

ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ЛІНІЙНО-ПРУЖНОЇ КЕРАМІКИ В УМОВАХ ЛОКАЛЬНОГО КРАЙОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ: СТАТИСТИЧНИЙ ПІДХІД

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

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ-014, вул. Тимірязєвська, 2.

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

Виконаний статистичний аналіз експериментальних даних лінійно-пружної однофазної кераміки, випробуваної при локальному навантаженні методом дряпання індентором Роквела поверхні зразку до відколювання його кромки. Для параметрів пошкоджуваності та опору руйнуванню кромки побудовані експериментальні залежності розподілу Вейбула і застосовані моноmodalні апроксимації. Отримано діаграми руйнування керамічних матеріалів з урахуванням даних статистичного аналізу, на яких відображено закономірності зміни величини параметру пошкоджуваності кромки при різних значеннях ймовірності руйнування. Наведено зіставлення експериментальних та розрахункових статистичних результатів. Зроблено висновок про те, що поєднання емпіричних та аналітичних даних пошкоджуваності кромки та опору їй руйнуванню в зазначених умовах випробувань дозволяє одержувати обґрунтовані значення відповідних параметрів, які необхідні для подальшого достовірного прогнозування працездатності кераміки. Запропонований підхід значно підвищує точність оцінки застосовуваних параметрів механічної поведінки крихких матеріалів і сприяє раціональному вибору для них оптимальних режимів експлуатації. Бібліогр. 20, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: кераміка, дряпання до відколювання кромки, параметри пошкоджуваності та опору руйнуванню, діаграми руйнування, розподіл Вейбула, статистична оцінка і прогнозування

Кераміка має доволі широке практичне застосування у різних галузях промисловості за рахунок своїх особливих властивостей, що наділяють сучасні інженерні вироби з цього класу матеріалів важливими конкурентними перевагами. Елементи конструкцій та деталі машин з технічної кераміки не втрачають працездатності і здатні зберігати свій заданий функціонал навіть у складних експлуатаційних умовах при термосиловому навантаженні. Для кераміки характерна висока твердість, практично ідеальна пружність, але разом з тим вона має порівняно з металами низький опір зародженню та поширенню тріщин. Властивий крихкий характер руйнування керамічних матеріалів фактично є головним негативним фактором, який необхідно враховувати на етапах проектування відповідних конструктивних елементів та прогнозування їхньої несучої здатності. Значний вплив на характеристики міцності справляє стан робочих поверхонь кераміки, що отримується в процесі технологічних операцій формування матеріалу та його механічної обробки. Наявність різного роду концентраторів напружень на поверхні крихкого матеріалу або виробів з нього за певних умов призводить до катастрофічних руйнувань. Поширеним явищем вважається пошкодження крайових зон і безпосередньо кромки виробів, що виводить їх з ладу, як це може відбуватися при роботі ріжучого керамічного інструменту (лезо ножа або скальпеля з кераміки), при функціонуванні стоматологічних або ортопедичних імплантатів (зубні коронки, елементи ендопротезування

суглобів опорно-рухового апарату людини). У зв'язку з цим має велику наукову і практичну цінність вирішення задач мінімізації пошкоджуваності кромки деталей нової техніки з керамічних матеріалів, а також визначення їх опору руйнуванню в умовах локального контактного навантаження.

Можна констатувати, що на сьогоднішній день існує велика кількість різноманітних експериментальних методів дослідження крихких матеріалів при локальному навантаженні. Безпосередньому вивченню пошкоджуваності та опору руйнуванню кромки присвячені методи випробувань, які полягають у створенні крайових відколів за допомогою твердих інденторів або пуансонів [1–5]. Принцип крайового руйнування матеріалів реалізується при вирішенні актуальних завдань матеріалознавства та міцності матеріалів, а його аспекти широко використовуються в контексті оптимізації технологічних процесів, таких, як шліфування та полірування деталей. Явище відколювання кромки готових керамічних виробів розглядається як один з ключових чинників визначення якості і вартості продукції, оцінки потенційних можливостей її промислового застосування.

Незважаючи на значний обсяг досліджень, виконаних за даним напрямком, можна відзначити, що результати випробувань крихких матеріалів при крайовому локальному навантаженні досі недостатньо розглядалися з точки зору їх застосування для оцінки конструкційної міцності крихких матеріалів, оцінки їх пошкоджуваності та надійності. При великому розкиді отримуваних експе-

риментальних даних при крайовому відколюванні важливою представляється достовірна оцінка з високою довірчою ймовірністю заданих граничних рівнів пошкодження кромки. У зв'язку з цим необхідно приділити більше уваги раціональній статистичній обробці даних і обґрунтуванню застосування на практиці отриманих результатів. Це буде сприяти підвищенню їх достовірності при проектуванні та виготовленні відповідальних елементів конструкцій і деталей машин [6].

Мета роботи полягала у визначенні гарантованого рівня характеристик пошкоджуваності та опору руйнуванню кромки керамічних матеріалів для підвищення достовірності оцінок їх локальної міцності за допомогою застосування статистичних методів при аналізі експериментальних даних.

Експериментальне дослідження механічної поведінки лінійно-пружної однофазної кераміки в умовах локального крайового навантаження було виконано методом дряпання індентором Роквела поверхні зразка до відколювання його кромки (S+EF метод) [4, 7]. Випробування проведені відповідно до основних положень стандарту CEN/TS 834-9:2010 [8] на зразках оксидної та нітрид-кремнієвої кераміки. Традиційно параметром пошкоджуваності кромки служить величина відстані руйнування L , що визначається як відстань від кромки зразка до найбільш віддаленої точки на шрамі відколу в площині нормального навантаження індентором [4, 9, 10]. Для подальшого аналітичного розгляду особливостей крайового локального руйнування більш зручним було оперування параметром $1/L$, що отримав назву «параметра пошкоджуваності при дряпанні до відколювання кромки» (D_{ES} , damageability parameter of scratching up to the edge chipping).

Як критерій руйнування кромки використовували характеристику опору руйнуванню F_{RS} , яка обчислювалася як середнє значення відношення руйнівного навантаження до відстані руйнування для відповідного масиву випробувань керамічного матеріалу [4, 11]. На стадії дряпання індентором поверхні зразка, яка передувала процесу відколювання краю, відбувається утворення пружно-пластичної канавки. За результатами вимірювання її

ширини і з огляду на геометрію застосовуваного індентора Роквела, визначали значення важливої механічної характеристики матеріалу – твердості при дряпанні H_S [12, 13]. Отримані дані визначення параметрів пошкоджуваності кромки, її опору руйнуванню в умовах крайового локального навантаження і твердості при дряпанні досліджуваних керамічних матеріалів наведено в табл. 1.

Класичне представлення результатів випробувань кераміки S+EF методом у вигляді діаграм руйнування – залежностей «руйнівне навантаження P_f – відстань руйнування L » демонструє закономірності їх механічної поведінки при крайовому відколюванні (рис. 1). На діаграмах приведені лінійні апроксимації експериментальних даних. При цьому слід зазначити, що в загальному випадку найбільш точна апроксимація може бути не обов'язково лінійною, а, наприклад, описуватися ступеневою [9, 10, 14] або поліноміальною [15] залежністю. Для досліджуваної лінійно-пружної кераміки була встановлена інваріантність величини опору руйнуванню F_{RS} по відношенню до руйнівного навантаження.

Задача обґрунтованого визначення гарантованого рівня параметрів пошкоджуваності та опору руйнуванню кромки керамічних матеріалів в умовах їх локального навантаження вирішувалася з використанням статистичних методів при аналізі експериментальних даних. Статистична обробка результатів випробувань виконувалася на основі статистичного розподілу Вейбула [16–18]. Цей розподіл широко застосовується в інженерній практиці для опису часу напрацювання до відмов технічних об'єктів. Двохпараметрична функція розподілу Вейбула визначається за формулою:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^a \right], \quad (1)$$

Функція щільності ймовірності обчислюється відповідно до наступного виразу:

$$f(x) = \left(\frac{a}{\lambda} \right) \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{a-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^a \right], \quad (2)$$

Найбільш простим та зручним методом знаходження параметрів розподілу Вейбула є метод

Таблиця 1. Результати експериментального дослідження лінійно-пружної кераміки методом дряпання індентором Роквела поверхні зразка до відколювання його кромки

Кераміка	Індекс	Кількість випробувань	Параметр пошкоджуваності кромки D_{ES} , 1/мм	Параметр опору руйнуванню кромки F_{RS} , Н/мм	Твердість при дряпанні H_S , ГПа
Оксид алюмінію	Al ₂ O ₃ -1	60	7,11±2,26	226±31	21,2
	Al ₂ O ₃ -2	106	7,28±2,21	234±23	16,2
	Al ₂ O ₃ -3	60	7,64±2,38	243±27	21,2
Оксид ітрію	Y ₂ O ₃	41	7,88±2,64	251±19	21,2
Оксид скандію	Sc ₂ O ₃	60	5,33±2,57	101±12	11,9
Нітрид кремнію	Si ₃ N ₄ -1	60	9,02±2,11	347±42	21,2
	Si ₃ N ₄ -2	60	8,37±1,96	320±21	21,2

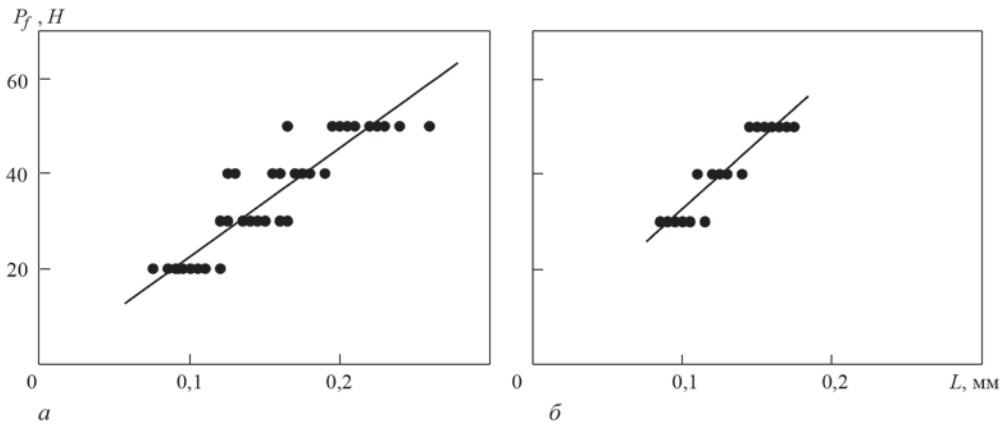


Рис. 1. Діаграми руйнування лінійно-пружної однофазної кераміки, побудовані за результатами випробувань методом дряпання індентором Роквела поверхні зразку до відколювання його кромки: *a* – оксид алюмінію Al_2O_3-1 ; *б* – нітрид кремнію Si_3N_4-2

функціонального перетворення рівняння (1) так, що функція двохпараметричного розподілу Вейбула на діаграмі ймовірностей представляється у вигляді прямої лінії [19], рівняння якої:

$$z = \alpha y - \beta, \quad (3)$$

де α – модуль Вейбула (параметр форми); $\beta = \alpha \ln \lambda$, λ – параметр масштабу.

Вісь ординат: $z = \ln(-\ln(1 - F(x)))$, вісь абсцис: $y = \ln x$, x – деяке значення випадкової величини X .

Для одержання емпіричного (вибіркового) розподілу виконували обчислення ймовірності безвідмовної роботи для кожного i -го члену варіаційного ряду для простої невеликої вибірки даних:

$$F(x) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}, \quad (4)$$

де i – ранг точки даних; n – загальна кількість точок.

Оцінку параметрів розподілу Вейбула α , β та λ здійснювали за допомогою методу найменших квадратів. Експериментальні залежності розподілу Вейбула були побудовані для параметрів пошкоджуваності кромки D_{ES} ($1/L_i$) та її опору руйнуванню F_{RS} (P_i/L_i) для досліджуваної кераміки при різних навантаженнях на індентор (рис. 2 та рис. 3). Побудова зазначених залежностей ви-

конувалася в середовищі програмного пакету «OriginPro 9.1». Контроль отриманих результатів проводився при виконанні аналогічних обчислень з використанням комп'ютерних програм «Microsoft Excel 2010» та «MATLAB 2011b». Проведений аналіз статистичних розподілів дозволив зробити висновок про прийнятність застосування модальних апроксимацій експериментальних залежностей для випробувань в умовах крайового локального навантаження керамічних матеріалів [20]. У табл. 2 представлені результати визначень параметрів розподілу Вейбула, які потім були використані для оцінювання величин пошкоджуваності кромки L та її опору руйнуванню F_{RS} при різних значеннях ймовірності руйнування F .

Виконання статистичної обробки експериментальних даних дозволило уточнити діаграми руйнування керамічних матеріалів, випробуваних при крайовому відколюванні. Ці діаграми були перебудовані для параметра пошкоджуваності кромки L , обчисленого для різних рівнів ймовірності руйнування (рис. 4). Слід зазначити, що в інтервалі застосованих навантажень спостерігалася головним чином близька до лінійної закономірності зміни параметру пошкоджуваності кромки. Обчисле-

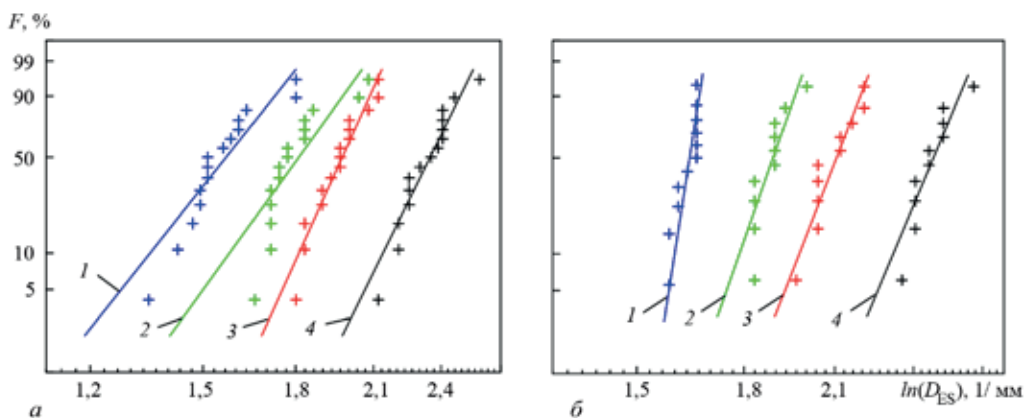


Рис. 2. Мономодальні апроксимації експериментальних залежностей розподілів Вейбула для параметра пошкоджуваності кромки $D_{ES}(1/L)$ у випробуваннях $S+EF$ методом кераміки оксиду алюмінію Al_2O_3-1 (*a*) та оксиду ітрію Y_2O_3 (*б*): 1 – $P_f=50$ Н; 2 – 40 Н; 3 – 30 Н; 4 – 20 Н

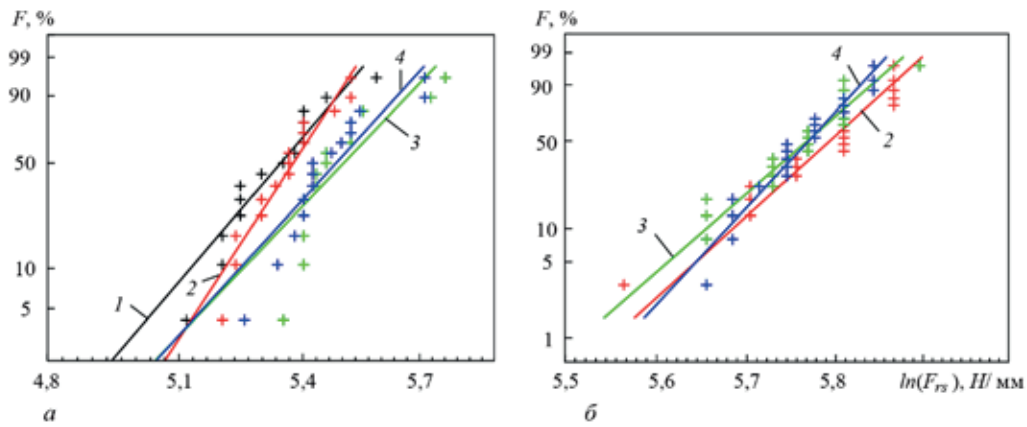


Рис. 3. Мономодальні апроксимації експериментальних залежностей розподілів Вейбула для параметру опору руйнуванню кромки $F_{RS}(P/L)$ у випробуваннях $S+EF$ методом кераміки оксиду алюмінію Al_2O_3 -1 (а) та нітриду кремнію Si_3N_4 -2 (б): 1 – $P_j=20$ Н; 2 – 30 Н; 3 – 40 Н; 4 – 50 Н

Таблиця 2. Результати визначення параметрів розподілу Вейбула для параметрів пошкоджуваності $D_{ES}(1/L)$ та опору руйнуванню $F_{RS}(P/L)$

P _p Н	Кераміка	Для параметру пошкоджуваності кромки $D_{ES}(1/L)$			Для параметру опору руйнуванню кромки $F_{RS}(P/L)$		
		α	β	λ	α	β	λ
10,00	Sc ₂ O ₃	5,4959	13,0592	10,7636	5,4959	25,7140	107,6366
15,00	Sc ₂ O ₃	12,9245	25,4785	7,1802	12,9245	60,4786	107,7029
20,00 (21,43)	Sc ₂ O ₃	16,1084	25,5434	4,8828	16,1084	73,7998	97,6557
	Al ₂ O ₃ -1	9,0544	21,6792	10,9608	9,0408	48,7268	219,1279
	Al ₂ O ₃ -2	11,6439	27,6396	10,7375	11,6439	63,3257	230,1037
	Al ₂ O ₃ -3	11,3723	27,6806	11,4048	11,3723	61,7490	228,0973
25,00	Y ₂ O ₃	11,5411	29,0807	12,4255	11,5411	63,6546	248,5069
	Sc ₂ O ₃	9,5420	13,9038	4,2936	9,5420	44,6182	107,3377
30,00 (31,24)	Sc ₂ O ₃	8,4018	10,7831	3,6090	8,4018	39,3592	108,2686
	Al ₂ O ₃ -1	11,1680	22,4395	7,4579	11,2379	60,7984	223,6587
	Al ₂ O ₃ -2	10,4953	21,6105	7,8386	10,4953	57,7320	244,8750
	Al ₂ O ₃ -3	8,6276	18,7956	8,8334	8,6276	48,1396	264,9976
	Y ₂ O ₃	12,8512	27,4398	8,4587	12,8512	71,1492	253,7592
	Si ₃ N ₄ -1	11,5669	28,9674	12,2354	11,5669	68,3089	367,0689
	Si ₃ N ₄ -2	14,0899	34,0553	11,2122	14,0899	81,9778	336,3647
35,00	Sc ₂ O ₃	12,4406	13,7088	3,0100	12,4406	57,9395	105,3503
40,00 (41,05)	Al ₂ O ₃ -1	8,0806	15,0988	6,4787	8,0619	44,8047	259,1963
	Al ₂ O ₃ -2	15,5375	28,2611	6,1650	15,5375	85,9796	253,0743
	Al ₂ O ₃ -3	23,7372	43,6697	6,2947	23,7372	131,2334	251,7903
	Y ₂ O ₃	17,3207	33,1767	6,7899	17,3207	97,0706	271,5949
	Si ₃ N ₄ -1	19,4782	40,6557	8,0626	19,4782	112,5083	322,5034
	Si ₃ N ₄ -2	16,5931	34,8856	8,1859	16,5931	96,0954	327,4341
50,00 (50,86)	Al ₂ O ₃ -1	8,5597	13,8740	5,0574	8,5301	47,1910	252,7224
	Al ₂ O ₃ -2	15,0787	23,9658	4,9007	15,0787	83,2112	249,2508
	Al ₂ O ₃ -3	10,8987	18,2914	5,3565	10,8987	60,9272	267,8208
	Y ₂ O ₃	32,1342	53,0734	5,2154	32,1342	178,7832	260,7710
	Si ₃ N ₄ -1	8,9662	18,5505	7,9164	8,9662	53,6265	395,8209
	Si ₃ N ₄ -2	20,0751	37,6486	6,5233	20,0751	116,1828	326,1666

ні ймовірнісні пошкодження кромки зразків при різних низьких рівнях ймовірності руйнування істотно більші середніх експериментальних значень величини відстані руйнування при тому чи іншому навантаженні на індентор. Для ймовірності руйнування $F = 0,01$, що означає, що в 1 % випадків відбувається руйнування і відповідає утворенню найбільших пошкоджень кромки, значення параметру L перевищує в 1,2...1,5 рази традицій-

но використовувані для практичного оцінювання матеріалів середні його значення, одержувані безпосередньо з досліду. При розгляді інших рівнів ймовірності руйнування, наприклад $F = 0,05$ та $F = 0,10$, вказана відмінність у значеннях величини відстані руйнування становить 15...30 та 10...20 % відповідно.

Ступінь пошкоджуваності кромки при їх локальних навантаженнях індентором описують па-

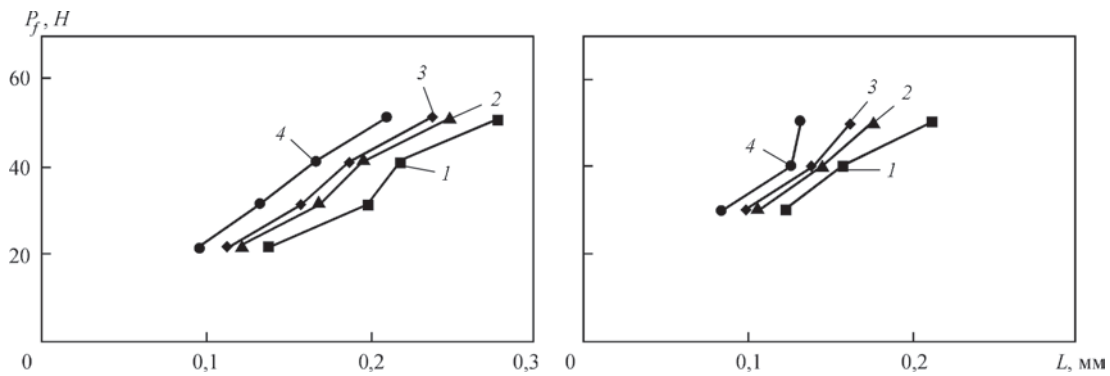


Рис. 4. Діаграми руйнування лінійно-пружної однофазної кераміки, побудовані з урахуванням статистичної обробки експериментальних даних ($1 - F = 0,01$; $2 - 0,05$; $3 - 0,10$; $4 - 0,50$): *a* – оксид алюмінію Al_2O_3-2 ; *б* – нітрид кремнію Si_3N_4-1

раметром L , який безпосередньо пов'язаний з габаритами уламку матеріалу, що відокремлюється. Очевидно, що чим більші значення величини відстані руйнування, тим більш значні пошкодження кромки, які знижують міцність виробів при функціональних навантаженнях. У разі виникнення великих розмірів відколів для надання деталі робочого стану потрібна механічна обробка і видалення крайових дефектів. При цьому підвищується трудомісткість її виготовлення пропорційно збільшенню розміру відколу. Проте часто для крихких матеріалів навіть невеликі пошкодження кромки можуть бути критичними та неприйнятними для подальшої працездатності виробу. Тому для кожного етапу експлуатації технічного елемента необхідно контролювати рівень пошкоджуваності його кромки.

При розв'язанні задач проектування в різних галузях промисловості визначення механічної поведінки крихких матеріалів з позицій їх конструкційної міцності в умовах заданого способу навантаження проводиться на основі детального аналізу гарантованого рівня параметрів міцності при низькій ймовірності руйнування F у діапазоні від 0,1 до 0,001. Для матеріалів даного дослідження досить прийняти рівень ймовірності руйнування $F = 0,01$, щоб отримати статистично достовірну оцінку їх пошкоджуваності та опору руйнуванню при локальних крайових навантаженнях, яка відповідає несприятливим випадкам, що призводять до можливих втрат керамікою своїх функціональних властивостей. У зв'язку з цим були визначені параметри $L^{0,01}$ та $F_{RS}^{0,01}$ при ймовірності руйнування $F = 0,01$ для досліджуваної лінійно-пружної кераміки і проведено їх порівняння з середніми та максимальними (мінімальними) експериментальними значеннями (рис. 5). Зіставлення результатів пошкоджуваності кромки зразків керамічних матеріалів, випробуваних S+EF методом, виконувалося при оперуванні значеннями величини відстані руйнування при певному рівні навантаження на індентор $P_f = 30$ Н, як деякому середньому значенні з діапазону прикладених навантажень. Таким чином було показано, що прогнозовані ймовірніс-

ні пошкодження кромки зразків кераміки перевищують максимальні емпіричні значення на 10...40 %. Статистично обґрунтовані мінімальні значення опору руйнуванню кромки для досліджуваної кераміки на 25...50 % менші середніх результатів з дослідів і на 10...40 % нижчі за мінімальні експериментальні значення.

Ці дані свідчать, що для прогнозування руйнування крихких матеріалів в умовах крайового локального навантаження використання тільки відповідних параметрів, отриманих з експерименту, не дає повного об'єктивного опису їх механічної поведінки. Тому необхідно розглядати комплекс результатів, який містить дані статистичного аналізу. При цьому

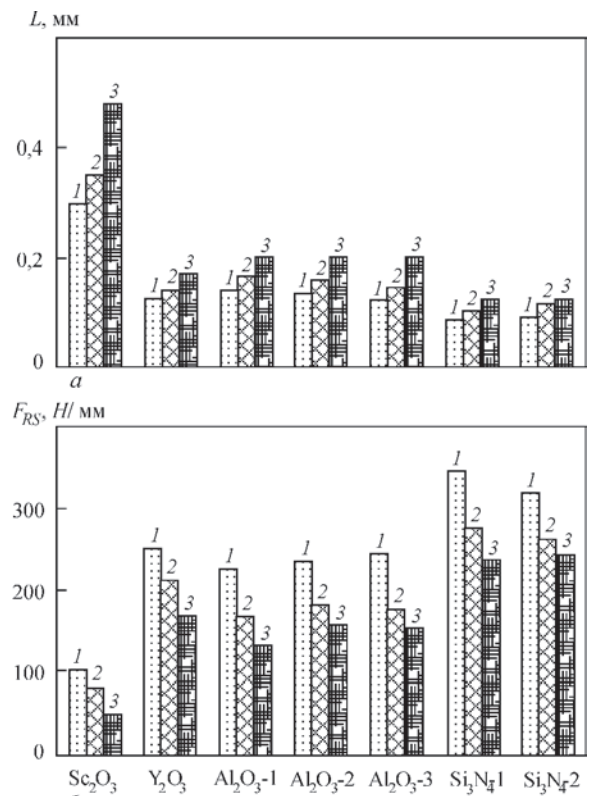


Рис. 5. Гістограми порівняння експериментальних ($L_{\text{серед}}$, L_{max} , $F_{RS, \text{серед}}$, $F_{RS, \text{min}}$) та розрахункових ($L^{0,01}$, $F_{RS}^{0,01}$) даних для лінійно-пружної однофазної кераміки: за параметром пошкоджуваності кромки (*a*), $1 - L_{\text{серед}}$; $2 - L_{\text{max}}$; $3 - L^{0,01}$; за параметром опору руйнуванню кромки (*б*), $1 - F_{RS, \text{серед}}$; $2 - F_{RS, \text{max}}$; $3 - F_{RS}^{0,01}$

значно підвищується точність визначення критичних розмірів пошкоджень матеріалів та величин їх опору руйнуванню, що може служити основою для вибору оптимальних режимів і умов експлуатації конструкційних елементів і деталей машин.

Висновки

Запропонований спосіб обґрунтованого визначення гарантованого рівня характеристик пошкоджуваності та опору руйнуванню кромки лінійно-пружної кераміки, що базується на застосуванні статистичного розподілу Вейбула, дозволяє підвищити достовірність одержуваних оцінок їх механічної поведінки в умовах локального крайового навантаження.

Проведена статистична обробка експериментальних даних керамічних матеріалів, випробуваних методом дряпання до відколювання кромки і одержана достовірні оцінка з високою довірчою ймовірністю заданих граничних рівнів пошкодження кромки.

Базуючись на результатах статистичного аналізу дослідних даних отримані уточнені діаграми руйнування кераміки, побудовані для значень параметру пошкоджуваності кромки для різних ймовірностей руйнування. Показано, що у діапазоні прикладених навантажень спостерігається переважно близька до лінійної тенденція збільшення значення параметру пошкоджуваності кромки.

Здійснено визначення механічної поведінки досліджуваних керамічних матеріалів з позицій їх конструкційної міцності, що базувалося на детальному аналізі гарантованого рівня параметрів пошкоджуваності та опору руйнуванню при низькій ймовірності руйнування.

Побудовано гістограми порівняння експериментальних середніх та екстремальних значень параметрів пошкоджуваності та опору руйнуванню з розрахунковими статистичними даними. Показано, що для прогнозування руйнування керамічних матеріалів в умовах локального крайового навантаження слід оперувати сукупністю результатів, що містить як емпіричні, так і статистичні дані.

Список літератури

- McCormick N.J., Almond E.A. (1990) Edge flaking of brittle materials. *J. Hard Mater.*, **1**, 25–51.
- 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.
- Gogotsi G.A., Galenko V.I., Mudrik S.P. et al. (2010) Fracture resistance estimation of elastic ceramics in edge flaking: EF baseline. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **30**, 1223–1228.
- Хворостяний В.В. (2014) Механическое поведение керамики и стекла при локальных разрушениях кромок образцов индентором Роквелла. *Проблемы прочности*, **3**, 106–115.

- Quinn G.D. (2015) On edge chipping testing and some personal perspectives on the state of the art of mechanical testing. *Dental Materials*, **31**, 26–36.
- Jayatilaka ADeS., Trustrum K. (1977) Statistical approach to brittle fracture. *J. Mater. Sci.*, **12**, 1426–1430.
- Хворостяний В.В. (2010) Определение сопротивления разрушению керамики при S+EF методе (царапание поверхности образца вплоть до скалывания его кромки). 36. тез допов. XI міжнар. конф. «Прогресивна техніка і технологія – 2010» (Київ, 18–21 травня 2010 р.).
- (2010) 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. (European Standard).
- 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*, 291–304.
- Petit F., Vandeneede V., Cambier F. (2009) Ceramic toughness assessment through edge chipping measurements – Influence of interfacial friction. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **29**, 2135–2141.
- Гогоці Г.А., Галенко В.И., Мудрик С.П. и др. (2007) Разрушение стекла при краевом скалывании. *Проблемы прочности*, **6**, 103–112.
- Williams J.A. (1996) Analytical models of scratch hardness. *Tribology International*, **29**, 675–694.
- Flanders L.A., Quinn J.B., Wilson Jr. O.C., Lloyd I.K. (2003) Scratch hardness and chipping of dental ceramics under different environments. *Dental Materials*, **19**, 716–724.
- Chai H., Lawn B.R. (2007) A universal relation for edge chipping from sharp contacts in brittle materials: A simple means of toughness evaluation. *Acta Materialia*, **55**, 2555–2561.
- Morrell R., Gant A.J. (2001) Edge chipping of hard metals. *Int. J. Refract. Met. & Hard Mater.*, **19**, 293–301.
- Weibull W. (1939) A statistical theory of the strength of materials. *Proc. Royal Swedish Inst. Eng. Res.*, **151**, 1–45.
- (2003) *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. (International Standard).
- Quinn J.B., Quinn G.D. (2010) A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials. *Dental Materials*, **26**, 135–147.
- Тихов М.С., Агеев В.В., Бородина Т.С. (2010) Оценивание параметров распределения Вейбулла по случайно цензурированным выборкам. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, **4**, 141–145.
- Родичев Ю.М., Сорока Е.Б., Шабета А.А. и др. (2013) Оценка локальной прочности и повреждаемости хрупких материалов по параметрам статистического распределения экспериментальных данных. *Вісник Тернопільського національного університету*, **4**, 161–173.

References

- McCormick, N.J., Almond, E.A. (1990) Edge faking of brittle materials. *J. Hard Mater.*, **1**, 25–51.
- Scieszka, S.F. (2005) Edge failure as a means of concurrently estimating the abrasion and edge fracture resistance of hard-metals. *Tribology Int.*, **38**, 834–842.
- Gogotsi, G.A., Galenko, V.I., Mudrik, S.P. et al. (2010) Fracture resistance estimation of elastic ceramics in edge faking: EF baseline. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **30**, 1223–1228.
- Khvorostianyi, V.V. (2014) Mechanical behaviour of ceramics and glass at local fractures of sample edges by Rockwell indenter. *Problemy Prochnosti*, **3**, 106–115.
- Quinn G.D. (2015) On edge chipping testing and some personal perspectives on the state of the art of mechanical testing. *Dental Materials*, **31**, 26–36.
- Jayatilaka, ADeS., Trustrum, K. (1977) Statistical approach to brittle fracture. *J. Mater. Sci.*, **12**, 1426–1430.
- Khvorostianyi, V.V. (2010) Determination of fracture resistance of ceramics at S+EF method (scratching of sample surface up to edge chipping). In: *Abstr. of Papers of 11th Int.*

- Conf. on Advanced Engineering and Technology – 2020* (Kyiv, 18-21 May, 2010).
8. (2010) *Advanced technical ceramics – Mechanical properties of monolithic ceramics at room temperature*. Pt 9: Method of test for edge-chip resistance. CEN/TS 834-9. [Current from 2010-08-15]. CEN, 2010, European Standard.
 9. Quinn, J., Su, L., Flanders, L., Lloyd, I. (2000) «Edge toughness» and material properties related to the machining of dental ceramics. *Machining Sci. and Technology*, 291–304.
 10. Petit, F., Vandeneede, V., Cambier, F. (2009) Ceramic toughness assessment through edge chipping measurements – Influence of interfacial friction. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 29, 2135–2141.
 11. Gogotsi, G.A., Galenko, V.I., Mudrik, S.P. et al. (2007) Glass fracture at edge chipping. *Problemy Prochnosti*, 6, 103–112 [in Russian].
 12. Williams, J.A. (1996) Analytical models of scratch hardness. *Tribology Int.*, 29, 675–694.
 13. Flanders, L.A., Quinn, J.B., Wilson, Jr. O.C., Lloyd, I.K. (2003) Scratch hardness and chipping of dental ceramics under different environments. *Dental Materials*, 19, 716–724.
 14. Chai, H., Lawn, B.R. (2007) A universal relation for edge chipping from sharp contacts in brittle materials: A simple means of toughness evaluation. *Acta Materialia*, 55, 2555–2561.
 15. Morrell, R., Gant, A.J. (2001) Edge chipping of hard metals. *Int. J. Refract. Met. & Hard Mater.*, 19, 293 – 301.
 16. Weibull, W. (1939) A statistical theory of the strength of materials. *Proc. Royal Swedish Inst. Eng. Res.*, 151, 1–45.
 17. (2003) 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. Int. Standard.
 18. Quinn, J.B., Quinn, G.D. (2010) A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials. *Dental Materials*, 26, 135–147.
 19. Tikhov, M.S., Ageev, V.V., Borodina, T.S. (2010) Evaluation of Weibull distribution parameters. *Vestnik Nizhegorod. Unta N.I. Lobachevskogo*, 4, 141–145 [in Russian].
 20. Rodichev, Yu.M., Soroka, E.B., Shabetya, A.A. et al. Evaluation of local strength and damageability of brittle materials by the parameters of statistical distribution of experimental data. *Visnyk Ternopil. Nats. Un-tu*, 4, 161–173 [in Russian].

FRACTURE RESISTANCE AND DAMAGEABILITY OF LINEAR-ELASTIC CERAMICS UNDER THE CONDITIONS OF EDGE LOCAL LOADING: A STATISTICAL ANALYSIS

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

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of NAS of Ukraine. 2 Timiryazevska Str, 01014, Kyiv, Ukraine.
E-mail: khvorostyani.v.v@ipp.kiev.ua

A statistical analysis of experimental data of linear-elastic single-phase ceramics, tested under local loading by scratching of specimen surface up to the edge chipping by the Rockwell indenter, was performed. Experimental dependences of Weibull distribution for the parameters of damageability and fracture resistance of the edge were constructed and monomodal approximations were applied. The diagrams of fracture of ceramic materials are obtained taking into account the data of statistical analysis, which reflect the patterns of change in the value of the edge damageability parameter at different values of fracture probability. A comparison of experimental and calculated statistical results was given. It is concluded that the combination of empirical and analytical data on the damageability of the edges and their resistance to fracture under the indicated test conditions makes it possible to obtain reasonable values of the corresponding parameters, which are necessary for further reliable prediction of the performance of ceramics. The proposed approach significantly increases the accuracy of estimation of the used parameters of mechanical behavior of brittle materials and contributes to rational selection of optimal operating conditions for them. 20 Ref, 2 Tabl. 2, 5 Fig.

Key words: ceramics, scratching up to edge chipping, damageability and fracture resistance parameters, diagrams of fracture, Weibull distribution, statistical estimation and prediction

Надійшла до редакції 06.08.2020

КИЇВСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ ЯРМАРОК



МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР

Україна, м. Київ, Броварський пр-т, 15
тел.: (044) 201-11-58, 201-11-65, 201-11-56
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua,
plast@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

**24–27 листопада
2020**