

**В. В. Хворостяний<sup>1</sup>**  
**М. А. Долгов<sup>1</sup>**  
**М. О. Цисар<sup>2</sup>**  
**В. Є. Бодунов<sup>1</sup>**  
**Р. С. Старинко<sup>1</sup>**

## **ОСОБЛИВОСТІ РОЗКИДУ ГРАНИЦІ МІЦНОСТІ В УМОВАХ ЗГИНУ ТОНКОЛИСТОВИХ ЗРАЗКІВ ФЛОАТ-СКЛА**

<sup>1</sup> Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України;

<sup>2</sup> Інститут надтвердих матеріалів імені В. М. Бакуля НАН України

### **Анотація**

*Наведено експериментальні результати визначення границі міцності флоат-скла на тонколистових зразках, випробуваних в умовах чотирьох-точкового згину. Показано особливості розкиду емпіричних даних та двомодальність границі міцності, пов'язаної з наявністю двох різних видів визначальних дефектів скла. Встановлено взаємозв'язок між картиною руйнування скла та його міцністю на основі статистичного та фрактографічного аналізу.*

**Ключові слова:** флоат-скло, границя міцності, згин, дефектність, статистичний аналіз.

### **Вступ**

На сьогодні новітні конструкторські рішення підтверджують потенційні можливості у напрямі розвитку зі зміною парадигми щодо використання скла як матеріалу не лише функціонального, а й конструкційного призначення у відповідальних деталях та елементах конструкцій в різних галузях промисловості. Але з огляду на такі фактори як малодеформативність та крихкий характер руйнування скла, залежність його міцності від стану поверхні та крайових зон внаслідок набутих дефектів технологічного походження та експлуатаційних пошкоджень, вплив масштабного ефекту, проблема достовірного визначення міцнісних характеристик скла залишається актуальною і зумовлює важливість наукових досліджень, спрямованих на забезпечення роботоздатності конструкцій зі скла при складних умовах навантаження [1, 2].

Мета роботи полягала у визначенні особливостей розкиду величини границі міцності при згині зразків флоат-скла товщиною 3,85 мм та верифікації одержаних результатів, використовуючи методи статистичної обробки даних та фрактографічного аналізу зламів.

### **Результати дослідження**

Експериментальні дослідження в умовах чотирьох-точкового згину виконані на зразках флоат-скла у вигляді плоских пластин розмірами  $150 \times 50 \times 3,85$  мм<sup>3</sup> на гідравлічній установці ZD-4, оснащених універсальною вимірювальною системою GT-12-M18 з програмним забезпеченням «GlassBend» [3]. Результати визначення границі міцності скла наведено на діаграмі, що дозволило графічно візуалізувати притаманний цьому класу матеріалів досить значний розкид даних (рис. 1). Суцільною лінією показано середнє значення міцності для усього масиву випробувань ( $n = 27$  дослідів). Відповідно до цього деякі емпіричні результати можуть бути ідентифіковані як такі, що мають надмірну похибку і вважатися викидами. Тому належність їх до загальної вибірки чи виключення з неї перевіряли за допомогою спеціальних статистичних критеріїв Шовене та Смірнова. Попри великий розкид даних, така перевірка не виявила промахів, тобто жоден з отриманих екстремальних результатів не може бути відкинутий.

Аналіз діаграми вказує на існування двох мод величини границі міцності скла. Видається можливим виокремити 3-поміж усіх даних групу із  $k = 5$  дослідів з найбільшими значеннями, обчислене середнє значення міцності для яких становить  $\sigma = (63,1 \pm 1,2)$  МПа (наведено на діа-

грамі за допомогою штрихової лінії). Для вибірки даних без врахування цих найбільших значень ( $n - k = 22$  досліди) середнє значення міцності менше на 30% і дорівнює  $\sigma = (48,1 \pm 4,3)$  МПа (на діаграмі показано пунктирною лінією). Виявлена двомодальність величини границі міцності на тонколистових зразках скла спричинена різною їх дефектністю. На це вказують результати фрактографічного аналізу зламів, а саме характер руйнування скляних пластин при згині.

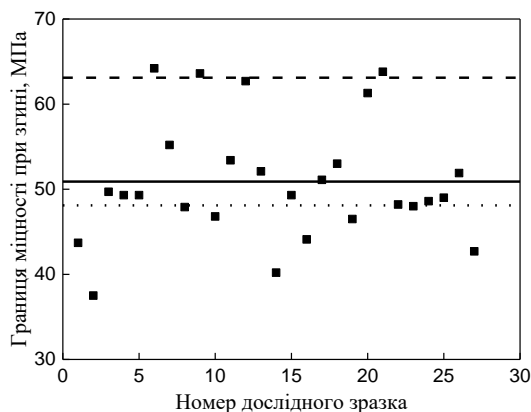


Рис. 1. Діаграма розкиду границі міцності при згині флоат-скла зразків товщиною 3,85 мм

Для групи п'яти результатів з найбільшими значеннями границі міцності руйнування зразків зароджувалося з дефектів, розташованих на їх кромках та відбувалося з більш значним розтріскуванням при розповсюдженні руйнівної магістральної тріщини (зокрема зразок № 21). Водночас в експериментах, в яких фіксувалися найменші значення міцності (зразки № 1, 2), руйнування починалося з небезпечних дефектів в приповерхневому тріщинуватому шарі скла (глибина та довжина критичної мікротріщини в середньому становить 30...40 мкм та 50...100 мкм відповідно [4]). Переважно спостерігались руйнування зразків саме з кромочних дефектів, а деякі експерименти (наприклад, зразки № 14, 16, 27) характеризувалися менш масштабним розтріскуванням. Таким чином за видом руйнування зразків скла можна непрямим методом оцінювати величину його міцності.

## Висновки

За результатами експериментальних досліджень тонких зразків флоат-скла в умовах згину встановлена двомодальність величини границі міцності при значному розкиді значень. Грунтуючись на даних фрактографічного аналізу показано, що міцність скла залежить від виду руйнування та особливостей зародження і поширення руйнівних тріщин.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Veer F. A. The strength of glass, a nontransparent value / F. A. Veer // Heron. – 2007. – Vol. 52, No. 1. – P. 87 – 104.
2. Vandebroek M. Size effect model for the edge strength of glass with cut and ground edge finishing / M. Vandebroek, C. Louter, R. Caspeele, F. Ensslen, and J. Belis // Engineering Structures. – 2014. – Vol. 79. – P. 96 – 105.
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 // Тезисы докладов VII международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы инженерной механики». – Одесса, 12 – 15 мая 2020 г. – С. 296 – 300.
4. Veer F. A. The structural strength of glass; hidden damage / F. A. Veer, Yu. M. Rodichev // Проблемы прочности. – 2011. – № 3. – С. 93–109.

**Хворостяний Вадим Вікторович** — канд. техн. наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу втоми і тріщиностійкості, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, e-mail: plt2002@ukr.net

**Долгов Микола Анатолійович** — докт. техн. наук, професор, провідний науковий співробітник відділу механіки конструкційних матеріалів, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ

**Цисар Максим Олександрович** — канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу фізико-механічних досліджень та нанотестування матеріалів, Інститут надтвердих матеріалів імені В. М. Бакуля НАН України, Київ

**Бодунов Володимир Єгорович** — головний інженер-дослідник відділу втоми і тріщиностійкості, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ

**Старинко Роман Сергійович** — головний інженер-дослідник відділу міцності матеріалів та елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ

### *Characteristics of the flexural strength scatter of thin-sheet float glass samples*

#### **Abstract**

*The experimental results for determining the flexural strength of float glass on thin-sheet specimens testing under conditions of four-point bending are described. The features of the scatter of empirical data and the bimodality of the flexural strength related to the presence of two different types of structural defects in the glass are shown. The relationship between the glass fracture behaviour and its strength is obtained on the basis of statistical and fractographic analysis.*

**Keywords:** float glass, strength, bending, defectiveness, statistical analysis.

**Khvorostianyi Vadym** — Ph. D., Senior Researcher, Senior Scientific Researcher of G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

**Dolgov Mykola** — Prof., D. Sc., Leading Research Fellow of G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

**Tsysar Maksym** — Ph. D., Senior Scientific Researcher of V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

**Bodunov Volodymyr** — Chief Research Engineer of G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

**Starynko Roman** — Chief Research Engineer of G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv