

УДК 539.4;519.221

**Ю. Родічев, канд. техн. наук**

*Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України*

## **ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ТА ОПІР РУЙНУВАННЮ КРОМОК ЕЛЕМЕНТІВ З КРИХКИХ ТА КВАЗІКРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ**

**Резюме.** Розроблено технічний підхід для оцінювання опору руйнуванню та пошкоджуваності крайових зон елементів конструкцій з крихких та квазікрихких матеріалів, який дозволяє уникнути недоліки, що виникають при застосуванні гострого індентора й отримати можливість визначити безперервні та дискретні характеристики опору самої кромки. Спосіб тестування полягав в скануванні кромки при переміщенні навантажувального елемента з циліндричною поверхнею вздовж грані пластини. Як параметри пошкоджуваності використовують величини максимальних та середніх відколів по передній та торцевій поверхні та їх співвідношення, площу відколів. Як показники локального опору руйнуванню кромки використовується відношення навантаження до розмірів відколів. Визначено особливості механічної поведінки гострої кромки скла при локальному дискретному навантаженні та при безперервному скануванні. Для скла встановлено два механізми локального руйнування: сколювання з переважним впливом механізму відриву та викришування і роздрібнення фрагментів кромки з переважним впливом механізмів розсіяного руйнування. Виконано експериментальну оцінку характеру і ступеню пошкоджень та опору локальному руйнуванню твердосплавної різальної пластини у вихідному стані та із зносостійким PVD – покриттям TiAlN. Показано, що безперервне сканування дозволяє оцінити закономірності поведінки краю елементів при локальному навантаженні з урахуванням рівня та характеру дефектності.

**Ключові слова:** пошкоджуваність, руйнування, кромка, крихкі матеріали, квазікрихкі матеріали, індентор, сканування, відкол.

**Y. Rodichev**

## **EDGE DAMAGEABILITY AND FRACTURE RESISTANCE OF ELEMENTS MADE OF BRITTLE AND SEMIBRITTLE MATERIALS**

**Summary.** Technical approach for evaluation of the fracture resistance and damageability of edge areas for structural elements made of brittle and quasibrittle materials, which avoids drawbacks arising from the use of sharp indenter and enables to determine continuous and discrete characteristics of the edge resistance is developed. To implement the test of the parts edge a special arrangement is developed. The testing method is that a loading element with cylindrical surface is moving along the edge of the specimen and scanning one. As the load element carbide or polycrystalline superhard material plate is suggested. The test subjects were edges of flat glass plates and cemented carbide cutting tool. As the parameters of damageability maximum and mean sizes of chips on the front surface and the flank one and their ratio, as well as square of chips are used. As the indicator of local resistance to fracture of edges the ratio of load to the size of chips is proposed. The features of mechanical behavior of acute glass edge at a local discrete load and in continuous scanning are determined. Two mechanisms for local fracture of glass: chipping with the predominant influence of the breaking-off mechanism and microchipping and crushing of edge fragments with the predominant influence of mechanisms of scattered fracture were detected. The experimental evaluation of the nature and degree of damage and fracture resistance for cemented carbide cutting tool in its original condition and with wear-resistant PVD - coating TiAlN is obtained. It is shown that the application of brittle wear-resistant coating reduces cutting edge fracture under the local loading. The mechanisms of edge fracture of brittle and quasibrittle materials are revealed. It is proved that the ratio of mean sizes of chips on the front surface and the flank one as well as the indicator of local resistance to fracture of edges characterize brittleness of the material under the local loading. It is shown that the results of continuous scanning allow estimating the behaviour of elements' edge under the local loading with the considering of level and nature of defects. Complex of characteristics obtained by the proposed method can be used to improve the load carrying capacity of brittle and quasibrittle elements by improving design solutions, edge technology and surface modification of materials.

**Key words:** damageability, fracture, edge, brittle materials, quasibrittle materials, indenter, scanning, chip.

**Вступ.** При технологічних операціях механічного оброблення та експлуатації крихких та квазікрихких матеріалів під час контакту з твердими тілами виникають значні контактні напруження, які призводять до порушення крайових областей деталей, особливо, якщо вони мають гострі кромки. Типовими пошкодженнями краю є відколи, викришування кромки, мікро- та макротріщини, що призводить до втрати показників якості, міцності та навіть повного руйнування конструкцій внаслідок утворення критичних за розмірами дефектів. З позицій конструкційної міцності крихких матеріалів, окрім параметрів опору руйнуванню краю деталей актуальним є визначення характеру та ступеня його пошкодження. Такий підхід є важливим для контролю механічного стану елементів конструкцій зі скла для приладобудування, авіаційного, транспортного скління та будівельних структур, для різальних твердосплавних пластин, які застосовуються у важкому машинобудуванні, тощо.

Відомі методи оцінювання опору крайовому сколюванню крихких матеріалів із використанням алмазних інденторів, а саме інденторів Роквела та Вікерса [1–3]. До них відносяться метод крайового сколювання при індентуванні краю зразка на деякому віддаленні від кромки і метод дряпання зі сколюванням [4–7]. Критерієм опору сколюванню в обох методах слугує  $P/L$  – середнє значення відношення руйнівного навантаження на індентор  $P$  до значення відстані  $L$ , що визначаються як відстань від кромки зразка до крайньої точки шраму відколу на площині навантаження.

Недоліками цих методів є:

- використання спеціальних зразків із полірованою поверхнею та загостреною кромкою, що не завжди відповідає стану краю реальної деталі;
- значна кількість одиничних індентувань (великий розкид результатів при такому навантаженні вимагає проведення не менше 40...50 випробувань);
- дискретність оцінки внаслідок відсутності суцільного сканування усієї кромки;
- м'який режим навантаження, який призводить до непрогнозованого пошкодження кромки внаслідок доламування й некоректності отриманих результатів;
- неможливість реалізації методики в безпосередній близькості до кромки, коли дистанція від краю зразка стає співставимою з розміром індентора;
- неможливість відтворення напружено-деформованого стану при прикладанні навантаження до самої кромки;
- швидке руйнування алмазного індентора при сколюванні твердого сплаву.

Як наслідок, методи, в яких застосовують індентування такими стандартними інденторами, придатні для оцінювання загальної характеристики опору сколюванню матеріалів без урахування конструкційних та технологічних факторів та не можуть слугувати для оцінювання локальних характеристик міцності й пошкоджуваності самої кромки в умовах, коли механічна поведінка кромки визначає граничний стан елемента конструкції.

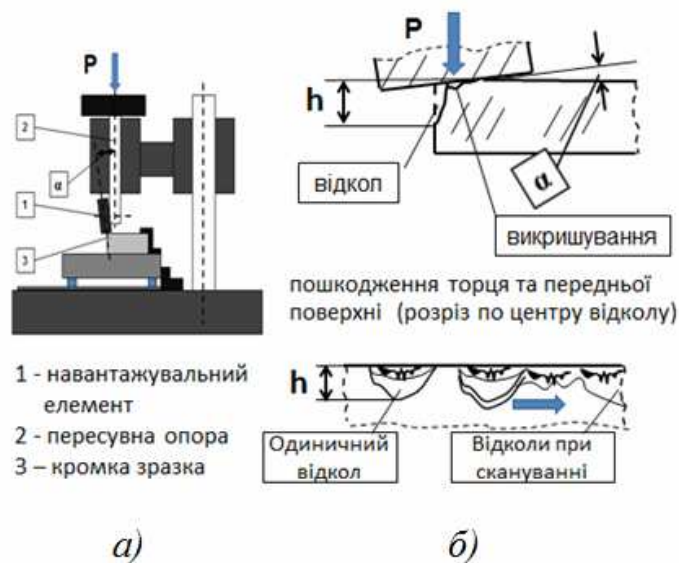
**Мета досліджень** – розроблення технічного підходу для оцінювання опору руйнуванню та пошкоджуваності крайових зон елементів конструкцій з крихких та квазікрихких матеріалів, яка б дозволила:

- уникнути недоліки, що виникають при застосуванні гострого індентора та отримати можливість визначити безперервні та дискретні характеристики опору самої кромки;
- визначити ці характеристики не тільки точково, а й уздовж всієї кромки деталі;
- врахувати форму кромки, в тому числі розміри та форми фасок, радіуси закруглення, а також дефектність крайової зони;

- врахувати технологічні фактори, що впливають на структуру та фізико-механічні властивості поверхні й приповерхневих шарів, у тому числі вплив механічної та термічної обробки, вплив методів поверхневої модифікації;
- забезпечити відтворюваність результатів експерименту, в тому числі при мінімальних навантаженнях, що особливо важливо для крихких матеріалів на зрізці скла.

**Методика.** Спосіб тестування полягає в скануванні кромки, яке відбувається шляхом прикладання контактної сили з тертям при переміщенні навантажувального елемента з циліндричною поверхнею вздовж грані пластини з крихкого матеріалу (наприклад, скла) або вздовж грані багатогранної твердосплавної різальної пластини. В якості навантажувального елемента використовують пластину з твердого сплаву або полікристалічного надтвердого матеріалу. Наприклад, для використання в якості інденторів пропонуються стандартні твердосплавні багатогранні неперезагострювальні пластини у формі трикутника зі стабільним радіусом заокруглення.

Для реалізації випробувань краю деталей з крихких матеріалів було розроблено пристрій, принципова схема якого наведена на рис.1а. Навантажувальний елемент 1 закріплюють на навантажувальній опорі 2 під деяким кутом  $\alpha$  (який може бути різним залежно від завдання дослідження) відносно вертикальної осі елемента 1. Також залежно від завдань дослідження, може бути здійснено дискретне індентування або сканування вздовж заданої ділянки кромки. Навантаження може проводитися по передній (рис.1б) та/або торцевій (задній) поверхні. При дискретному випробуванні краю після завершення навантаження, контрольованого візуально, та витримки, зразок переміщується, щоб між утвореним і наступним відколом була відстань не менше 1...2 мм. Випробування в режимі безперервного сканування краю виконується у два етапи. Спочатку за режимом однократного навантаження формується початковий відкол кромки. Потім під тією ж вертикальною силою зразок повільно пересувається на задану довжину силового сканування кромки (переміщення індентора праворуч від початкового відколу показано стрілкою). При випробуваннях реалізується м'який режим навантаження. Величина навантаження може варіюватися в різних експериментах за рахунок застосування еталонних мас. У результаті випробувань на торцевій та передній поверхнях пластини утворюються відколи (рис.1б та 2). Лінійні розміри, площа та щільність яких характеризують пошкодження та опір локальному навантаженню і можуть слугувати для оцінювання механічного стану кромки і фізико-механічних властивостей матеріалу.



**Рисунок 1.** Принципова схема випробувань (а) і характер пошкодження кромки елемента з крихкого матеріалу при дискретному індуванні і скануванні (б)

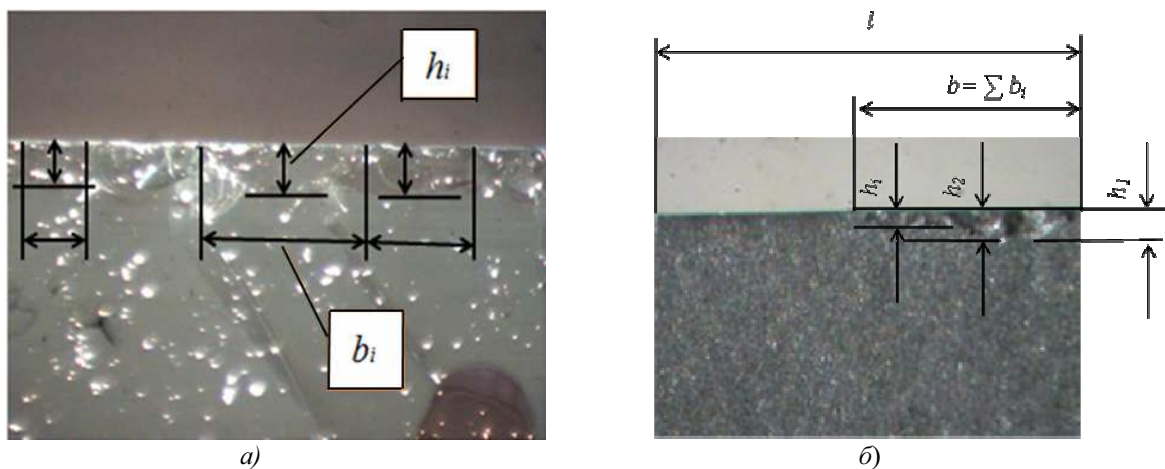
**Figure 1.** Schematic diagram of the test (a) and edge fracture mode at the discrete indentation and by scanning (б)

Вимірюються глибина відколів  $h_i$ , по передній та торцевій поверхнях ( $h_{пер}$ ,  $h_{тор}$ ), лінійний розмір ділянки відколу вздовж кромки  $b_i$ ,  $N$  – кількість відколів. Визначається максимальна глибина відколу

$$h_{max} = \max(h_i); \quad (1)$$

середня глибина відколу

$$h_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N}. \quad (2)$$



**Рисунок 2.** Оцінка параметрів відколів кромки: а) скла; б) твердого сплаву

**Figure 2.** Estimation of edge chips parameters: a) glass; б) cemented carbide

Сумарна довжина  $b$  ділянки з відколами вздовж грані, що випробується (довжина сканування  $l$ )

$$b = \sum_{i=1}^N b_i. \quad (3)$$

Розраховуються площі відколів  $F_i$  (форма відколів апроксимуються напівеліпсом, прямокутником, трикутником) та визначається сумарна площа відколів

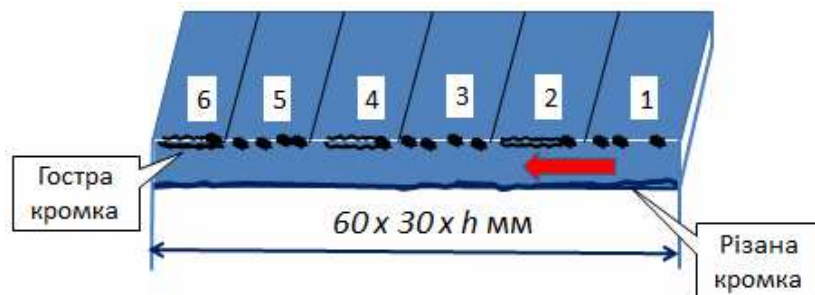
$$F = \sum_{i=1}^N F_i. \quad (4)$$

Як показники локального опору руйнуванню кромки використовуються: відношення навантаження до розмірів відколів  $P/h$  та  $P/b$  (опір руйнуванню кромки по передній поверхні  $F_{кп} = P/h_{пер}$ , опір руйнуванню кромки по торцевій поверхні  $F_{кт} = P/h_{тор}$ ), відношення навантаження до площі відколів  $P/F$ . Пошкоджуваність характеризується лінійними розмірами, площею і щільністю сколів по кожній з поверхні  $h_{max}$ ,  $h_{max}/h_{mean}$ ,  $b/l$ ,  $F$ . Для оцінювання статистичних параметрів

використовують нормальний закон розподілу, моно- і мультимодальні розподіли Вейбула.

**Результати.** Досліджували зразки у вигляді пластин з розмірами 30x60 мм, вирізані твердосплавним роликковим різакром із листового скла завтовшки 4 мм. Торцева поверхня, отримана при розламуванні, додатково не оброблялась. Площина торцевої поверхні, пластин була орієнтована під кутом 90° до поверхні полірованого флоат-скла. Навантаження прикладалися до передньої поверхні, отриманої флоат-процесом без додаткової обробки, на стан якої не впливав процес виготовлення зразків за рахунок спеціальних запобіжних заходів. Пластини мали два види краю – з різаною кромкою, що утворена твердосплавним роликом, та зворотної малодефектної гострої кромки. Випробуванням підлягала гостра кромка. Зразок було поділено на зони з ділянками кромки, які випробовувались при точковому індетуванні (дискретно) – ділянки 1, 3 і 5 та безперервному скануванню – ділянки 2, 4 та 6 (рис.3).

При скануванні вісь циліндричної поверхні навантажувального елемента, яким слугувала твердосплавна пластинка з циліндричною поверхнею з радіусом 0,85 мм, розташовували перпендикулярно кромці й під кутом 10°...12° до передньої поверхні пластини.

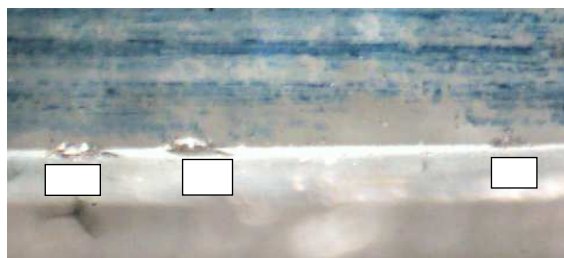


**Рисунок 3.** Розмітка пластини скла для випробування гострої кромки при локальному дискретному навантаженні та безперервному силовому скануванні

**Figure 3.** The marking of glass plate under the local testing of sharp edge with discrete local loading and continuous scan

Детальний аналіз пошкоджень кромки досліджуваного зразка виконували за допомогою мікроскопа «МБС-10» при збільшеннях  $\times 8$ ,  $\times 16$ ,  $\times 32$  і  $\times 56$ . Фотографування зразка під мікроскопом при  $\times 32$ -кратному збільшенні здійснювали за допомогою USB-відеокамери Sonix SN9C101 та програмного забезпечення «VidCap32». Характер пошкоджуваності кромки зразка також визначався при їх огляді на оптичному інвертованому мікроскопі Zeiss «Axiovert 40MAT». Додатково проводилось фотографування характерних ділянок при збільшенні  $\times 100$ ,  $\times 200$  і  $\times 500$  за допомогою цифрової фотокамери Canon A640 і програмного забезпечення «Axiovision LE».

**Особливості механічної поведінки гострої кромки скла при локальному дискретному навантаженні.** На рис.4 наведено частину 1 кромки пластини (рис.3) довжиною близько 1 мм, де при вертикальному зусиллі на індетор утворено три окремі відколи.



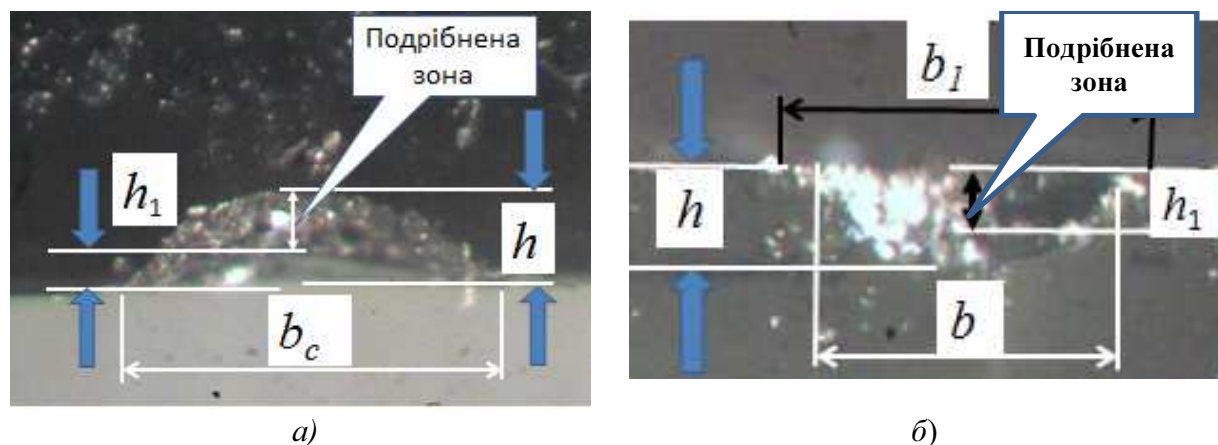
**Рисунок 4.** Загальний вигляд пошкодження кромки полірованої поверхні при дискретному сколюванні краю пластини листового скла

**Figure 4.** General views of the damaged edges of polished surface under discrete chipping of the sheet glass edge ( $P=3,7$  N)

На передній полірованій та торцевій поверхнях краю пластини визначаються глибина  $h$  лунки, що утворилася на краю пластини, та її довжина  $b$  уздовж кромки (рис.5,6). Аналіз відколу 1 на передній поверхні показав, що, на відміну від сколювання гострим індентором Роквела, коли спостерігається сколювання значних частин краю з утворенням конічних тріщин, пошкодження відбулося з переважним впливом механізмів розсіяного руйнування у вигляді викришування та роздрібнення фрагментів кромки. На значній частині лунки, що утворилася під дією індентора, бачимо шорсткувату поверхню зламу з подрібненими частинками скла. Площа відколу з гладкою поверхнею складає меншу частину лунки з глибиною  $(h-h_1)$ . На торцевій поверхні (рис.5б) глибина зони викришування є дещо меншою, ніж на передній полірованій поверхні краю.

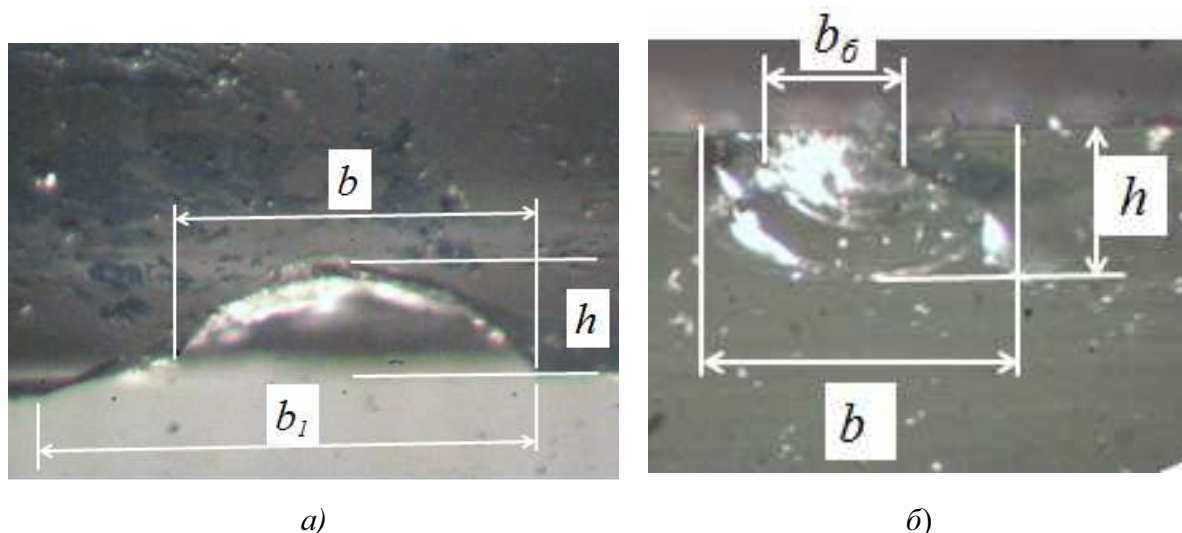
При утворенні відколу 2 (рис.4,6) превалює механізм сколювання, який проявляється в тому, що поверхня відколу є гладкою. На торцевій поверхні (рис.6,б) спостерігається несиметрична форма відколу пластини внаслідок різного рівня опору пошкодженню різних ділянок тріщинуватого шару кромки скла.

Таким чином, запропонована методика дозволяє виявити різні механізми руйнування саме кромки крихкого матеріалу та співвідношення цих механізмів. Для відколів, де спостерігається значний обсяг розсіяного пошкодження, глибина та довжина відколів як на передній полірованій поверхні з тріщинуватим шаром, так і на торцевій поверхні є значно меншою, ніж розмір відколів з переважно гладкою поверхнею відколу. Можна припустити, що це пов'язано з більшою дефектністю тріщинуватого шару полірованої передньої поверхні для відколів з більшим відсотком розсіяного пошкодження. І навпаки, чим менша вихідна дефектність, тим більшим є відкол із гладкою поверхнею. Тобто тріщинуватий шар зменшує концентрацію напружень при локальному навантаженні.



**Рисунок 5.** Визначення параметрів відколу на передній поверхні (відкол 1, дільниця1, x 56) (а) та на торцевій поверхні (відкол 1, дільниця1, x 32) (б) з переважним впливом механізмів викришування та роздрібнення фрагментів кромки

**Figure 5.** Estimation of chip parameters on the front surface (chip 1, area1, x 56) (a) and on the end surface (chip 1, area1, x 32) (b) with the predominant influence of crushing edge fragments mechanisms



**Рисунок 6.** Визначення параметрів відколу на передній поверхні (відкол 2, дільниця1, x56) (а) та на торцевій поверхні з (відкол 2, дільниця1, x32) (б) з переважним впливом механізму сколювання

**Figure 6.** Estimation of chip parameters on the front surface (chip 2, area1, x56) (a) and on the end surface (chip 2, area1, x32) (b) with the predominant influence of chipping mechanisms

Деякі результати при навантаженні з силою 7Н та приклади їх опрацювання наведено в табл.1. Пошкодження кромки при навантаженні силою під кутом 90° до передньої поверхні, якою була бокова поверхня листового скла, оцінювали на передній і торцевій поверхнях. Відповідними індексами було позначено глибину і довжину відколу  $h_{пер}$ ,  $b_{пер}$  та їх співвідношення  $b_{пер}/h_{пер}$  на передній поверхні, а також глибину відколу і його меншої частини – кратера, утвореного безпосередньо під індентором,  $h_{тор}$  і  $h_{тор1}$  на торцевій поверхні. При зусиллі 7Н глибина відколу на передній поверхні була стабільною близько 125 мкм. Подібне середнє значення глибини відколу було отримано при дряпанні зі сколюванням скла з застосуванням індентора Роквелла [6,7]. Але розкид значень за такою методикою випробувань був дуже великим – від 70 до 300 мкм. Для значень ширини відколів характерним є значний розкид і збільшення розміру пошкодження відносно глибини у понад 4 рази. Співвідношення глибини відколу на передній поверхні до такого на торці пластини  $h_{пер}/h_{тор}$  становило в середньому 0,4 й діапазон розкиду значень цього параметра був від 0,2 до 0,7.

При дряпанні зі сколюванням при зусиллі 11,62 Н розкид параметра опору руйнуванню  $F_{кnh}=P/h_{пер}$  для зразків листового скла знаходився в діапазоні значень 53,3...138,3 Н/мм. Середнє значення  $F_{кnh}$  було 80 Н/мм. Деяко меншим було середнє значення цього параметра на передній поверхні зразка – 56 Н/мм. Але значне збільшення розміру відколу на торці призвело до зменшення відповідного параметра  $F_{кnh}$  більше ніж удвічі – 22 Н/мм.

Таким чином, встановлено, що опір руйнуванню гострої кромки на торцевій поверхні є значно нижчим ніж для передньої. Це слід враховувати при визначенні працездатності краю скляних пластин.

**Особливості механічної поведінки гострої кромки скла при безперервному скануванні.** Недоліком дискретного навантаження є неможливість оцінити розподіл вздовж гострої кромки параметрів пошкоженості та опору руйнуванню, тому що за такого способу випробування навантаженню підлягають тільки окремі частини краю деталі. Властивості частин, що залишаються між точками, де має місце взаємодія кромки з індентором і утворюється відкол, залишаються невідомими. З таких умов вірогідність виявлення найбільшого пошкодження і відповідно «слабкої ланки» на дослідженій частині кромки з мінімальним опором руйнуванню є незначною.



Таблиця 1

Деякі результати оцінки опору руйнуванню та пошкодженості гострої кромки пластини скла на ділянці 1 при локальному дискретному навантаженні силою 7 Н

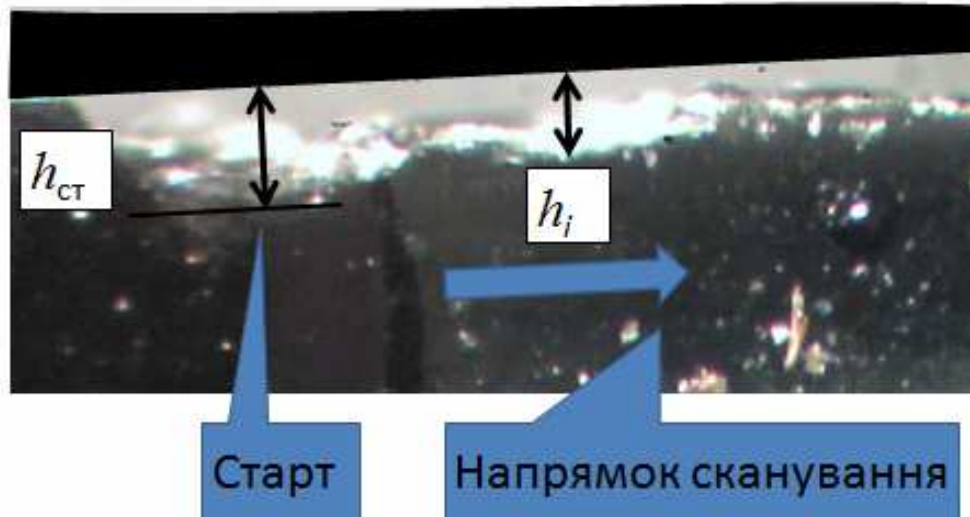
Номери сколів	Пошкоджуваність при дискретному навантаженні					
	Передня поверхня			Торцева поверхня		
	$h_{пер}, \text{мкм}$	$b_{пер}, \text{мкм}$	$b_{пер}/h_{пер}$	$h_{тор}, \text{мкм}$	$h_{тор1}, \text{мкм}$	$h_{тор}/h_{тор1}$
1	125	450	3,6	175	175	1,00
2	125	575	4,6	275	100	2,75
3	125	550	4,4	500	350	1,43
Середнє	125	525	4,2	317	208	1,73
Співвідношення $h_{пер}/h_{тор}$				Середнє	0,40	
				Мінімум	0,25	
				Максимум	0,71	
Опір локальному руйнуванню при дискретному навантаженні						
Передня поверхня			Торцева поверхня			
$F_{кnh}, \text{Н/мм}$		$F_{кnb}, \text{Н/мм}$	$F_{кnh}, \text{Н/мм}$			
1	56	15,5	40,0			
2	56	12,2	25,5			
3	56	12,7	14,0			
Середнє	56	13,3	22,0			
Мінімум	56	12,2	14,0			
Максимум	56	15,5	40,0			

На ділянці 1 довжиною 10 мм було зроблено три випробування. Довжина відколів на торцевій поверхні може у два і більше разів перевищувати довжину відколу на передній поверхні й досягти 0,8...1,2 мм. За таких умов відстань між точками навантаження кромки індентором має бути не менше 1,5...2 мм. Таким чином, кількість випробуваних частин краю не може бути більше 5...6. При середній довжині відколу на передній поверхні 0,5 мм доля відколотих частин краю не перевищує 25...30% від загальної довжини. Враховуючи, що джерело руйнування формується безпосередньо у центральній зоні площі контакту з максимальним рівнем контактних напружень, фактична довжина випробуваної частини краю є значно меншою і не перевищує 5...10%.

Спосіб безперервного сканування, запропонований у даній роботі, дозволяє достовірніше оцінити розподіл значень параметрів опору і пошкодження кромки, тому що за винятком стартової і кінцевої частин сканування обраної ділянки до 80...90 відсотків довжини обраної ділянки краю деталі підлягає послідовному випробуванню.

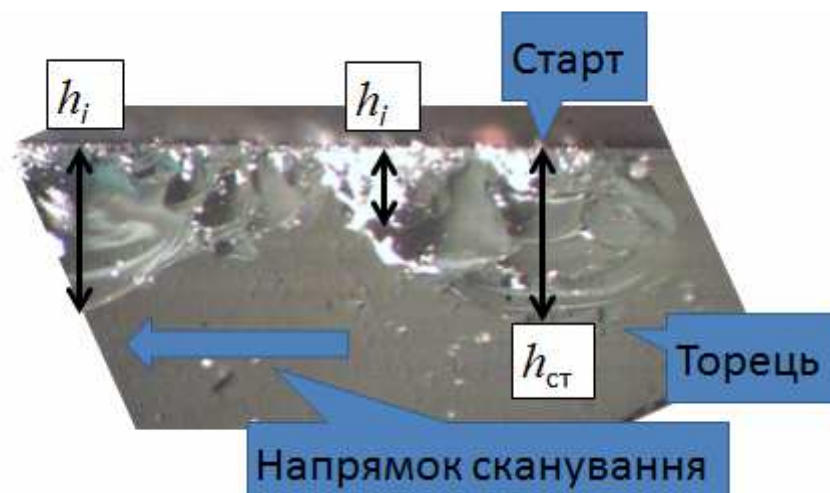
На рис.7,8 наведено результати сканування кромки скла при навантаженні на індентор  $P=3,7$  Н, яка на порядок менше за мінімальне навантаження на індентор, що спричиняє руйнування кромки твердого сплаву. На рис.7,8 зображено стартові відколи на передній та торцевій поверхні скла відповідно, що утворилися в результаті безперервного сканування по передній полірованій поверхні ділянки 2 (рис.4) при  $P=3,7$  Н.

Форма стартового відколу є несиметричною (рис.8). Його ліва частина за формулю чверті еліпса та розмірами аналогічна напівеліптичним відколам при дискретному індентуванні. Друга частина відколу (справа) визначається механізмами пошкодження при безперервному динамічному скануванні з глибиною відколу значно менше глибини стартового і становить 50...60% відсотків від глибини стартового як на передній, так і на торцевій поверхні.



**Рисунок 7.** Визначення параметрів стартового відколу на передній поверхні при безперервному скануванні кромки на ділянці 2 ( x32)

**Figure 7.** Estimation of starting chip parameters on the front surface under continuous edge scanning (area2, x32)



**Рисунок 8.** Визначення параметрів стартового відколу на торцевій поверхні при безперервному скануванні кромки на ділянці 2 ( x32)

**Figure 8.** Estimation of starting chip parameters on the end surface under continuous edge scanning (area2, x32)

Запропоновано також спосіб оцінювання глибини сколів по передній поверхні, який полягає в тому, що до торцевої площини притискається базовий вимірювальний елемент з гострою прямолінійною кромкою, який створює базову лінію для відліку глибини сколів по передній поверхні. Співвідношення глибини як стартового відколу на передній поверхні до глибини відколу на торцевій поверхні, так і відколів, що отримані при динамічному скануванні, становить у середньому близько  $h_{неп}/h_{мор}=0,4\dots0,6$ . Але воно може змінюватися у ширшому діапазоні.

Аналіз усієї сукупності відколів кромки по ділянці 2 показав значну неоднорідність характеру та ступеня пошкодження окремих частин просканованої кромки. Максимальний розмір пошкоджень передньої поверхні зафіксовано на частинах 4, 5, а торцева поверхня має найглибші відколи на частині 3. Частина 8 визначається незначними пошкодженнями торця. При цьому співвідношення  $h_{неп}/h_{мор}$

уздовж кромки досліджуваної ділянки (на всіх 8 частинах) варіюється від значень, більших за 1 для частини 8 до 0,1 для частини 3, тобто відрізняються на порядок. У таблиці 2 наведено деякі результати аналізу опору руйнуванню та пошкодженості гострої кромки пластини скла на ділянці 2 (довжина сканування 10 мм) при скануванні силою 7 Н.

**Таблиця 2**

Деякі результати аналізу опору руйнуванню та пошкодженості гострої кромки пластини скла на ділянці 2 (довжина сканування 10 мм) при скануванні силою 7 Н

	Передня поверхня			Торцева поверхня		
	$h_{пер}, \text{мкм}$	$F_{кр}, \text{Н/мм}$	$h_{пер}/h_{перСер}$	$h_{тор}, \text{мкм}$	$F_{кр}, \text{Н/мм}$	$h_{тор}/h_{торСер}$
Стартова частина відколу	225	31,1	2,80	475	14,7	1,04
Середня частина відколу	80	87,5	1,066	200	35,0	0,44
				475	14,7	1,04
				325	12,5	0,71
	75	93	1	375	18,7	0,82
				450	15,5	0,99
	70	100	0,94	875	8,0	1,90
				325	12,5	0,71
625	11,2	1,37				
Кінцева частина відколу	125	56	1,56	500	14	1,10
Середнє	75	93		456	16,0	
Мінімум	70	87		200	8,0	
Максимум	80	100		875	35	
Співвідношення $h_{пер}/h_{тор}$ при скануванні	Середнє		0,16			
	Мінімум		0,10			
	Максимум		0,40			

На передній поверхні найбільшу глибину – 225 мкм має стартовий відкол. Кінцевий відкол мав глибину 125 мкм. Ці відколи знаходяться в умовах, наближених до режиму дискретного навантаження, і мають бути співставимими з результатами табл.1. Співвідношення  $h_{пер}/h_{тор}$  при скануванні було 0,47 для стартового відколу і 0,25 – для кінцевого, що відповідає діапазону, вказаному в табл.2 для ділянки 1. Параметри опору руйнуванню  $F_{кр} = 31,1 \text{ Н/мм}$  та  $F_{кр} = 14,7 \text{ Н/мм}$  є меншими, ніж на ділянці 1. Унаслідок вказаних особливостей ці результати виділено жирним шрифтом і не враховувалися далі при аналізі результатів для обох поверхонь сканованої гострої кромки. Виділені відколи (без стартового і кінцевого відколів) відображали механічну поведінку практично всієї довжини просканованої ділянки. Їх середня глибина на передній поверхні була майже у два рази менша, ніж при дискретному навантаженні й становила 75 мкм. Подібно випробуванню по схемі дискретного навантаження, глибина відколів на передній поверхні мало відрізнялася від середнього значення. Причиною цього може бути вплив механізмів викришування та подрібнення кромки відколів при проходженні індентору, які призводять до зменшення концентрації контактного напруження та відповідно до його стабілізації при скануванні зі швидкістю 1...2 мм/с. При скануванні за таким режимом тривалість навантаження на кожній локальній частині ділянки 2 краю пластини була значно меншою. Тому процеси пошкодження кромки не встигали завершитися повністю, що призвело до вказаного зменшення ступеня пошкодження передньої поверхні. Крихкий характер руйнування за механізмом відколювання більш явно визначено на торцевій поверхні. Глибина відколів  $h_{тор}$  коливалася у ширшому діапазоні – від 200 до 875 мкм. Це становило 0,44...1,9 від середньої глибини торцевих

відколів  $h_{торпан}$  456 мкм, яка була майже у 1,5 раза вище, ніж при дискретному навантаженні на ділянці 1. Співвідношення глибини відколів на передній і торцевій поверхнях  $h_{пер}/h_{тор}$  зменшилося при скануванні у 2,5 раза і становило в середньому 0,16 (на ділянці 1 –  $h_{пер}/h_{тор} = 0,40$ ).

За рахунок зменшення пошкодження на передній поверхні середнє значення параметра опору руйнуванню  $F_{кп}$  гострої кромки підвищилося до 93 Н/мм (розкид результатів незначний 87...100 Н/мм). На торцевій поверхні за рахунок підвищення ступеня пошкодження опір руйнуванню  $F_{кп}$  зменшився на 30% і становив 16 Н/мм. Діапазон розкиду результатів 8...35 Н/мм (при дискретному навантаженні 14...40 Н/мм).

**Особливості механічної поведінки кромки твердосплавної різальної пластини при безперервному скануванні.** За розробленою методикою виконано експериментальне оцінювання характеру і ступеня пошкоджень та опору локальному руйнуванню твердосплавної різальної пластини з ВК8. Отримано комплекс результатів випробувань пластин у вихідному стані та з стовпчастим зносостійким  $PVD$  – покриттям  $TiAlN$  завтовшки 5мкм. Деякі з яких наведено в табл.3.

**Таблиця 3**

Деякі результати аналізу опору руйнуванню та пошкоженості різальної кромки багатогранної неперезагострювальної пластини зі сплаву ВК8

$P, Н$	Вихідний стан			З покриттям $TiAlN$		
	$h_{торпах}$ мкм	$h_{торпан}$ мкм	$F_{кп}$ Н/мм	$h_{торпах}$ мкм	$h_{торпан}$ мкм	$F_{кп}$ Н/мм
35,9	88	57	614	143	87	327
50,6	132	73,6	679	154	84	595
80	230	110	729	154	95	842

Показано, що в області 35,9.....50 Н нанесення покриття знижує опір різальної кромки руйнуванню при локальному навантаженні.

**Обговорення.** Проведено порівняння результатів, отриманих при скануванні кромки скла та твердого сплаву. Показано, що співвідношення середньої величини відколу по передній поверхні та середньої величини відколу по торцевій (задній) поверхні  $h_{пер}/h_{тор}$  після безперервного сканування тим же індентором для скла становить 0,4...0,6, а для твердого сплаву є більшим і складає 0,6...0,8. Це показує, що для твердого сплаву відкол формується під кутом до торцевої поверхні (поряд із механізмом відриву значна роль механізму зсуву), що притаманно квазікрихким матеріалам. Для скла розміри відколів при навантаженні  $P=3,7; 7 Н$  у 3,5...6,5 раза перевищують розміри відколів, що утворюються на задній поверхні твердосплавної пластини при навантаженні  $P=35,9; 50,6, 80 Н$ .

Порівнюючи параметр відношення навантаження до середньої глибини відколу по торцевій (задній) поверхні для скла та твердого сплаву, отримуємо, що величина цього параметра для скла при  $P=7 Н$  становить 18,7 Н/мм, в той час як для твердого сплаву у вихідному стані та з покриттям при  $P=35,9Н, F_{кп}=614 Н/мм$  та  $F_{кп}=327 Н/мм$  відповідно. Зі зростанням  $P$  до 50,6 Н, параметр  $F_{кп}$  зростає до 679 Н/мм для пластини без покриття та до 595 Н/мм для пластини з покриттям. Наявність стовпчастого покриття призводить до реалізації механізмів крихкого руйнування: збільшення відколів та зменшення параметра  $F_{кп}$  порівняно з пластинами без покриття, що особливо яскраво проявляється в області низьких значень навантаження. Таким чином, геометричний параметр  $h_{пер}/h_{тор}$ , який є співвідношенням середньої величини відколу по передній поверхні та середньої величини відколу по торцевій (задній) поверхні, й силовий параметр  $F_{кп}$ , що дорівнює відношенню навантаження до глибини відколу по торцевій поверхні, можна розглядати як такі, що характеризують міру крихкості матеріалу при локальному навантаженні.

Проведені експерименти показали, що при застосуванні запропонованої методики відколи гострої кромки скла виникають при навантаженнях значно менших ніж навантаження, необхідні для утворення відколу кромки при застосуванні індентора Роквела як при сколюванні, так і при дряпанні зі сколюванням. Результати показали, що запропонований режим сканування дозволяє детальніше оцінити параметри пошкоджуваності та опору руйнуванню гострої кромки деталей та їх розподілу по довжині дослідженої ділянки краю. За умов сканування кромки скла різниця між ступенем пошкодження, параметрами опору руйнуванню на передній і торцевій поверхнях збільшується. При цьому зменшується вклад механізмів подрібнення кромки індентором і збільшується роль механізму відколу при відриві.

Перевагою запропонованої методики є те, що характеристики механічної поведінки кромки скла отримано для навантажень на індентор, які є значно меншими, ніж мінімально припустимі за іншими відомими методиками. Це дозволяє отримати характеристики, які є локальними не тільки за характером навантаження, але й за розмірами досліджуваної зони, що дозволяє виявити особливості поведінки кромки, спричинені мікророзмірними дефектами поверхневого та приповерхневого шару. Внаслідок цього виявлено два механізми руйнування, що визначають характер пошкодження та опір руйнуванню кромки елемента зі скла та прилеглої до неї мікророзмірної області краю, а саме: сколювання з переважним впливом механізму відриву та викришування й роздрібнення фрагментів кромки з переважним впливом механізмів розсіяного руйнування, які спостерігаються на передній поверхні під індентором.

Методика безперервного сканування дозволяє виявити та визначити максимальні й мінімальні величини характеристик пошкоджуваності та опору руйнуванню кромки крихких та квазікрихких матеріалів на всій просканованій частині й отримати розподіл цих показників по довжині кромки. Отримано, що ступінь неоднорідності характеристик механічного стану кромки за умов сканування залежить від ступеня крихкості та дефектності досліджуваного матеріалу.

Отримані результати як безперервного, так і дискретного сканування дозволяють оцінити закономірності поведінки краю деталей з крихких та квазікрихких матеріалів при локальному навантаженні з урахуванням рівня та характеру дефектності.

**Висновки.** Розроблено технічний підхід та методику для оцінювання опору руйнуванню та пошкоджуваності крайових зон елементів конструкцій з крихких та квазікрихких матеріалів, який дозволяє уникнути недоліків, що виникають при застосуванні гострого індентора та отримати можливість визначити безперервні й дискретні характеристики опору самої кромки. На прикладі елементів з листового скла та твердого сплаву ВК8 отримано геометричні та силові параметри механічної поведінки кромки крихких та квазікрихких матеріалів. Комплекс характеристик, отриманих за запропонованим методом, може бути використаним для підвищення несівної здатності елементів із крихких та квазікрихких матеріалів за рахунок вдосконалення конструктивних рішень, технології оброблення кромки та модифікації поверхні матеріалів.

**Conclusions.** Technical approach and methodological basis for assessing fracture resistance and damageability of edge areas for structural elements made of brittle and semibrittle materials, which avoids drawbacks arising from the use of sharp indenter and enable to determine continuous and discrete characteristics of the edge resistance are developed. Geometrical and force parameters of the mechanical behavior of edge for brittle and semibrittle materials are obtained for glass elements and cemented carbide cutting tool. Complex of characteristics obtained by the proposed method can be used to improve the load carrying capacity of brittle and quasibrittle elements by improving design solutions, edge technology and surface modification of material

### Список використаної літератури

1. Chai, H. A universal relation for edge chipping from sharp contacts in brittle materials: A simple means of toughness evaluation [Text] / H. Chai, R.L. Brian // *Acta Materialia*, 2007. – 55. – P.2555–2561.
2. Allmond, E. Constant geometry edge flaking of Brittle materials [Text] / E. Allmond, N. McCormick // *Journal Hard Materials*, 1990. – 1, No.1. – P.25–51.
3. Scratch hardness and chipping of dental ceramics under different environments [Text] / L.A. Flanders, J.B. Quinn, O.C. Wilson et al. // *Dental materials*, 2003. – №19. – P.716–724.
4. Gogotsi, G.A. Criteria of ceramics fracture (edge chipping and fracture toughness tests // *Ceram. Int.*, 2012. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.017>.
5. Гогоци, Г.А. Трещиностойкость технического и оптического стекла: скалывание кромок образцов [Текст] / Г.А. Гогоци // *Проблемы прочности*, 2010. – №3. – С.57–65.
6. Хворостяный, В.В. Определение сопротивления разрушения стекла при царапании поверхности образца вплоть до скалывания его кромки (метод S +EF) [Текст] / В.В. Хворостяный // *Межд.научн.-техн. конф. «Прочность материалов и элементов конструкций»*. Тезисы докладов, 2010. – С.175–176.
7. Разрушение стекла при краевом скалывании [Текст] / Г.А. Гогоци, В.И. Галенко, С.П. Мудрик и др. // *Проблемы прочности*, 2007. – №6. – С.103–112.

*Отримано 24.01.2015*