

2. EN ISO 1288-5:2022. Glass in building. Determination of the bending strength of glass – Part 5: Coaxial double-ring test on flat specimens with small test surface areas, BSI, UK (2022).
3. Родичев Ю. М. Повышение точности измерения деформаций и перемещений стеклянных пластин при изгибе с использованием измерительной системы GT-12-M8 / Ю. М. Родичев, Е. Б. Сорока, А. В. Дроздов, В. В. Хворостяный, В. Е. Бодунов // Актуальные проблемы инженерной механики: тезисы докладов VII международной научно-практической конференции. – Одесса, 2020. – С. 296 – 300.
4. Витман Ф. Ф. О методе определения прочности листовых стекол / Ф. Ф. Витман, В. П. Пух // Заводская лаборатория. – 1963. – № 7. – С. 863 – 867.
5. Castori G. Fracture strength prediction of float glass: The coaxial double ring test method / G. Castori, E. Speranzini // Construction and Building Materials. – 2019. – 225. – P. 1064 – 1076.
6. Veer F. A. The strength of glass, effect of edge quality / F. A. Veer, J. Zuidema // Proceedings Glass processing days. Educational glass conference (2003, Tampere, Finland). – Tampere, 2003. – P. 106 – 109.
7. Müller-Braun S. Biaxially curved glass with large radii – determination of strength using the coaxial double ring test / S. Müller-Braun, J. Schneider // Glass Struct. Eng. – 2017. – 2. – P. 121 – 131.

Хворостяний В. В., Галенко В. Й., Христевич Т. О.
(ІПМіц імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ)
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАСШТАБНОГО ЕФЕКТУ НА ОПІР
РУЙНУВАННЮ СКЛА В УМОВАХ КРАЙОВОГО СКОЛЮВАННЯ
ЗРАЗКІВ КОНІЧНИМИ ІНДЕНТОРАМИ РІЗНОЇ ГОСТРОТИ
E-mail: plt2002@ukr.net

З огляду на те, що останніми роками відмічається стабільне зростання кількості опублікованих наукових праць, присвячених вивченню особливостей механічної поведінки сучасних крихких та квазікрихких матеріалів в умовах локального крайового навантаження з використанням різноманітних інденторів, є

всі підстави вважати відповідні експериментальні методи актуальними і вкрай затребуваними як у лабораторних наукових дослідженнях, так й у практичних застосуваннях на виробництві. Незважаючи на діючий міжнародний нормативний документ [1], що регламентує технічні вимоги реалізації експериментального методу, все ще не існує вичерпного розуміння щодо низки базових елементів випробувань. Зокрема це стосується виду робочого наконечника, екстремальних значень прикладених нормальних навантажень та обґрунтованого універсального діапазону параметру відстані руйнування. Метою наведеного дослідження було визначення впливу масштабного ефекту у крихких матеріалів типу силікатного скла в умовах їх крайового сколювання – у випробуваннях, які можна розглядати як специфічний різновид індентування, адже застосовані методики передбачають заглиблення навантаженого індентора поблизу кромки зразка до моменту її руйнування з утворенням крайового сколу. Розглянутим фактором (причиною) прояву масштабного ефекту в зазначених експериментальних умовах є геометричний параметр застосованого індентора за аналогією з випадком класичного мікроіндентування поверхні [2]. Зазначимо, що ISE-ефект при застосуванні конічного індентора пов'язаний з глибиною його заглиблення в матеріал, тоді як для сферичного індентора він залежить також від радіуса сфери [3].

Експериментальне дослідження виконано за допомогою EF методу [4], згідно з яким відбувалося локальне навантаження індентором кромки зразка до її руйнування з реєстрацією максимального зусилля P_f та наступне вимірювання величини крайового пошкодження (параметру відстані руйнування L). Характеристику опору крайовому сколюванню (опору руйнуванню кромки при сколюванні) F_R визначали розглядаючи n проведених випробувань відповідно до наступного виразу:

$$F_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{fi}}{L_i}. \quad (1)$$

Варіація масштабу контактної області при заглибленні індентора в матеріал при монотонному прикладенні зусилля досягалася за рахунок використання в експериментах алмазних конічних інденторів з кутом при вершині 120° та різними

радіусами заокруглення r їх вершин сферичної форми ($r = 11$ мкм, 100 мкм, 200 мкм, 400 мкм та 800 мкм). Конічний наконечник з радіусом $r = 200$ мкм – це стандартний індентор Роквелла, який є найбільш розповсюдженим у наукових роботах з цього напрямку та рекомендується для використання у стандарті [1]. Об'єктом дослідження були силікатні стекла: листове скло технічного призначення, виготовлене за флоат-технологією та оптичне скло легкий крон ЛК-5. Для отримання порівняльних даних були проаналізовані лише ті емпіричні результати, що відповідали визначеному в [5] діапазону відстані руйнування L в межах від 0,1 мм до 0,4 мм.

Детальний огляд руйнувань кромки скляних зразків дозволив виявити їх особливості, пов'язані з характером поширення руйнівних тріщин. Спостерігалася однозначна залежність виду крайового руйнування від розміру вершини застосованого конічного індентора. Для найбільш «гострого» наконечника цього дослідження ($r = 11$ мкм) переважним типом локального пошкодження кромки було утворення на бічних сторонах зразків шрамів сколів «нігтеподібного» виду (рис. 1, а, б). Вони представляють собою напівкруглий слід виходу руйнівної тріщини. У дослідях із більшим радіусом заокруглення вершини індентора ($r = 100$ мкм) співвідношення шрамів сколів «нігтеподібного» та квазіконічного виду практично прямує до паритету. Використовуючи для сколювання кромки скла індентор Роквелла ($r = 200$ мкм) одержуємо вже більшою мірою квазіконічні шрами (рис. 1, в, г), а кількість «нігтеподібних» зменшується як для флоат-скла, так й для легкого крона ЛК-5. Квазіконічний вигляд сколювання скла формується у випадку виходу на бокову поверхню зразка конічної тріщини, видозміненої внаслідок крайового ефекту. Експерименти з найбільш «тупими» конічними наконечниками зі сферичними вершинами радіусами $r = 400$ та 800 мкм змінюють картину локальних руйнувань кромки до утворення практично лише шрамів сколів квазіконічного виду (рис. 1, г, д). В контексті проведеного аналізу руйнувань слід зазначити, що більша варіативність шрамів сколів спостерігалася для технічного скла на відміну від більш структурно однорідного оптичного скла. Підсумовуючи вище зазначене можемо

стверджувати, що радіус вершини індентора Роквелла має критичне значення відносно характеру руйнування скла в даних умовах випробувань.

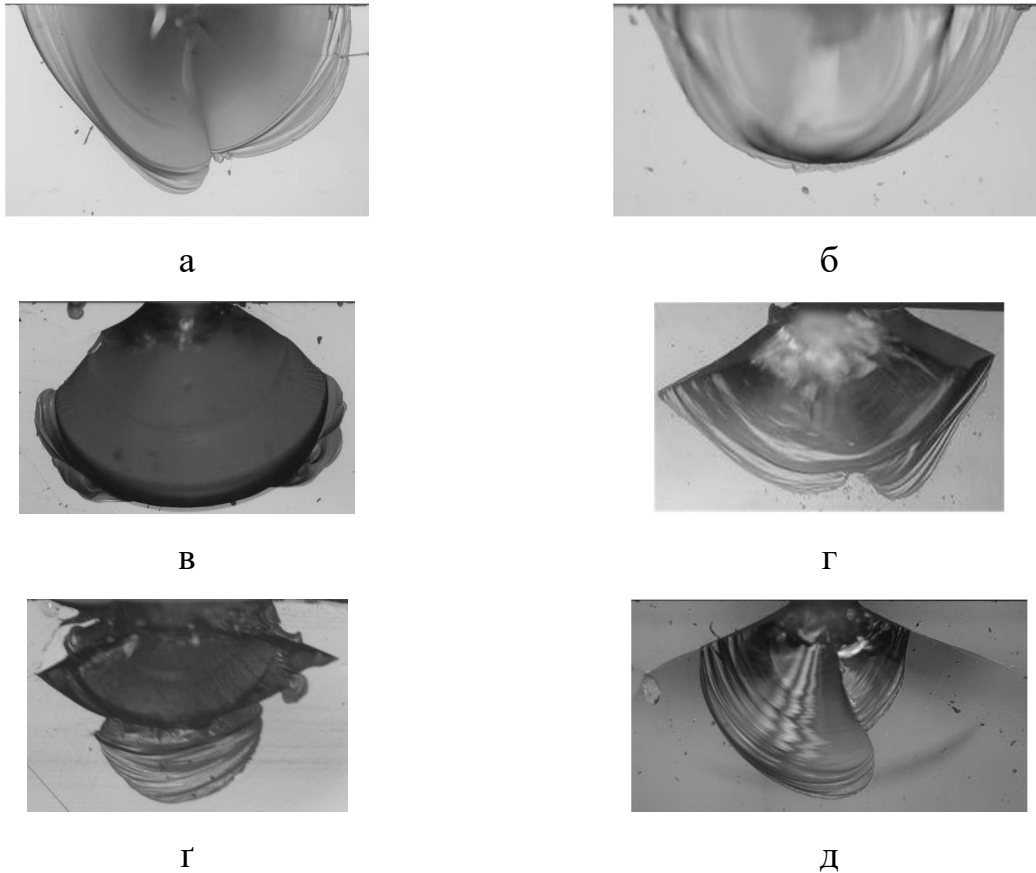


Рис. 1. Характерні руйнування зразків флоат-скла (а, в, г) та оптичного скла ЛК-5 (б, г, д): а, б – $r = 11$ мкм; в, г – $r = 200$ мкм; г, д – $r = 800$ мкм: «нігтеподібні» (а, б) та «квазіконічні» (в – д) форми сколів

Обчислені значення опору руйнуванню F_{Rr} для кожного різновиду застосованого індентора з радіусом вершини r наведено в табл. 1. Індекс « r » при величині F_R вказує на відповідний розмір сферичної вершини індентора. Одержані результати демонструють прояв зворотного масштабного ефекту для характеристики опору руйнуванню стекол в умовах їх крайового сколювання, тобто величина F_R збільшується при збільшенні розглянутого геометричного фактору, яким є саме радіус вершини індентора.

Таблиця 1 – Опір руйнуванню скла у випробуваннях на крайове сколювання зразків конічними інденторами з різними радіусами їх вершин

Скло	Опір руйнуванню F_{Rr} , Н/мм				
	$r = 11$ мкм	$r = 100$ мкм	$r = 200$ мкм	$r = 400$ мкм	$r = 800$ мкм
Флоат-скло	117 ± 37 (20)	143 ± 18 (22)	233 ± 63 (22)	246 ± 109 (17)	237 ± 104 (23)
Оптичне ЛК-5	155 ± 66 (10)	137 ± 19 (9)	214 ± 44 (45)	273 ± 64 (18)	332 ± 81 (12)

Примітка. В дужках вказана кількість випробувань.

Зважаючи на той факт, що стандартний індентор Роквелла вважається основним робочим наконечником досліджень, важливо оцінити у порівнянні з ним зміну величини опору руйнуванню скла при використанні інших інденторів. Така відмінність між значеннями F_{Rr} для відносно «гострих» ($r = 11$ та 100 мкм) та «тупих» ($r = 400$ та 800 мкм) інденторів за умови прийняття величини F_{R200} за базове, добре простежується на діаграмі, що зображена на рис. 2. У випадку, коли радіус r є меншим у 2...18 разів, ніж у індентора Роквелла, опір руйнуванню зменшується майже у 2 рази. На противагу цьому, коли радіус r є більшим у 2...4 рази, величина F_R збільшується незначним чином для флоат-скла або практично у 1,5 рази для оптичного скла ЛК-5.

Наведені експериментальні результати та їх критичний аналіз мають наукову та практичну цінність і є одним із кроків, необхідних для упорядкування методичних аспектів випробувань на крайове сколювання, можливості обґрунтованого вибору типу індентора, визначення ступеню впливу такого визначального чинника як масштабний ефект та правомірність використання критерію опору руйнування при локальних навантаженнях інденторами кромки крихких матеріалів, зокрема різних видів силікатного скла.

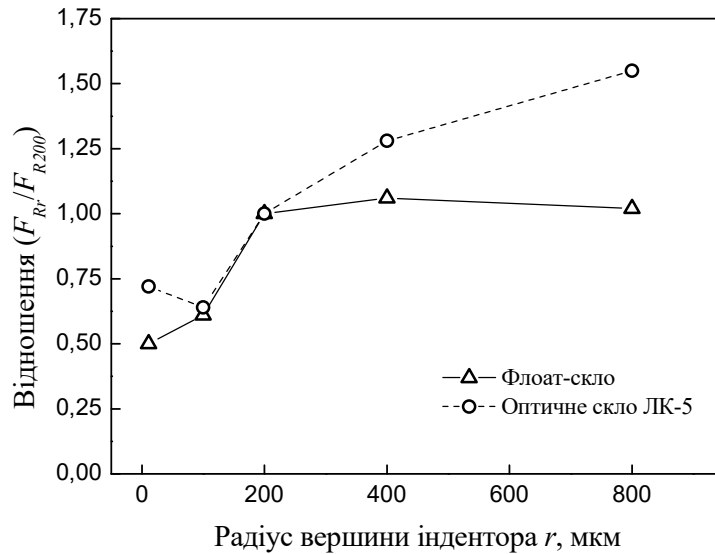


Рис. 2. Діаграма залежності відношення величин опору руйнуванню (F_{Rr}/F_{R200}) від радіуса вершини конічного індентора (r), мм

Література

1. CEN/TS 834-9:2010. Advanced Technical Ceramics – Mechanical Properties of Monolithic Ceramics at Room Temperature, Part 9: Method of Test for Edge-Chip Resistance, CEN, Current from 2010-08-15.
2. Xue Z. The Influence of Indenter Tip Radius on the Micro-Indentation Hardness / Z. Xue, Y. Huang, K. C. Hwang, M. Li // Journal of Engineering Materials and Technology. – 2002. – 124. – P. 371 – 379.
3. Li X. Study on Size Effect in Indentation Test / X. Li, W. Zhang, Z. Dong, Z. Wang, D. Li, and J. Zhang // Coatings. – 2022. – 12. – 1962.
4. Гогоци Г. А. Разрушение стекла при краевом скалывании / Г. А. Гогоци, В. И. Галенко, С. П. Мудрик, Б. И. Озерский, В. В. Хворостяный, Т. А. Христович // Проблемы прочности. – 2007. – № 6. – С. 103 – 112.
5. Gogotsi G. A. Fracture resistance estimation of elastic ceramics in edge flaking: EF baseline / G. A. Gogotsi, V. I. Galenko, S. P. Mudrik, B. I. Ozersky, V. V. Khvorostyany, T. A. Khristevich // Journal of the European Ceramic Society. – 2010. – 30. – P. 1223 – 1228.