

Застосування методу SEVNB для визначення тріщиностійкості скла

В.В. Хворостяний, В.С. Бодунов, І.Р. Качинська, Н.О. Хворостяна

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

Проблематика. Задача достовірного визначення тріщиностійкості скла, незважаючи на розроблені методики, що враховують особливості зародження і розвитку тріщин у цьому класі матеріалів при руйнуванні та запропоновані відповідні розрахункові рівняння, залишається актуальною і такою, що потребує уваги при створенні відповідальних елементів конструкцій.

Мета досліджень. Вирішення питання можливості визначення тріщиностійкості скла різного хімічного складу методом SEVNB, перевірка достовірності одержаних результатів шляхом їх порівняння з даними із літературних джерел.

Методика реалізації. Метод SEVNB полягав у тому, що стандартний зразок з нанесеним концентратором напружень у вигляді V- подібного надрізу випробовувався при трьох або чотирьох-точковому згині.

Результати дослідження. Значення критичного коефіцієнту інтенсивності напружень досліджуваного скла були визначені в межах 0,5...1,0 МПа·м^{1/2}. Предметом досліджень було силікатне флоат-скло технічного призначення (soda-lime glass), кварцове (fused silica glass) та оптичне (heavy flint SF5) скло.

Висновки. Одержані значення тріщиностійкості скла узгоджувалися з відомими літературними даними його визначення згідно з поширеним на практиці методом IF. Показано, що метод SEVNB може застосовуватися для визначення тріщиностійкості скла за умови виконання усіх вимог до проведення випробувань, що наведені у стандарті BS EN ISO 23146:2016. Метод дослідження дозволяє одержувати результати із задовільною точністю і може вважатися доступним і відносно простим для його використання у науково-пошуковій та виробничій сферах діяльності.

Ключові слова: тріщиностійкість, скло, метод SEVNB (Single-edge V-notch beam), метод IF (Indentation Fracture).

Вступ

Силікатне скло як конструкційний та функціональний матеріал завдяки своїм унікальним фізико-механічним властивостям знаходить широке застосування у різноманітних галузях промисловості, зокрема в машинобудуванні, електроніці, будівництві, при створенні деталей машин та приладів авіакосмічної, військової та медичної техніки. Скло є лінійно пружним малодеформівним матеріалом, характеризується високою твердістю та низьким у порівнянні з металами опором зародженню та розповсюдженню тріщин. Притаманними рисами виробів зі скла є їх крихкість та схильність до катастрофічного руйнування, висока чутливість до концентрації напружень, що в умовах контактної взаємодії з твердими тілами може призводити до непередбачуваного зниження несівної здатності.

Для забезпечення працездатності конструкційних елементів зі скла необхідне виконання усіх технічних вимог при їх проектуванні, виготовленні та безпосередньо в процесі експлуатації. Це потребує комплексного вивчення закономірностей пошкоджуваності та руйнування матеріалів, знаходження характеристик їх міцності і тріщиностійкості. Міцність твердого тіла з тріщинами визначається за допомогою критичного коефіцієнту інтенсивності напружень, що описує крихке руйнування матеріалів і визначає розподіли напружень та переміщень в околі вершини тріщини. Задача достовірного визначення тріщиностійкості скла, незважаючи на розроблені методики, що враховують особливості зародження і розвитку тріщин у цьому класі матеріалів при руйнуванні та запропоновані відповідні розрахункові рівняння, залишається актуальною і такою, що потребує уваги при створенні відповідальних елементів конструкцій. Метою досліджень, результати яких наведено у цій роботі, було вирішення питання щодо можливості визначення тріщиностійкості скла різного хімічного складу методом SEVNB, розробленого для сучасної технічної кераміки та верифікація достовірності одержаних результатів шляхом їх порівняння з відповідними даними із літературних джерел.

Методика досліджень

В експериментальних методах визначення тріщиностійкості керамічних матеріалів, що базуються на підходах лінійної механіки руйнування, розглядають розповсюдження тріщини

в твердому ізотропному тілі за умови, що пластичні деформації допускаються лише поблизу тріщини, що розвивається [1]. У випробуваннях при трьох або чотирьохточковому згині стандартного зразка з деяким нормованим концентратором напружень визначають величину критичного навантаження, коли починається нестабільне зростання тріщини за рахунок запасу пружної енергії. Для методу SEVNB такий концентратор напружень на робочій частині зразка реалізується у вигляді V-подібного надрізу на стадії підготовки до експерименту. Створюється надріз у два етапи: спочатку відбувається нанесення пропилю алмазним диском, а потім при його фінішній обробці виконується V-подібний надріз за допомогою гострого леза та алмазних паст з розміром зерна до 1...3 мкм. Таким чином досягається одержання концентратора напружень у вершині надрізу, необхідного для утворення і зростання магістральної тріщини при випробуваннях зразка на згин. Було досліджено, що при малих значеннях радіусу заокруглення цього вирізу (близько 10...20 мкм) значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень наближені до результатів визначень K_{Ic} на зразках з гострою тріщиною відповідно до методу SEPB [2]. Співставність результатів пояснювалася тим, що особливість поля напружень в околі вершини вирізу близька до випадку попередньо вирошеної тріщини.

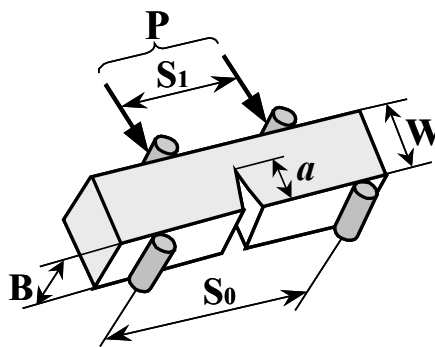


Рис. 1. Схематичне зображення підготовленого зразка для випробувань методом SEVNB з визначення тріщиностійкості матеріалу (S_0 , S_1 – відстань між опорними і навантажувальними роликів відповідно)

Визначення тріщиностійкості скла за методом SEVNB виконували на підготовлених до випробувань стандартних зразках відповідно до вимог стандарту (рис. 1) [3]. Предметом досліджень було силікатне флоат скло технічного призначення (soda-lime glass), кварцове (fused silica glass) та оптичне (heavy flint SF5) скло. Експерименти здійснювали на універсальній випробувальній установці з використанням автономного блоку CeramTest з відповідними навантажувальними опорами в лабораторних умовах при кімнатній температурі. Швидкість переміщення траверси під час прикладення зусилля (з реєстрацією його максимального значення P , що відповідало руйнуванню зразка) була постійною і становила 0,5 мм/хв. Характерні розміри зразка (ширина B , висота W та довжина L) вимірювали за допомогою мікрометра, а ширину s та глибину a V-подібного надрізу – на оптичному бінокулярному мікроскопі Olympus 51MX із збільшенням $\times 50$, $\times 100$ та $\times 500$, а також використовуючи комп'ютерну програму QuickPHOTO Micro 2.3, що дозволило підвищити точність вимірювань до 1 мкм. В стандарті регламентується підготувати не менше семи зразків при їх пакетному склеюванні на стадії нанесення надрізу, з яких п'ять використовують для розрахунку тріщиностійкості.

Позитивною ознакою методу SEVNB є зменшення розсіювання результатів випробувань. Недоліки полягають в трудомісткості отримання та контролю прийнятної “гостроти” надрізу для деяких матеріалів. У зв'язку з цим у стандарті [3] вказувалось, що метод може бути не придатний для дуже в'язких, а також для м'яких керамік і гранично крихких матеріалів, для яких гостра тріщина не формується у вершині надрізу. Саме одержання V-подібного надрізу належної якості для низки крихких матеріалів таких, наприклад, як скло є ключовим фактором можливості застосування даного експериментального методу для визначення тріщиностійкості матеріалу.

Результати та їх обговорення

Значення критичного коефіцієнту інтенсивності напружень досліджуваного скла були визначені в межах $0,5 \dots 1,0 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, що також було відображено у результатах попередніх наукових публікацій [4–7]. При цьому важливий аспект роботи полягав у перевірці достовірності даних шляхом їх порівняння з відомими літературними визначеннями тріщиностійкості скла. Така верифікація результатів проводилась з розглядом значень K_{Ic} скла, отриманих методом ІФ (Indentation Fracture), який є найбільш поширеним щодо практичного використання як в промисловості, так і в лабораторних умовах, а також є стандартизованим експериментальним методом [8]. Згідно з методом ІФ виконується інденування індентором Вікерса полірованої поверхні зразка матеріалу, що обумовлює утворення мікротріщин по кутах відбитку. Визначення форми та розмірів цих тріщин дозволяє отримувати оцінки опору матеріалу руйнуванню на етапах їх зародження та стійкого зростання. Теоретичні засади, фрактографічний аналіз особливостей руйнування матеріалів при інденуванні, переваги, недоліки та удосконалення методу, розробка і модифікація розрахункових формул розглянуті у багатьох публікаціях, зокрема в роботах [9–12]. Для оптичного скла ТФ-2 з літературних джерел були взяті оцінки тріщиностійкості, отримані за даними твердості при шліфуванні скла (lapping hardness), які зазвичай вказуються виробниками матеріалу. Характеристика твердості при шліфуванні визначається як об'єм матеріалу, що видаляється при заданому наборі умов абразивної обробки і є функцією механічних властивостей скла, включаючи модуль пружності, твердість і тріщиностійкість [13].

Слід відзначити, що виконане порівняння значень тріщиностійкості двома методами можна вважати задовільним, яке демонструє прийнятність методик досліджень для можливості їх практичного застосування (табл. 1). Наприклад значення K_{Ic} для технічного скла, отримане різними стандартними методами випробувань становить близько $0,7 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, що ідеально узгоджується з результатами наших досліджень. В роботі [14] при використанні методу SCF та у [15] методом SEPB у повітряному середовищі для силікатного технічного скла значення критичного коефіцієнту інтенсивності напружень визначено $0,71 \pm 0,02 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Для кварцового скла величина тріщиностійкості методами SCF та SEPB становить $0,75 \pm 0,03 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ та $0,78 \pm 0,06 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ відповідно [14]. Однак необхідно враховувати певні обмеження, що накладаються на методи випробувань, а точність, відтворюваність та достовірність одержуваних ними даних залежить від різних факторів. Вкрай важливим є ретельно підготувати зразок: контролювати форму та розміри нанесеного концентратора напружень, відбракувати випадки утворення неякісних надрізів та виконати точне вимірювання його довжини.

Таблиця 1

Тріщиностійкість досліджуваного скла

Скло	Індекс	Тріщиностійкість K_{Ic} , $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$			
		Дані наших досліджень (SEVNB метод)	Дані з літературних джерел		
Технічне (soda-lime glass)	Техн.-1	$0,66 \pm 0,06$ [4, 5]	0,67 [16]	0,70 [19]	0,68–0,75 [17]
	Техн.-2	$0,69 \pm 0,06$ [4, 5]			
Кварцове (fused silica glass)	КІ	$0,77 \pm 0,04$ [4, 5]	0,73–0,80 [17]	0,79 [20]	0,74 [21]
	КВ	$0,83 \pm 0,02$ [4, 5]			
	Кв. техн.	$0,80 \pm 0,02$ [4, 5]			
Тяжкий флінт ТФ2 (heavy flint SF5)	ТФ-2	$0,50 \pm 0,01$ [6, 7]	0,57 [18]	0,57 [21]	

Висновки

У дослідженні наведені результати практичної реалізації експериментального методу визначення тріщиностійкості SEVNB на зразках скла різного складу. Виконано порівняння одержаних значень критичного коефіцієнта інтенсивності напружень з даними із літературних джерел, що демонструє їх задовільну узгодженість. Акцентовано увагу на тому, що при використанні SEVNB методу для скла необхідна ретельна підготовка зразків до випробувань, а також забезпечення виконання методичних процедур, вказаних у нормативних документах. Показано, що розглянутий метод досліджень дозволяє одержувати достовірні результати і може застосовуватися у науково-пошуковій та виробничій сферах діяльності.

Список літератури

1. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
2. Kubler J. Fracture toughness of ceramics using the SEVNB method: preliminary results / J. Kubler // *Cer. Eng. Sci. Proc.* – 1997. – 18. – P. 155 – 162.
3. ISO 23146, “Fine Ceramics (Advanced Ceramics, Advanced Technical Ceramics) – Test Method for Fracture Toughness of Monolithic Ceramics – Single-edge V-notch Beam (SEVNB) Method,” International Organization for Standards, Geneva, 2008.
4. Гогоци Г. А. Разрушение стекла при краевом скалывании / Г. А. Гогоци, В. И. Галенко, С. П. Мудрик и др. // *Пробл. прочности.* – 2007. – № 6. – С. 103 – 112.
5. Хворостяный В. В. Механическое поведение керамики и стекла при локальных разрушениях кромок образцов индентором Роквелла / В. В. Хворостяный // *Пробл. прочности.* – 2014. – № 3. – С. 106 – 115.
6. Хворостяный В. В. Сопротивление разрушению стекла при локальном нагружении индентором Роквелла вблизи кромки образца / В. В. Хворостяный // *Сб. матер. науч. чтений им. чл.-корр. РАН И. А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов» (Москва, 4 – 5 сентября 2014 г.).* – Москва, 2014. – С. 316 – 318.
7. Gogotsi G. A. Criteria of ceramics fracture (edge chipping and fracture toughness tests) / G. A. Gogotsi // *Ceram. Int.* – 2013. – 39. – P. 3293 – 3300.
8. Testing methods for fracture toughness of fine ceramics at room temperature. JSA-JIS R 1607. – [Current from 2015-03-20]. – Japanese Standards Association, Tokyo, 2015. – 16 p. – (Japanese Industrial Standard).
9. Evans A. G. Fracture toughness determinations by indentation / A. G. Evans, E. A. Charles // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1976. – 59. – P. 371 – 372.
10. Anstis G. R. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I. Direct crack measurements / G. R. Anstis, P. Chantikul, B. R. Lawn, D. B. Marshall // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1981. – 64. pp. 533–538.
11. Whittle B. R. Morphology of Vickers indent flaws in soda-lime glass / B. R. Whittle, R. J. Hand // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2001. – 84. – P. 2361 – 2365.
12. Cook R. F. A modified indentation toughness technique / R. F. Cook, B. R. Lawn // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1983. – 66. – P. 200 – 201.
13. Lambropoulos J. C. Loose abrasive lapping hardness of optical glasses and its interpretation / J. C. Lambropoulos, S. Xu, T. Fang // *Applied Optics.* – 1997. – 36. – P. 1501 – 1516.
14. Quinn G. D. Fracture toughness of glasses as measured by the SCF and SEP method / G. D. Quinn, J. J. Swaab // *Journal of the European Ceramic Society.* – 2017. – 37. – P. 4243 – 4257.
15. Salem J. A. Back-face strain for monitoring stable crack extension in precracked flexure specimen / J. A. Salem, L. J. Ghosn // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2010. – 93. – P. 2804 – 2813.
16. Rhee Young-Woo Brittle fracture versus quasi plasticity in ceramics: a simple predictive index / Young-Woo Rhee, Hae-Won Kim, Yan Deng, B. R. Lawn // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2001. – 84 [3]. – P. 561 – 565.
17. Morris D. J. In situ cube-corner indentation of soda-lime glass and fused silica / D. J. Morris, R. F. Cook // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2004. – 87. – P. 1494 – 1501.
18. Lambropoulos J. C. Surface microroughness of optical glasses under deterministic microgrinding / J. C. Lambropoulos, T. Fang, P. D. Funkenbusch, S. D. Jacobs, M. J. Cumbo, D. Golini // *Applied Optics.* – 1996. – 35. – P. 4448 – 4462.
19. Petit F. Multiple scratch tests and surface-related fatigue properties of monolithic ceramics and soda lime glass / F. Petit, C. Ott, F. Cambier // *Journal of the European Ceramic Society.* – 2009. – 29. – P. 1299 – 1307.
20. Arora A. Indentation deformation/fracture of normal and anomalous glasses / A. Arora, D. B. Marshall, B. R. Lawn, M. V. Swain // *J. Non-Cryst. Sol.* – 1979. – 31. – P. 415 – 428.
21. Doyle K. B. Design strength of optical glass / K. B. Doyle, M. A. Kahan // *Proceeding of SPIE.* – SPIE, Bellingham, WA, 2003. – 5176. – P. 14–25.

Regarding the possibility of using the SEVNB method to determine the fracture resistance of glass

V.V. Khvorostyani, V.E. Bodunov, I.R. Kachinska, N.O. Khvorostiana

Background. Today, methods have been developed that take into account the of the feature initiation and development of cracks in the material during fracture, and the corresponding calculation equations have been proposed. However, the problem of reliably determining the fracture resistance of glass is relevant and requires attention when creating responsible elements of constructions.

Objective. Solving the problem of the possibility of determining the fracture resistance of glass of different chemical composition by the SEVNB method, checking the reliability of the obtained results by comparing them with data from literary sources.

Methods. The SEVNB method consisted in testing of the standard sample with an applied stress concentrator in the form of a V-notch under three or four-point bending.

Results. The values of the critical stress intensity factor of the studied glasses were determined within $0.5...1.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. The subject of research was silicate float glass for technical purposes (soda-lime glass), quartz (fused silica glass) and optical (heavy flint SF5) glass.

Conclusions. The obtained values of the fracture resistance of the glasses were conformed with the known literary data of its determination according to the IF method common in practice. It has been shown that the SEVNB method can be used to determine the fracture resistance of glasses provided that all the testing requirements specified in BS EN ISO 23146:2016 are met. The research method allows obtaining results with tolerable accuracy and can be considered open and relatively simple for its using in scientific research and production spheres.

Keywords: fracture resistance, glass, method SEVNB (Single-edge V-notch beam), method IF (Indentation Fracture).