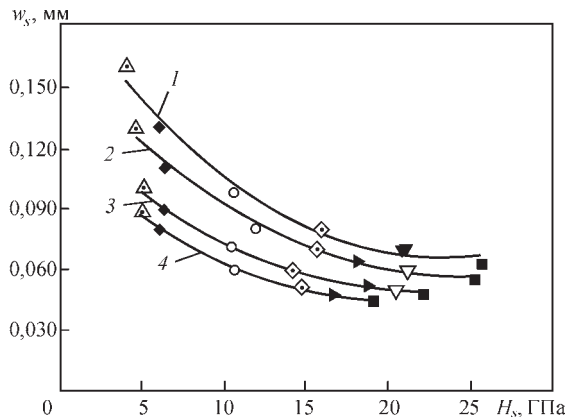


Рис. 3. Диаграмма зависимости повреждаемости поверхности образцов (параметра ширины царапины w_s) от твердости при царапании H_s для хрупких материалов, испытанных S+EF методом (1 – $P_f=40$ Н; 2 – 30; 3 – 20; 4 – 15): Δ – стекло кварцевое КИ; \blacklozenge – тяжелый флинт ТФ-2; \circ – Sc_2O_3 ; \blacklozenge – SF-S-TS; ∇ – Al_2O_3 -1; \blacktriangleright – Y-TZP-2; \blacksquare – SiC HP

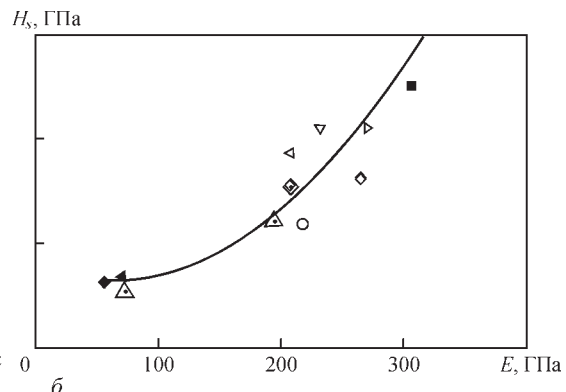
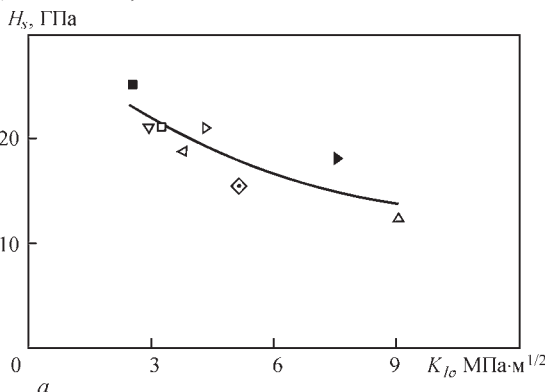


Рис. 4. Зависимости между твердостью при царапании H_s и трещиностойкостью K_{1c} (а) для керамики, модулем упругости E (б) для керамики и стекла: \blacksquare – SiC HP; ∇ – Al_2O_3 -1; \square – Y_2O_3 ; \triangleleft – Y-TZP-1; \triangleright – Si_3N_4 -1; \blacklozenge – SF-S-TS; \blacktriangleright – Y-TZP-2; \triangle – TS-grade; \circ – Sc_2O_3 ; \blacklozenge – Al_2O_3 -2; \blacklozenge – стекло ТФ-2; \blacktriangleleft – техническое стекло; \triangle – кварцевое стекло

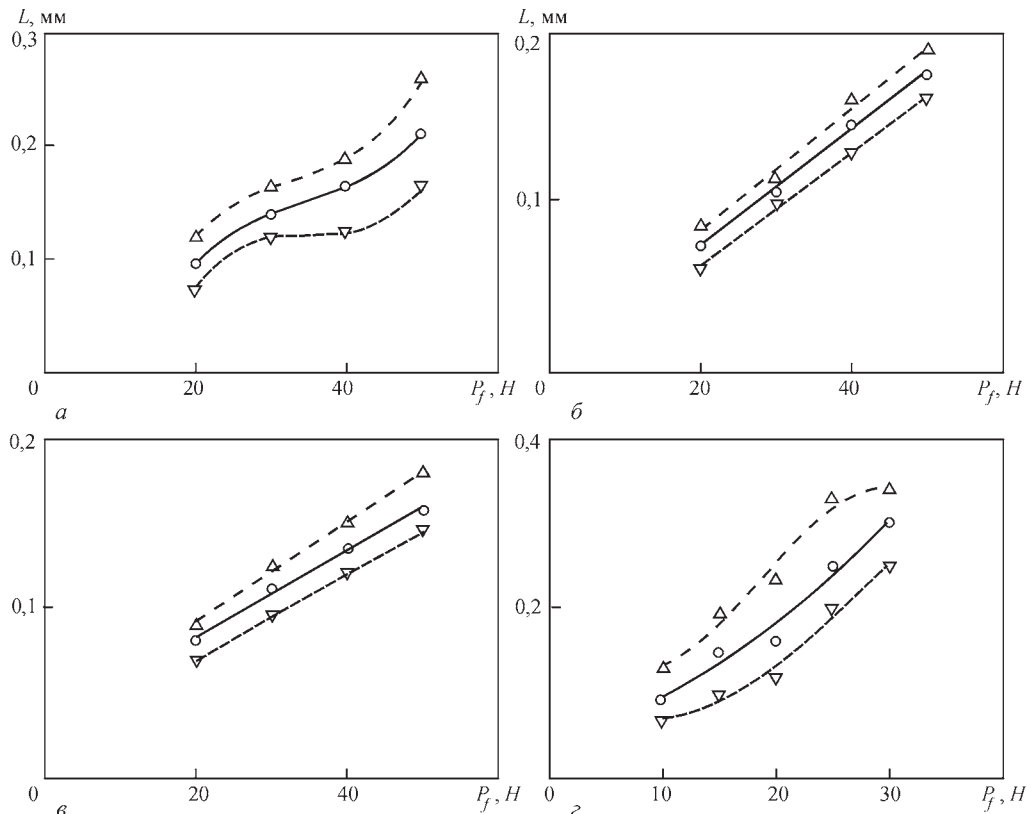


Рис. 5. Диаграммы повреждаемости керамики и стекла, испытанных S+EF методом, построенные для максимальных (Δ), средних (\circ) и минимальных (∇) значений расстояния разрушения L (линиями показаны соответствующие аппроксимации экспериментальных данных): a – оксид алюминия (Al_2O_3 -1); $б$ – карбид кремния горяче-прессованный (SiC NP); $в$ – диоксид-циркониевая керамика Mg-PSZ (SF-S-TF); $г$ – стекло тяжелый флинт (ТФ-2)

получать также их величины твердости при царапании, которые следует рассматривать как оценочные и ориентировочные, близкие к значениям, вычисленных согласно стандартным методам.

Используемый метод исследований предусматривает стадию скалывания кромки хрупкого материала, происходящую в момент, когда индентор при царапании поверхности образца приближается на критическое расстояние к его краю. При этом кромка повреждается за счет распространения разрушающих трещин, которые на плоскости движения индентора по криволинейным траекториям пересекают боковую грань образца, а в плоскости перпендикулярной к его поверхности возникает характерный «ракушкообразный» шрам скола. [7, 9]. В качестве параметра повреждаемости кромки при краевом локальном нагружении традиционно принята величина расстояния разрушения L , определяемая как расстояние от кромки образца до наиболее отдаленной точки шрама скола на плоскости нагружения (рис. 1) [6, 12]. Измерение производимых повреждений хрупких материалов выполнялось с помощью оптического микроскопа с точностью до 1 мкм, а для анализа разрушений дополнительно использовали дифференциальный интерференционный контраст Номарского, что делало возможным получение изображений с большим разрешением и высоким контрастом.

Особенность метода царапания индентором поверхности образца до скалывания его кромки заключалась в том, что величина приложенной нагрузки задавалась экспериментатором непосредственно перед проведением опыта. В то же время величина расстояния разрушения являлась случайной величиной и характеризовала степень поврежденности края при скалывании. По результатам испытаний с различным уровнем нагрузки получены экспериментальные диаграммы повреждаемости изученных керамики и стекол в виде зависимостей «расстояние разрушения L – разрушающая нагрузка P_f ». Нанесенные на эти диаграммы минимальные, средние и максимальные значения L для каждого уровня нагрузки аппроксимировали линейными или нелинейными зависимостями так, чтобы они с достаточной точностью характеризовали рассеяние результатов, обусловленное статистической природой прочности хрупких материалов. Для стекла и керамики с низким уровнем трещиностойкости предпочтительным являлось использование полиномиальных кривых аппроксимации, тогда как для более трещиностойкой керамики были характерными линейные аппроксимирующие зависимости (рис. 5). В общем случае уравнение кривой аппроксимации данных записывалось в следующем виде:

$$L = a + b_1 P_f + b_2 P_f^2 + b_3 P_f^3. \tag{3}$$

Таблица 2. Результаты аппроксимаций зависимостей, представленных на диаграммах повреждаемости исследуемых хрупких материалов

Материал	Для значений L	Коэффициенты кривой аппроксимации			
		a	b_1	b_2	b_3
Al ₂ O ₃	минимальных	-0,4350	0,04700	-0,00132	0,0000125
	средних	-0,2080	0,02648	-0,00069	0,0000067
	максимальных	-0,2900	0,03767	-0,00107	0,0000108
SiC HP	минимальных	-0,0030	0,00330	0	0
	средних	0,0058	0,00342	0	0
	максимальных	0,0115	0,00360	0	0
SF-S-TS	минимальных	0,0200	0,00250	0	0
	средних	0,0328	0,00252	0	0
	максимальных	0,0330	0,00295	0	0
ТФ-2	минимальных	0,1480	-0,01710	0,00109	-0,0000133
	средних	0,0410	0,00445	0,00010	0,0000013
	максимальных	0,2210	-0,02721	0,00224	-0,0000400

Коэффициенты полиномиальных зависимостей представлены в табл. 2 для изучаемых керамических материалов и стекла. Оперирование этими коэффициентами дает возможность вычислять значения повреждений кромки при той или иной применяемой нагрузке на индентор.

Предложенный анализ эмпирических данных позволяет получать область возможных значений повреждаемости кромок хрупких материалов при локальном нагружении. Представленный подход можно использовать для экспресс-анализа повреждаемости материалов, позволяющего определить характерный диапазон разрушений их края в зависимости от величины прилагаемой нагрузки.

Выводы

По результатам настоящего экспериментального исследования твердости и закономерностей повреждаемости технической керамики и стекол при локальном нагружении индентором Роквелла методом царапания до скалывания кромки можно сделать следующие выводы:

1. Определены значения твердости при царапании хрупких неметаллических конструкционных материалов типа технической керамики и стекол, учитывающие влияние особенностей локального нагружения, деформирования и разрушения их поликристаллической и аморфной структуры. Для рассмотренных материалов в исследованном диапазоне нагрузок значения твердости на 10...20 % превышают известные литературные данные, полученные стандартными методами с использованием инденторов Виккерса и Кнуппа. Установлены корреляционные взаимосвязи твердости при царапании с модулем упругости Юнга и трещиностойкостью.

2. Для исследованного диапазона нагрузок построены экспериментальные диаграммы двух типов повреждаемости изучаемых материалов, характерных для этапов царапания индентором поверхностей образцов и скалывания их кромок. Установлены корреляционные зависимости меж-

ду твердостью и повреждаемостью технической керамики и стекол, которые имеют практическое значение при выборе материалов на стадии проектирования изделий новой техники.

3. Предложенный способ описания экспериментальных диаграмм с помощью линейных и нелинейных аппроксимирующих зависимостей позволяет определять возможные повреждения поверхности и края образца хрупкого материала при различных уровнях нагрузки. Проведенный анализ эмпирических результатов может использоваться для получения экспресс-оценки повреждаемости материалов как в лабораторных, так и в производственных условиях, для материаловедческих работ по усовершенствованию материалов, служить основой определения их качества при контрольных испытаниях или аттестации.

Список литературы / References

1. Балкевич В.Л. (1984) *Техническая керамика*: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Стройиздат. Balkevich, V.L. (1984) *Technical ceramics*: Manual for Techn. Higher Inst. 2nd Ed. Moscow, Strojizdat [in Russian].
2. Родичев Ю.М. (2005) Конструкционная прочность хрупких неметаллических материалов. *Прочность материалов и конструкций*. Раздел 9.2. Трошенко В.Т. (ред.). Киев, Академперіодика, сс. 955–992. Rodichev, Yu.M. (2005) Structural strength of brittle nonmetallic materials. *Strength of materials and structures*. Chapt. 9.2. Ed. by V.T. Troshchenko. Kiev, Akademperіodika, 955–992 [in Russian].
3. Хасанов О.Л., Бикбаева З.Г., Двиліс Э.С. и др. (2012) *Твердость, микротвердость и нанотвердость наноструктурных керамических материалов*. Томск, Изд-во Томского политехн. ун-та. Khasanov, O.L., Bikbaeva, Z.G., Dvilis, E.S. et al. (2012) *Hardness, microhardness and nanohardness of nanostructural ceramic materials*. Tomsk, TPU [in Russian].
4. Scieszka S.F. (2005) Edge failure as a means of concurrently estimating the abrasion and edge fracture resistance of hard-metals. *Tribology International*, **38**, 834–842.
5. Chai H. (2011) On the mechanics of edge chipping from spherical indentation. *Int. J. Fract.*, **169**, 85–95.
6. Хворостяный В.В. (2014) Механическое поведение керамики и стекла при локальных разрушениях кромок образцов индентором Роквелла. *Пробл. прочности*, **3**, 106–115. Khvorostyani, V.V. (2014) Mechanical behavior of ceramics and glasses at local fractures of edges of samples by Rockwell indenter. *Problemy Prochnosti*, **3**, 106–115 [in Russian].

7. Quinn G.D., Quinn J.B. (2014) A new analysis of the edge chipping resistance of brittle materials. *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **35**, 209–224.
8. Хворостяний В.В., Панасенко А.В. (2015) Оценка повреждаемости кромок твердосплавного инструмента при локальных нагружениях. *Сверхтвердые материалы*, **1**, 75–82.
Khvorostianyi, V.V., Panasenko, A.V. (2015) Evaluation of damage of edges of hard alloy tool under local loading. *Sverkhvorydye Materialy*, **1**, 75–82 [in Russian].
9. Гогоци Г.А., Галенко В.И., Мудрик С.П. и др. (2007) Разрушение стекла при краевом скалывании. *Пробл. прочности*, **6**, 103 – 112.
Gogotsi, G.A., Galenko, V.I., Mudrik, S.P. et al. (2007) Fracture of glass at edge chipping. *Problemy Prochnosti*, **6**, 103 – 112 [in Russian].
10. (2010) CEN/TS 834-9. *Advanced technical ceramics – Mechanical properties of monolithic ceramics at room temperature*. Part 9: Method of test for edge-chip resistance. CEN (European Standard).
11. Williams J.A. (1996) Analytical models of scratch hardness. *Tribology International*, **29**, 675–694.
12. Quinn J., Su L., Flanders L., Lloyd I. (2000) «Edge toughness» and material properties related to the machining of dental ceramics. *Machining Science and Technology*, **4**, 291–304.
13. Зборщик А.М. (2008) *Конспект лекций по дисциплине «Новые материалы в металлургии»*. Донецк, ГВУЗ «ДонНТУ».
Zborshchik, A.M. (2008) *Synopsis of lectures on the subject «New materials in metallurgy»*. Donetsk, GVUZ DonNTU [in Russian].
14. Lawn B.R., Marshall D.B. (1979) Hardness, toughness and brittleness: an indentation analysis. *J. Am. Ceram. Soc.*, **62**, 347–350.
15. Anstis G.R., Chantikul P., Lawn B.R., Marshall D.B. (1981) A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I. Direct crack measurements. *Ibid*, **64**, 533–538.
16. Cook R.F., Pharr G.M. (1990) Direct observation and analysis of indentation cracking in glasses and ceramics. *Ibid*, **73**, 787–817.
17. Hannink R.H.J., Kelly P.M., Muddle B.C. (2000) Transformation toughening in zirconia-containing ceramics. *Ibid*, **83**, 461–487.
18. Lee S.K., Tandon R., Readey M.J., Lawn B.R. (2000) Scratch damage in zirconia ceramics. *Ibid*, **83**, 1428–1432.
19. Deriano S., Jarry A., Rouxel T. et al. (2004) The indentation fracture toughness (K_{Ic}) and its parameters: the case of silica-rich glasses. *J. Non-Cryst. Sol.*, **344**, 44–50.
20. Гнесин Г.Г., Осипова И.И., Ронталь Г.Д. и др. (1991) *Керамические инструментальные материалы*. Киев, Техника.
Gnesin, G.G., Osipova, I.I., Rontal, G.D. et al. (1991) *Ceramic tool materials*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
21. (1979) *Сопротивление разрушению*: Учебник для вузов. Писаренко Г.С. (ред.). 4-е изд., перераб. и доп. Киев, Вища школа.
(1979) *Breaking strength*: Manual for higher education inst. Ed. by G.S. Pisarenko. 4th Ed., Kiev, Vyshcha Shkola [in Russian].
22. Андриевский Р.А., Ланин А.Г., Рымашевский Г.А. (1974) *Прочность тугоплавких соединений*. Москва, Металлургия.
Andrievsky, R.A., Lanin, A.G., Rymashevsky, G.A. (1974) *Strength of refractory compounds*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
23. Хворостяний В.В. (2016) Оценка твердости керамических материалов при царапании поверхности образцов индентором Роквелла. *Сб. матер. науч. чтений им. чл.-корр. РАН И.А. Одинг «Механические свойства современных конструкционных материалов»*, Москва, 6–7 сентября 2016 г., сс. 136–137.
Khvorostianyi, V.V. (2016) Evaluation of hardness of ceramic materials at scratching of sample surface by Rockwell indenter. *In: Proc. of I.A. Oding Sci. Lectures, RAS, Mechanical Properties of Modern Structural Materials (Moscow, 6-7 September 2016)*, 136–137 [in Russian].

ОЦІНКА ТВЕРДОСТІ ТА ЛОКАЛЬНОЇ ПОШКОДЖУВАНОСТІ КЕРАМІКИ ТА СКЛА МЕТОДОМ ДРЯПАННЯ ДО ВІДКОЛЮВАННЯ КРОМКИ

В.В. Хворостяний, Ю.М. Родічев, О.Б. Сорока

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязєвська, 2.

E-mail: khvorostianyi.v.v@ipp.kiev.ua

Наведено результати експериментального дослідження закономірностей пошкоджуваності крихких матеріалів, таких як скло та кераміка при локальному навантаженні методом дряпання індентором Роквелла поверхні зразка до відколювання кромки. Визначено значення твердості при дряпанні досліджуваних крихких матеріалів. Показано, що твердість при дряпанні перевищує значення твердості при індентуванні стандартним гострим індентором переважно на 20 %. Представлено залежності пошкоджуваності поверхні від навантаження, а також між твердістю при дряпанні, пошкоджуваністю, модулем пружності та критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень. Запропоновано спосіб використання експериментальних діаграм пошкоджуваності крихких матеріалів для достовірного визначення ступеню їх локального руйнування в залежності від рівня навантаження. Бібліогр. 23, табл. 2, рис. 5

Ключові слова: кераміка, скло, дряпання до відколювання кромки, твердість, відстань руйнування, діаграми пошкоджуваності

ASSESSMENT OF HARDNESS AND LOCAL DAMAGE OF CERAMICS AND GLASS BY THE METHOD OF SCRAPING UP TO CHIPPING OUT

V.V. Khvorostianyi, Y.M. Rodichev, O.B. Soroka

G.A. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine. 2 Timiryazevska Str., 01014, Kyiv, Ukraine.

E-mail: khvorostianyi.v.v@ipp.kiev.ua

The paper gives the results of experimental study of the regularities of damage in such brittle materials as glass and ceramics at local loading by the methods of sample surface scraping by Rockwell indenter up to chipping out. Hardness values at scraping of the studied brittle materials were determined. It is shown that hardness at scraping is higher than the hardness values at indentation with a standard sharp indenter, mostly by 20%. Dependencies of surface damage on load, as well as those between hardness at scraping, damage, modulus of elasticity and critical stress intensity factor, are presented. A method of application of experimental diagrams of brittle material damage for reliable determination of the degree of their local fracture, depending on the stress level is proposed. 23 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: ceramics, glass, scraping up to chipping out, hardness, destruction distance, damage diagrams

Поступила в редакцію

27.06.2019