

Хворостяний В. В., Бодунов В. Є., Долгов М. А., Цисар М. О.

(ІПМіц імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТОВЩИНИ ЗРАЗКА ЯК ОДНОВИМІРНОГО
ФАКТОРА МАСШТАБНОГО ЕФЕКТУ НА ГРАНИЦЮ МІЦНОСТІ
ФЛОАТ-СКЛА**

E-mail: plt2002@ukr.net

На сьогодні листове скло, що виготовлене за флоат технологією, може розглядатися свого роду певним «базовим» елементом, і як конструкційний матеріал з особливими властивостями, знаходить широке застосування у численних галузях промисловості у різних станах постачання від виробника, а саме у вихідному стані без або з мінімальною обробкою, після операцій механічної обробки (шліфування, полірування, нанесення фасок, торцювання), з поверхневим зміцненням за рахунок хімічного травлення, термічного загартування, іонного обміну, нанесення захисних чи функціональних покриттів чи з комбінацією зазначених модифікацій поверхонь. Незважаючи на успіхи у покращенні показників, що характеризують якість готової продукції, завдяки впровадженню новітніх технологій на етапах виготовлення та обробки скла, науково-практичні задачі достовірного визначення його пошкоджуваності, міцності та опору руйнуванню в складних умовах експлуатаційних навантажень все ще залишаються актуальними. Серед чинників, що обмежують ресурс або контролюють робоздатність конструкцій зі скла, важливе місце займає так званий масштабний ефект. Суть цього фізичного явища полягає у зміні властивостей тіла (зокрема фізико-механічних) у зв'язку зі зміною його розмірів, що відображає порушення встановлених законів подібності внутрішніх сил для пружних тіл, які перебувають в умовах зовнішніх впливів [1].

Простою категорією прояву масштабного ефекту є одновимірний її різновид – лінійний розмір досліджуваної пластини яким може бути товщина, довжина чи ширина. Мета наведеної роботи полягала у вивченні впливу на характеристику міцності флоат-скла товщини зразка у вигляді плоскої квадратної пластини без її додаткового оброблення.

Експериментальне дослідження виконано на підготовлених зразках розмірами $100 \text{ мм} \times 100 \text{ мм}$ з варіацією товщини від 2 до 6 мм, вирізаних вручну з великогабаритної пластини скла за допомогою алмазного різачка. Зразки випробовували в умовах осесиметричного згину з використанням подвійного співвісного кільця відповідно до основних положень стандарту EN ISO 1288-5:2022 [2]. Обсяг вибірок зразків кожного номіналу товщини складав 8...11 одиниць. Цей метод випробувань у порівнянні з поперечним згином зразків має важливу і принципову відмінність, бо під час визначення величини границі міцності скла стан кромки з їм притаманною дефектністю не чинить впливу на одержуваний результат. При дотриманні встановлених співвідношень між товщиною зразка, довжиною його сторони та розмірами коаксіальних випробувальних кілець у досліді в робочій зоні зразка, що обмежена навантажувальним кільцем, забезпечується однорідний двовісний напружений стан для розвитку усіх наявних мікротріщин та інших поверхневих дефектів незалежно від їх напрямку та орієнтації відносно осей зразка. Такий спосіб навантаження створює умови за якими крайові напруження значно менші, ніж ті, що виникають в центральній зоні розтягу, і не можуть призводити до руйнування. Інакше результати експерименту слід відбраковувати та не враховувати у наступному аналізі. Загалом застосований метод випробувань дозволяє отримувати значення відносної міцності скла, яку слід розглядати головним чином для порівняльної оцінки міцності плоского скла при згині. Метод знайшов розповсюдження при здійсненні заходів з виробничого контролю міцності скла та виробів з нього, що використовуються у відповідальних елементах скління авіаційної та космічної техніки.

Власне експерименти виконували на модернізованій гідравлічній установці ZD-4 (Німеччина), що призначена для механічних випробувань крихких матеріалів, з використанням універсальної вимірювальної системи GT-12-M18 та відповідного програмного забезпечення GlassBend [3]. Радіуси опорного a та навантажувального r_0 кілець становили 16 та 8 мм відповідно. Швидкість навантаження задавалася такою, щоб під час дослідження напруження в центральній частині зразка збільшувалося зі швидкістю 2...4 Н/(мм²·с) до моменту його руйнування. Лабораторні умови

дослідження характеризувалися підтриманням постійної температур $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відносної вологості повітря в межах 40...60 %.

Реалізація методу випробувань скла при осесиметричному згині передбачала розміщення плоского зразку квадратної форми на опорне кільце, а за допомогою співвісно розташованого над ним навантажувального кільцевого пуансону відбувалося прикладення зусилля до досягнення критичного значення, що відповідало руйнуванню. Границя міцності скла за таких експериментальних умов обчислювалась за наступною формулою [4]:

$$\sigma = \frac{3P}{2\pi \cdot h^2} \left[(1 - \mu) \frac{a^2 - r_0^2}{2a^2} \cdot \frac{a^2}{b^2} + (1 + \mu) \ln \left(\frac{a}{r_0} \right) \right], \quad (1)$$

де P – руйнівне навантаження, Н;

h – товщина зразка, мм;

μ – коефіцієнт Пуассона;

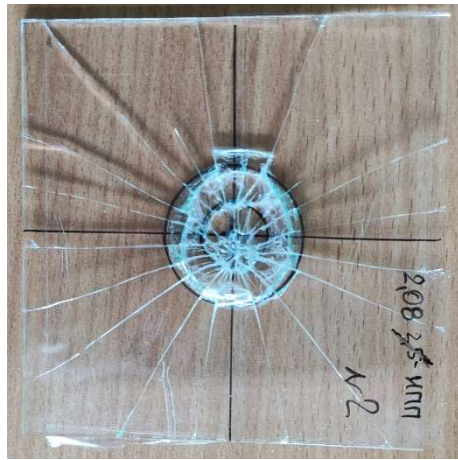
a – радіус опорного кільця, мм;

r_0 – радіус навантажувального кільця, мм;

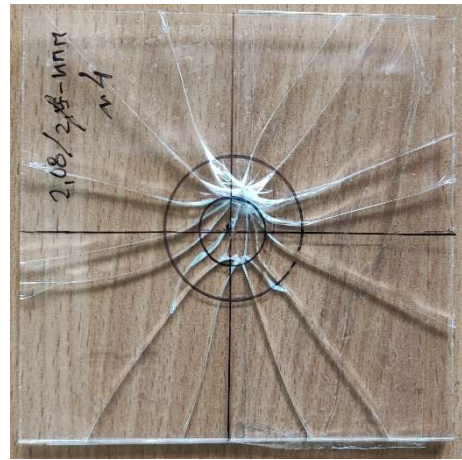
b – радіус круга, який відповідає характеристичному розміру квадратної пластини, мм.

Всі випробувані зразки скла ретельно оглядали для точного визначення місця положення небезпечного поверхневого дефекту з якого починалося руйнування. Завдяки попередньо нанесеній на зразок клейкій стрічці, утворені під час крихкого руйнування фрагменти скла утримувалися разом, що давало можливість провести аналіз зламів. У прийнятних результатах випробувань зародження руйнівної тріщини відбувалося в межах області, обмеженої навантажувальним кільцем (рис. 1, а, в – д). Руйнування зразків флоат-скла в умовах осесиметричного згину розпочиналося з ініціації початкової тріщини, потім внаслідок деформування поблизу навантажувального кільця та виникнення локальної концентрації напружень утворювалась кільцеподібна тріщина з наступним поширенням радіальних тріщин через динамічні ефекти. Чітко спостерігалася закономірність прямого взаємозв'язку між рівнем напруження в момент руйнування скляної пластини та щільністю розгалужених тріщин і ступенем фрагментації скла (можна

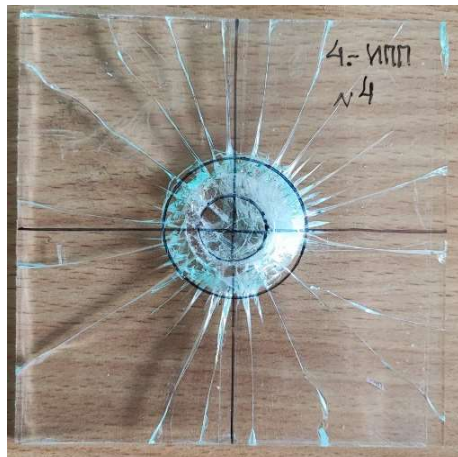
порівняти картини руйнування скла, наведені на рис. 1, в для $\sigma = 193,5$ МПа та рис. 1, г для $\sigma = 79,4$ МПа).



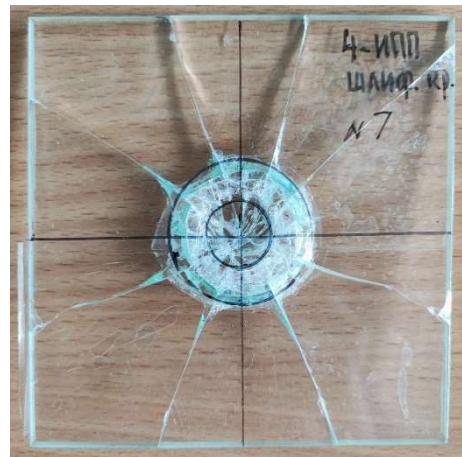
а



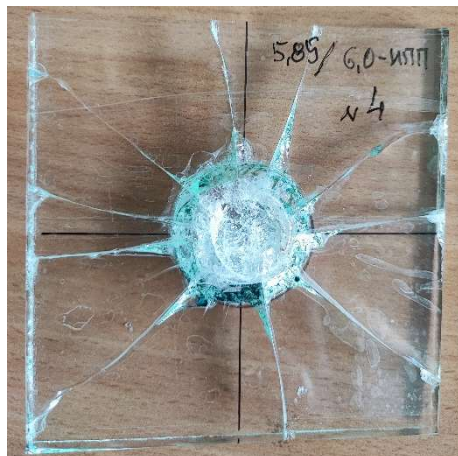
б



в



г



д



е

Рис. 1. Фотографії руйнувань в умовах осесиметричного згину зразків флоат-скла різної товщини: а, б – 2 мм; в, г – 4 мм; д, е – 6 мм

Випадки зруйнованих скляних пластин, для яких осередок початкової тріщини був між випробувальними кільцями (тобто поза межами навантажувальної області) не приймалися до розгляду (рис. 1, б). Кількість таким чином відкинутих результатів не перевищувала 20 %, що добре узгоджувалося з аналогічними даними, наведеними в [5].

За результатами дослідження була побудована діаграма залежності границі міцності флоат-скла від товщини зразка (рис. 2), що демонструвала прояв масштабного ефекту від його одновимірного параметру за вказаних експериментальних умов. Слід зазначити, що розкид даних був одного порядку (порівнянний) для трьох номіналів товщин випробуваних пластин. Аналізуючи обчислені середні значення міцності (показані символом «заповнений квадрат») залежність має точку максимуму, що відповідає даним для товщини зразка 4 мм, тобто кардинально змінюється її характер від зростання до спадання при збільшенні товщини.

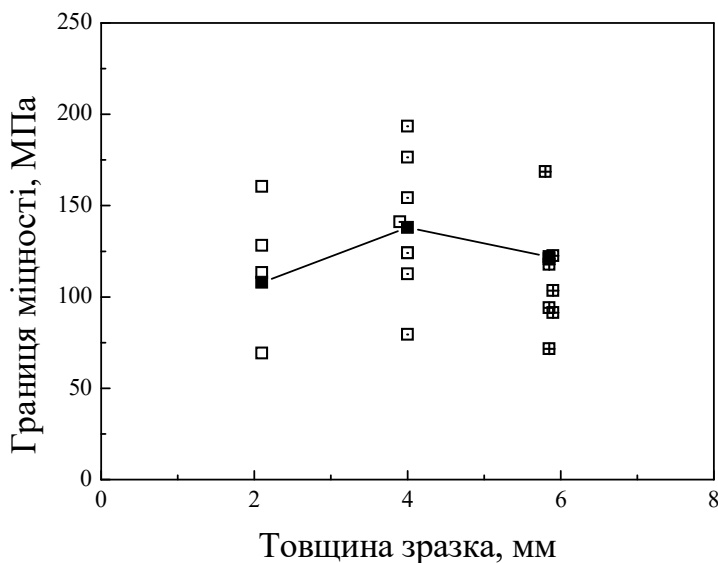


Рис. 2. Залежність границі міцності σ (МПа) флоат-скла від товщини зразка h (мм)

Подібна закономірність була знайдена за результатами випробувань на трьох-точковий згин у роботі [6], метою якої було визначення впливу товщини

зразка листового скла, процесу його розрізання та фінішної механічної обробки на характеристику міцності (рис. 3). Пояснення дослідниками такої зміни міцності стосувалося підвищеної шорсткості поверхні кромки у зразках більшої товщини. В умовах осесиметричного згину величина міцності скла залежить насамперед від площі навантаженої поверхні зразка з притаманною вихідною дефектністю поверхні та приповерхневих шарів. Саме тому цю механічну характеристику ще називають поверхневою міцністю плоского скла [7]. Слід також зазначити, що міцність зразків скла різної товщини обумовлена градієнтом механічних напружень, який є мірою зміни напружень в різних точках тіла. Власне розгляд цих аспектів (дефектності та градієнта напружень) при аналізі отриманих результатів є предметом додаткового вивчення для можливості достовірного визначення причин виявленої закономірності, наведеної у цьому дослідженні.

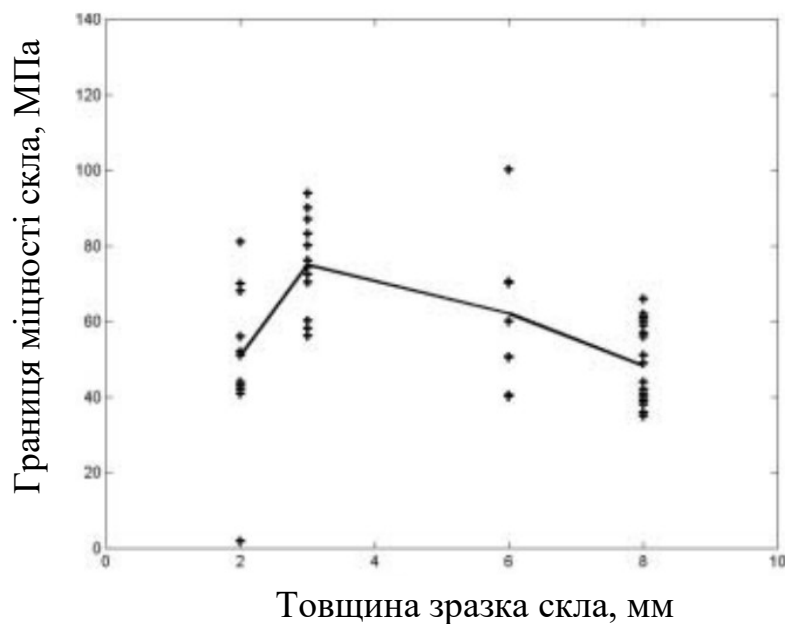


Рис. 3. Залежність границі міцності σ (МПа) флоат-скла при трьох-точковому згині від товщини зразка h (мм) за даними дослідження [6]

Література

1. Кирпичев В. Л. О подобии при упругих явлениях / В. Л. Кирпичев // Журнал русского физико-химического общества. – Спб., 1874. – Т. VI. – Вып. 9. – С. 152 – 155.

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., Христович 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