

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКЛА НА ЗГИН: ПОРІВНЯННЯ ЗНАЧЕНЬ МІЦНОСТІ ЗА РІЗНИХ УМОВ ОРІЄНТАЦІЇ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА

Богдан ДЕМЧИНА¹, Роман КОЗАК², Паула МАЙХЕР³, Януш НЕМЄЦ⁴

^{1,3,4} Державна вища техніко-економічна школа ім. Кс. Броніслава Маркевича в Ярославі
вул. Чарнецького, Ярослав, Польща, 37-500

² Національний університет «Львівська Політехніка»
вул. Карпінського, 6, Львів, Україна, 79013

¹bogdan195809@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-3498-1519>

²roman.p.kozak@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-9617-5128>

³majcher.paula98@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6520-1047>

⁴it@pwste.edu.pl, <http://orcid.org/0000-0001-6520-1047>

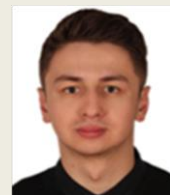
Анотація. Проведено оцінку різних методик визначення міцнісних характеристик скляних зразків. Описано методику дослідження скляних зразків із вертикальною орієнтацією ширшої сторони поперечного перерізу зразка, на відміну від існуючих методів дослідження, що відбуваються із горизонтальною орієнтацією ширшої сторони поперечного перерізу зразка. Визначено основні фізико-механічні характеристики звичайного листового скла при випробуванні його на згин, а саме міцність на згин. Проведено статистичний аналіз отриманих результатів за допомогою двох-параметричного розподілу Вейбулла.

Об'єктом дослідження було визначення міцнісних характеристик скла, що за стандартними методами ускладнює процес виготовлення стандартних зразків та приводить до великої витрати матеріалу. Для дослідження було виготовлено оптимальні за технологією виготовлення та витратами матеріалів дослідні зразки.

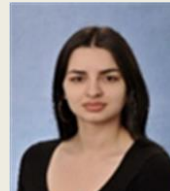
Використано методику дослідження міцності скла на трьох точковий згин, а для визначення модуля пружності скла використовувались методи визначення його за відносними деформаціями із використання тензорезистивних датчиків та за прогинами.



Богдан ДЕМЧИНА
професор Інституту технічної інженерії,
д.т.н., професор



Роман КОЗАК
аспірант кафедри будівельних
конструкцій та мостів



Паула МАЙХЕР
студентка Інституту технічної інженерії



Януш НЕМЄЦ
інженер Інституту технічної інженерії

Статистичним методом оцінки міцності був двох параметричний розподіл Вейбулла.

Отриманий результат підтвердив доцільність використання рекомендованого

підходу до виготовлення та випробування дослідних зразків для визначення міцності скла який додатково зменшив витрату скла як матеріалу. Використання статистичного розподілу Вейбулла дозволило визначити характеристичні значення міцності скла для окремої серії зразків із достатньою точністю.

Дослідження підтвердило доцільність подальших досліджень в напрямку втрати стійкості скляних плоских елементів та використання точних методів визначення модуля пружності скла. Отриманий результат дозволив оцінити вплив орієнтації зразків на дослідному стенді та вплив плоскої форми деформування на значення міцності та модуля пружності у вертикально орієнтованих зразках.

Ключові слова. Скло; скляні конструкції; скляний зразок; випробування на згин; міцність скла на згин; двох-параметричний розподіл Вейбулла.

ВСТУП

Сучасні українські [1] та європейські норми [2,3] проектування досить однозначно подають фізико-механічні характеристики флоат скла як довідкові. Вони рекомендують для більш точного аналізу будівельних конструкцій із скла використовувати експериментальні значення міцності. Найбільш точну теоретичну оцінку міцності подано у п.8 [3]. Тут запропоновано, за аналогією із дерев'яними конструкціями, знизити міцність скла у відповідності до характеристики прикладеного навантаження. Важливим фактором у даних норма також є достатньо великий коефіцієнт надійності за матеріалом, що становить 1.8 (табл.2 [3]), що є досить великим значенням порівняно із іншими матеріалами, тому у багатьох випадках для економії матеріалів доцільно використати проектування за допомогою прямих досліджень міцності конкретної серії скла. Та не зважаючи на таку можливість витрачати чимало дорогого матеріалу на дослідження не є доцільним.

Об'єктом дослідження було визначення фізико-механічних характеристик скла.

Існують два популярних стандарти визначення фізико-механічних властивостей скла [4,5], які фактично дублюють один

одного у методиці дослідження. В основі даних досліджень лежить випробування зразків скла на чотирьох точковий згин, що вимагає необхідного обладнання, стандартизованих роликів, тощо. В обох випадках дослідні зразки встановлюють із горизонтальною орієнтацію ширшої сторони поперечного перерізу, тобто - горизонтально. ASTM [4] чітко нормує розміри зразка який становить $10 \times 1 \frac{1}{2}$ in. (250×38.2 мм). Що стосується EN [5], то рекомендовано використовувати великогабаритні зразки розмірами 1100×300 мм. Також дуже важливим пунктом даних досліджень – є стан кромки скляного зразку, що відповідно до технології виготовлення, а саме процесу порізки скла, унеможливорює полірування для невеликого розміру зразків, таких як у ASTM. У свою чергу у EN рекомендується використовувати великогабаритні зразки, що призводить до перевитрати і так дорогого матеріалу.

Основним недоліком об'єкту досліджень є технологічні проблеми у виготовленні зразків. При порізці листа скла на зразки малих розмірів із розміром сторони менше 40 мм, таких як для дослідження згідно із ASTM [4], виникає багато сколів та відповідно великого браку зразків. Також для коректного дослідження зразків необхідно виконувати додаткові роботи, такі як шліфування кромки та іншу додаткову механічну обробку, що є технологічно складною для зразків малих розмірів. З іншого боку стандартні розміри зразків для дослідження фізико-механічних характеристик згідно EN [5], є надто габаритними, що приводить до перевитрати складного у виготовленні матеріалу.

Аналіз попередніх досліджень

Питання методики визначення фізико-механічних характеристик скла як конструктивного матеріалу для несучого елемента стояло із самого початку його використання в будівництві. Міцність флоат скла прийнято визначати за допомогою кидання кульки із висоти на лист скла [1], проте отримані значення не підходять для проектування як такого. Тому були розроблені різні

методики визначення міцності скла як конструктивного матеріалу, як у США [4], так і в Європі [5]. Проте дані методики мають ряд недоліків, основні із яких – це рекомендовані габарити зразків скла.

Загалом, дослідникам вдалось прийти до загальноприйнятої міцності скла, але значна кількість факторів які впливають на фізико-механічні характеристики скла є вирішальними в проектуванні, тому рекомендовано здійснювати визначення таких характеристик для кожної окремої партії скла [6].

Методи дослідження міцнісних характеристик є досить різноманітними, як власне і саме скло. Японські дослідники визначали характеристики різного типу флоат скла за дії дуже низьких температур [7]. Критерієм оцінки міцності у цих дослідженні було не тільки саме руйнування, але і досягнення критичних пластичних параметрів.

У Maniatis I. [8], подана методика дослідження тонких шарів скла (близько 2 мм). Оскільки при такій товщині лист скла прогинався під власною вагою, тому зразки були встановлені вертикально. У свою чергу дослідники із США зробили ще один крок вперед уже в дослідженнях напружень у встановлених листах тонкого скла [9] за допомогою рентгенівської топографії.

Повертаючись до класичних методів визначення фізико-механічних характеристик J. Рері [10–12] у своїх працях уже до класичного методу випробовування скла, запропонував визначення міцності скла за допомогою методу втискування круглого зразка між двома кільцями.

Майже без уваги залишається визначення дотичних напружень в скляних конструкціях. Так у роботі [13], даний параметр визначається лише яке перехідна залежність із використанням коефіцієнту Пуассона.

Основним методом для статистичного аналізу отриманих результатів оцінки міцності скла вважається двох-параметричний розподіл Вейбулла [14,15]. Так, у роботі [16] за допомогою даного методу визначаються характеристики скла на дію чотирьох точкового згину. У роботах [17,18] представлені результати для різних видів флоат скла та додатково описано методику

визнання міцності скла на трьох точковий згин та описані основні кроки для проведення аналізу за допомогою розподілу Вейбулла.

Виходячи із аналізу літератури, можна зробити наступні висновки:

- існуючі методи дослідження міцності скляних зразків на згин є гнучкими та підлаштовуються для дослідження різних за геометричними параметрами зразків, тобто одного універсального методу визначення немає;

- у більшості випадках досліджують скляні зразки різних розмірі на трьох- або чотири точковий згин із горизонтальною орієнтацією зразка;

- найбільш поширеним методом статистичного аналізу отриманих результатів міцності скляних зразків є розподіл Вейбулла.

МЕТА І МЕТОДИ

Метою дослідження було визначення фізико-механічних властивостей скляних зразків за допомогою трьох точкового згину, із використанням мінімально можливих їх розмірів з точки зору простого технологічного процесу порізки флоат скла. Також оцінити вплив різного розташування зразка на дослідному стенді, а саме із горизонтальною та вертикальною орієнтацією ширшої сторони поперечного перерізу зразків.

Для досягнення мети дослідження було поставлено наступні задачі:

1. Дослідити на трьох-точковий згин скляні зразки із оптимізованими до технологічних процесів їх виготовлення розмірами.

2. Виконати дослідження зразків на трьох-точковий згин із різним розташування зразків на дослідному стенді.

3. Виконати аналіз результатів дослідження та провести статистичний аналіз результатів за допомогою двох-параметричного розподілу Вейбулла.

У даному дослідженні розглядалось дві серії дослідних зразків (рис.1):

- *Серія I* – зразки марки SH (sample horizontal) – досліджувались на трьох точковий згин із горизонтальною орієнтацією зразків по стороні b.

- *Серія II* - зразки марки SV (sample vertical) – досліджувались на трьох точковий згин із вертикальною орієнтацією зразків по стороні b.

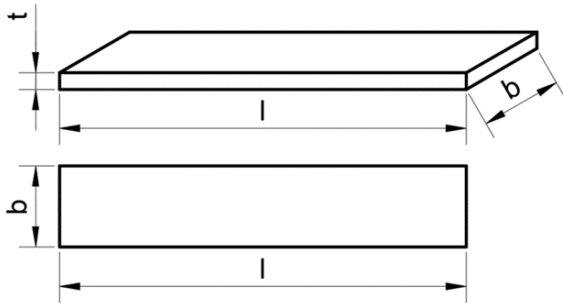


Рис.1. Геометрія дослідних зразків.

Fig.1. Test samples geometry

Геометричні параметри усіх зразків були визначені як середнє арифметичне декількох замірів для ширини та довжини, та трьох замірів для товщини, що відповідало вимогам п.7.1 [5], а їх величини подано у табл.1. Заміри виконані із точністю до 0.05 мм.

Табл.1. Геометричні характеристики дослідних зразків.

Tabl.1. Geometric characteristics of experimental samples.

Серія	Марка	Довжина l	Ширина b	Товщина t	Маса m
		[мм]	[мм]	[мм]	[г]
I	SH-1	249.75	50.05	9.85	305.05
	SH-2	249.85	50.25	9.85	310.05
	SH-3	249.75	50.25	9.85	310.05
	SH-4	249.95	50.25	9.85	310.05
	SH-5	249.85	50.75	9.85	310.05
	SH-6	249.95	50.95	9.85	310.05
	SH-7	250.50	50.25	9.85	310.05
	SH-8	253.00	50.75	9.85	310.05
II	SV-1	249.95	50.35	9.85	310.05
	SV-2	249.65	51.25	9.85	310.05
	SV-3	250.75	50.25	9.85	310.05
	SV-4	249.35	50.05	9.85	305.05
	SV-5	249.35	49.95	9.85	305.05
	SV-6	250.05	50.35	9.85	310.05
	SV-7	250.15	50.05	9.85	305.05
	SV-8	251.15	50.25	9.85	310.05

Згідно із п.6.3 [5], дослідні зразки відповідали наступним вимогам: зразки були плоскими і обидва напруженні краї були однакової орієнтації. Зразки встановлювались відповідно до рис. 2. Згідно із п.7.2 [5], між зразком і роликком було встановлено гумові смужки товщиною 3 мм і твердістю IRHD (ISO 48-2:2018).

Для випробувань дослідних зразків був використаний прес Lab.Test 6.100.1.20 серійний номер якого ZA/2019/4 та сертифікат 7051-KL-H0159-19 з системою тестування Test & Motion ®. Новий інтегрований інтерфейс безпеки відповідав EN ISO 13850. Клас точності відповідав EN ISO 7500-1.

Згідно із п.3.1.4 [4] випробування на згин проводили при температурі та відносній вологості між 40% та 70%.

Зразки згинались рівномірно зростаючим навантаженням із швидкістю не більше ніж $1.1 \pm 0.2 \frac{\text{МПа}}{\text{с}}$ ($10000 \pm 20000 \frac{\text{psi}}{\text{min}}$) п.13.2 [4].

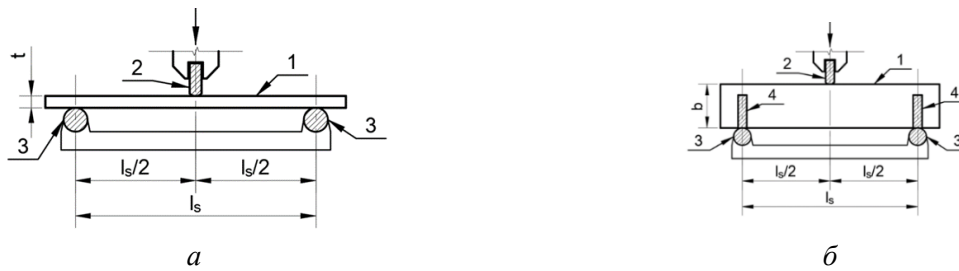


Рис.2. Принципи улаштування дослідних зразків:

a- для серії I;

б- для серії II.

1 – дослідний зразок; 2 – згинальний ролик; 3 – опорний ролик; 4 – фіксуюча струбцина.

Fig.2. Principles of arrangement of prototypes:

a - for series I;

b - for series II.

1 - prototype; 2 - bending roller; 3 - support roller; 4 - locking clamp.

За результатами випробувань були зафіксовані руйнуючі навантаження та час до повного руйнування зразків. Згідно із п. 13.2 [4] максимальне допустиме початкове навантаження складало не більше ніж 25% від прогнозованого значення руйнівного навантаження.

Дослідні зразки серії I марки SH – досліджувались із горизонтальною орієнтацією зразків по стороні *b* (рис.2 а). Скляний зразок (1) встановлювався із горизонтальною орієнтацією на опорні ролики (3), зразок центрувався відносно згинального ролику (2).

Дослідні зразки серії II марки SV – досліджувались із вертикальною орієнтацією зразків по стороні *b* (рис.2 б). Скляний зразок (1) встановлювався із вертикальною орієнтацією на опорні ролики (3), дода-

тково зразок було закріплено за допомогою струбцин (4), щоб забезпечити стійкість зразків із площини, зразок центрувався відносно згинального ролику (2).

Додатково на п'ятьох зразках кожної серії було встановлено тензодатчики НВМ-1-LY41-10/120. Тензодатчики наклеювалися за допомогою клею z70 schnellklebstoff. Для отримання результатів було використано програмне забезпечення catman Easy-AP та обладнання 1-MX1615B-TENSOMETRY- CZNY, яке являлося 16-ти канальним вимірювальним підсилювачем серії QuantumX [18]. Загальний вигляд дослідного зразка після випробування на прикладі зразка SV (sample vertical) подано на рис.3.

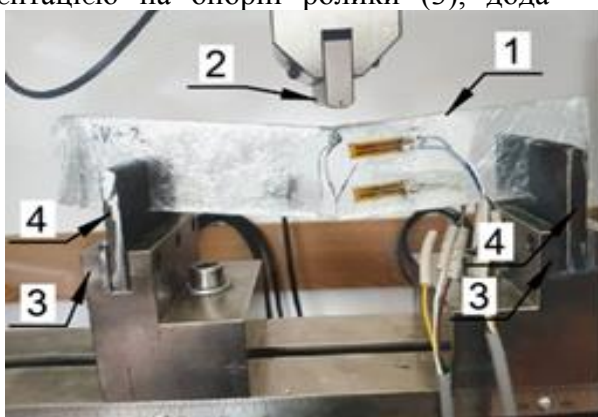


Рис.3. Вигляд дослідного зразка після випробування,

1 – дослідний зразок;

2 – згинальний ролик;

3 – опорний ролик;

4 – фіксуюча струбцина.

Fig.3. The type of prototype after the test,

1 - prototype;

2 - bending roller;

3 - support roller;

4 - locking clamp.

Проведення аналізу зразків виконувалось у відповідності із [4,15]. До величин які були аналізовані включено:

- **Міцність зразка на згин ($\sigma_{b,i}$)** визначалась із умови максимальних нормальних напружень які виникали в перерізі однопролітної балки за формулою:

$$\sigma_{b,i} = \frac{N_i \cdot l_s}{4 \cdot W_i}, \quad (1)$$

де, N_i – руйнівне навантаження [кН];
 l_s – відстань між опорними [мм];
 W_i – роликми момент опору [мм³], що визначається окремо для кожної серії:
 $W_{SH} = \frac{b \cdot t^2}{6}$ – для зразків серії I;
 $W_{SV} = \frac{t \cdot b^2}{6}$ – для зразків серії II;
 b – ширина зразка (див.табл.1);
 t – товщина зразка (див.табл.1).

Швидкість наростання максимального навантаження (R) визначалась по аналогії до п.8.1.3 [4], як зміна напруження за

час від початку експерименту до кінцевого руйнування:

$$R = \frac{\Delta\sigma}{t}, \quad (2)$$

де $\Delta\sigma = \sigma_{b,i}$ – нормальне напруження що виникало в перерізі зразка [МПа];
 t – час від початку безперервного навантаження до руйнування [с].

Модуль пружності (E) визначався за двома методиками.

тати замірів відносних деформацій тензодатчиками, за формулою:

Перша методика виходила із закону Гука, використовуючи експериментальні результати

$$E_\sigma = \frac{\sigma_{b,i}}{\varepsilon_i}, \quad (3)$$

де, $\sigma_{b,i}$ – нормальне напруження що виникало в перерізі зразка [МПа];
 ε_i – значення відносної деформації, що виникала в поперечному перерізі в момент настання нормального напруження $\sigma_{b,i}$.

Друга методика виходила із рівняння

визначення прогинів:

$$E_u = \frac{N_i \cdot l_s^3}{48 \cdot I \cdot u}, \quad (4)$$

де, I – момент інерції [мм⁴];
 u – прогин зразка [мм].

Статистична оцінка результатів дослідження відбувалась за допомогою двох-параметричного розподілу Вейбулла згідно із [14,15]. Порядок розрахунку та загальна характеристика розподілу Вейбулла подана у [17,18].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Було досліджено по 8 зразків кожної серії. Для зразків серії I марки SH руйнування відбувалось в зоні прикладання навантаження по середині прольоту зразка із утворенням рівномірної поперечної тріщини(рис. 4, а).

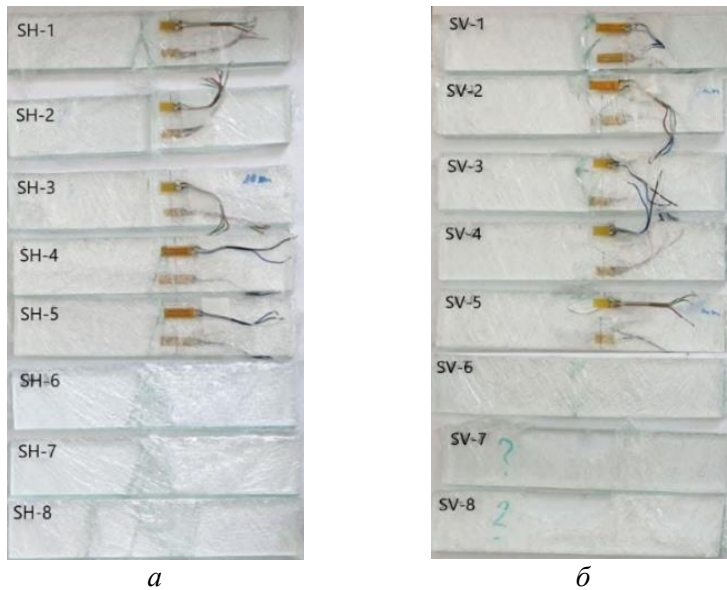


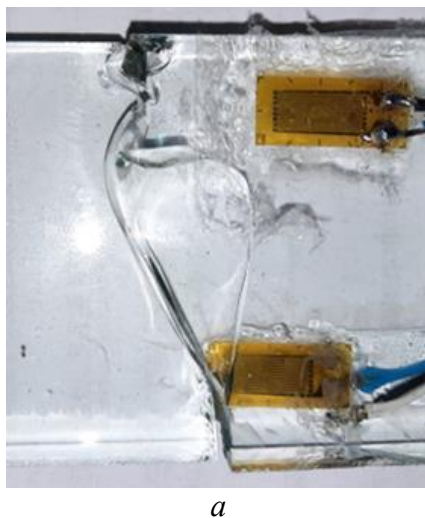
Рис. 4. Вигляд дослідних зразків після руйнування:
a -серії I (SH);
б -серії II (SV).

Fig. 4. Type of prototypes after destruction:
a - series I (SH);
b - series II (SV).

Зразки серії I мали характер руйнування який відповідав типовим зразкам руйнування для кераміки та крихких елементів рис.X1.1 [19].

Зразки серії I випробувались із природом навантаження у 6 [H/c] , зразки серії II мали приріст навантаження у 8 [H/c] .

Для зразків серії II марки SV руйнування відбувалось в зоні прикладання навантаження по середині прольоту із утворенням тріщин у формі різносторонньої трапеції (рис.4,б; рис. 5,а). Для зразків були також характерні локальні тріщини у зоні прикладання зусилля (рис.5, б).



a



б

Рис. 5. Руйнування зразків серії II.

a - характер руйнування зразка серії II;

б - локальне руйнування перерізу у зоні прикладання зусилля серії II.

Fig. 5. Destruction of samples of series II.

a - the nature of the destruction of the sample series II;

b -local destruction of the section in the zone of application of the series II force.

Результати випробувань на міцність наведені у табл.2.

Визначення міцнісних характеристик виконувалось згідно із рівняннями (1).

Табл.2. Результати дослідження зразків на міцність.
Tabl.2. The results of the study of samples for strength

Серія	Марка	Макс. навант., N_i	Час, t	Момент опору, W_i	Макс. норм. напр. $\sigma_{b,i}$	Швидк. нар. напр. R
		[кН]	[с]	[мм ³]	[МПа]	[МПа/с]
I	SH-1	588.8	98.13	796.1	36.98	0.38
	SH-2	487.3	81.22	796.9	30.57	0.38
	SH-3	523.2	87.20	802.1	32.62	0.37
	SH-4	676.7	112.78	802.3	42.17	0.38
	SH-5	623	103.83	809.7	38.47	0.37
	SH-6	321.4	53.57	819.6	19.61	0.37
	SH-7	511.4	85.23	798.9	32.00	0.38
	SH-8	523.2	87.20	808	32.38	0.37
II	SV-1	2538.1	317.26	4148.0	30.59	0.10
	SV-2	3125.3	390.66	4281.3	36.50	0.09
	SV-3	2792.2	349.03	4108.1	33.98	0.10
	SV-4	1650.4	206.30	4069.8	20.28	0.10
	SV-5	2723.3	340.41	4062.5	33.52	0.10
	SV-6	3214.5	401.81	4127.0	38.95	0.10
	SV-7	1347.5	168.44	4091.7	16.47	0.10
	SV-8	1981.5	247.69	4095.5	24.19	0.10

Згідно із результатами розрахунку швидкості приросту навантаження за рівнянням (2) – приріст навантаження не перевищував рекомендованого значення згідно із п.13.2 [4]. Визначення модуля пружності відбувалось за рівняннями (3) та (4), а їх результати подано у табл.3. Значення відносної деформації ε_i подано у момент досягнення критичного напруження у зразку.

Діаграми зміни відносних деформацій ε_i з часом t зображено на графіках які подані на рис.6. Як видно із графіків обидві серії зразків до певного часу мали відносно не великий приріст зміни відносної деформації. В певний момент зміна відносних деформацій набувала вигляду параболи. Для

серії I ця парабола, мала розлогий характер, для серії II більш стрімкий.

За результатами дослідження проведено статистичний аналіз дослідження міцності на згин за допомогою двох-параметричного розподілу Вейбулла.

Даний метод статистичної оцінки міцності базувався на твердженні того що статично розподілені величини, можуть бути представлені однією функцією розподілу Вейбулла, навіть у випадку великого статистичного відхилення від стандартної кривої розподілу [15].

Результати подані у вигляді діаграм Вейбулла рис.6 для кожної серії випробування. Дані діаграми являють собою кумулятивні ймовірності руйнування як функцію прикладеного напруження.

Табл.3. Результати визначення модуля пружності.
Tabl.3. The results of determining the modulus of elasticity.

Серія	Марка	Макс. норм. напр. $\sigma_{b,i}$	Час, t	Відн. деф. ε_i	Прогин u	Модуль пружності E_σ (1-ша методика)		Модуль пружності E_u (2-га методика)	
		[МПа]				[с]	[МПа]	[МПа]	
I	SH-1	36.98	98	548.9229	0.410	68945		61501	
	SH-2	30.57	81	436.8670	0.360	69986		57992	
	SH-3	32.62	87	464.8121	0.380	70169	69680	58467	59986
	SH-4	42.17	112	605.8666	0.460	69608	(1.1)	62410	(1.2)
	SH-5	38.47	103	551.9974	0.440	69691		59557	
II	SV-1	30.59	317	437.9430	0.250	69858		16227	
	SV-2	36.50	390	520.0014	0.330	70191		14407	
	SV-3	33.98	349	483.9543	0.310	70221	70610	14570	14002
	SV-4	20.28	206	289.9984	0.250	69918	(2.1)	10817	(2.2)
	SV-5	33.52	340	459.9971	0.320	72863		13989	

Критерієм оцінки збіжності був коефіцієнт детермінації R^2 , що відповідав

коефіцієнту кореляції. Оскільки його значення було близьким до 1,0 в обох випадках, тому результат статистичного аналізу можна вважати задовільним (п.3.3 [17] та п.7.2.5 [14]).

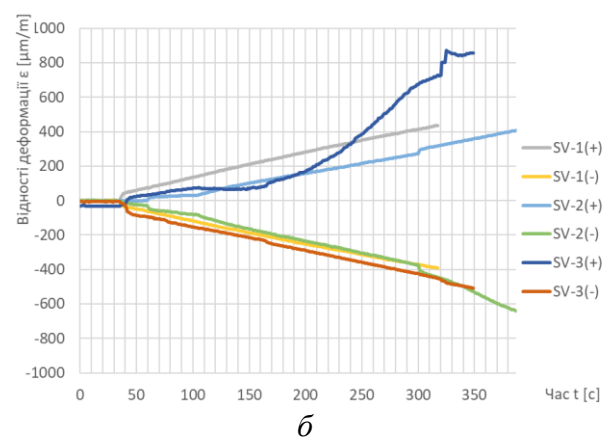
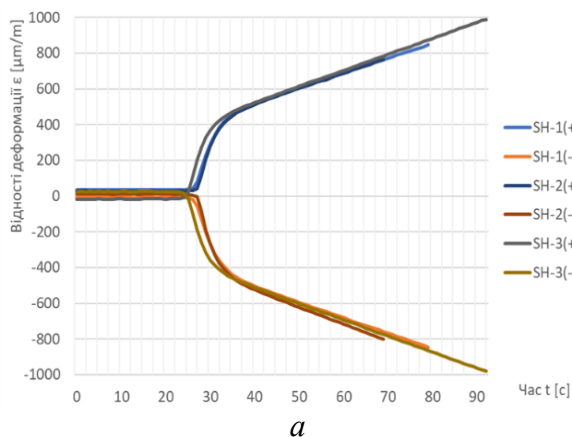


Рис. 6. Діаграма відносних зміни деформацій ε_i з часом t , для:
 а - серії I (SH);
 б - серії II (SV).

Fig. 6. Diagram of relative changes in deformation with time t , for:
 a - series I (SH);
 b - series II (SV).

У табл. 4 подано оцінку характеристичних міцностей для скла при згині – подана характеристична міцність скла (63.2 % руй-

нування) за моделлю Вейбулла та характеристична міцність скла, що відповідає 5% вірогідності руйнування.

Табл.4. Оцінка розподілу міцності на згин за допомогою розподілу Вейбулла.
Tabl.4. Estimation of flexural strength distribution using Weibull distribution.

Характеристика розподілу	Од. виміру	Серія	
		I	II
Параметр форми $\beta = m$	-	4.46	3.47
Вільний член рівняння прямої $b = -\beta \cdot \ln(\eta)$	-	-16.03	-12.13
Характеристичне значення безвідмовності (63.2% руйнування) $n = e^{-\frac{b}{\beta}}$	МПа	36.36	32.69
Точкова оцінка квантиля (5%) розподілу напрацювань до відмови на основі бета-біноміальної межі регресії медіан рангів $f_{g;k,5\%} = \eta \left(\ln \left(\frac{1}{1-0.05} \right) \right)$	МПа	18.68	13.92

Міцність зразків серії I, з горизонтальною орієнтацією на дослідному стенді, вия-

вилася вищою ніж міцність зразків серії II, з вертикальною орієнтацією на дослідному стенді, а саме:

$$\Delta f_{g;k,5\%} = \frac{f_{g;k,5\%}^I - f_{g;k,5\%}^{II}}{f_{g;k,5\%}^I} = \frac{18.68 - 13.92}{18.68} = 0.2548 = 25.48\%$$

Причиною цього згідно із п.1.1 [20] став вплив явища втрати стійкості плоскої форми деформування балочного елемента, оскільки тонкі та вертикально орієнтовані стержні схильні до втрати стійкості з площини. Оскільки для скляних конструкцій характерними є саме плоскі перерізи, подальші дослідження явища втрати стійкості з площини є актуальними.

Аналізуючи табл. 3 було виконано наступні порівняння:

- порівняння модулів пружності отриманих для серії I, за двома методиками, показало їх достатньо задовільну збіжність, а саме (додати розрахунок) (1.1)/(1.2)=1.16;
- порівняння модулів пружності отриманих для серії I для серії II за першою методикою, показало дуже добру збіжність, а саме (1.1)/(1.2)=1.013;
- порівняння модулів пружності отриманих для серії II, за двома методиками, показало їх не задовільну збіжність, а саме (2.1)/(2.2)=5.04, що потребує додаткового роз'яснення (дослідження).

Звідси можна зробити висновок, що методика визначення модуля пружності за деформаціями є актуальною для дослідних зразків для яких не характерні додаткові впливи на несучу здатність, такі як явище втрати стійкості плоскої форми деформування і не може дати задовільного значення величини модуля пружності.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Було визначено міцність скляних зразків на трьох точковий згин двох серій, які випробовувалися з горизонтальною та вертикальною орієнтацією зразка на дослідному стенді. Характеристичні значення міцності зразків на згин були визначенні з використанням статистичного розподілу Вейбулла. Так як коефіцієнт детермінації R^2 , був рівний 0.88 та 0.96, що близько до одиниці, тому можна вважати, що закон розподілу Вейбулла був задовільним.

2. Зразки серії II мали міцність на згин на 25.48% меншу ніж зразки серії I. На це вплинула вертикальна орієнтація зразків серії II на дослідному стенді, що очевидно привело до впливу втрати їх стійкості з площини. Оскільки в балочних скляних конструкціях

в основному використовуються вертикальне розміщення шарів скла, необхідно в розрахунках використовувати міцність скла на згин визначену для зразків із вертикальною орієнтацією на дослідному стенді.

3. При визначенні модуля пружності скла рекомендується:

- для зразків серії I, з горизонтальною орієнтацією на дослідному стенді, використовувати першу та другу методику;

- для зразків серії II, з вертикальною орієнтацією на дослідному стенді, використовувати першу методику.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ Б В.2.7-122:2009 (EN 572:2004, NEQ). Будівельні матеріали. Скло листове. Технічні умови. Київ. Мінрегіонбуд України. 2010. – 48 с.
2. EN 572-2:2012. Glass in building Basic soda lime silicate glass products - Part 2: Float glass. Brussels. European committee for standardization. 2012. – 14 с.
3. prEN 13474-3:2009. Glass in building - Determination of the strength of glass panes - Part 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing. Brussels. European committee for standardization. 2009. – 34 с.
4. ASTM C158-02. Standard Test Methods for Strength of Glass by Flexure (Determination of Modulus of Rupture). West Conshohocken, PA. ASTM International. 2017. – 9 с.
5. EN 1288-3:2016. Glass in Building – Determination of the Bending Strength of Glass - Part 3: Test with Specimen Supported at Two Points (Four Point Bending). Brussels. European committee for standardization. 2016. – 8 с.
6. Achintha M. Sustainability of glass in construction. *Sustainability of Construction Materials*. 2016. С. 79–104.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100370-1.00005-6>.
7. Inoue M., Yoshida S., Matsuoka J. 2-Point Bending Strength of Glass Fibers. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*. 2008. Т. 57, № 6. С. 557–561
<https://doi.org/10.2472/jsms.57.557>.
8. Maniatis I., Nehring G., Siebert G. Studies on determining the bending strength of thin glass. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*. 2016. Т. 169, № 6. С. 393–402
<https://doi.org/10.1680/jstbu.14.00003>.
9. Slauch I. M., Vishwakarma S., Tracy J. Manufacturing Induced Bending Stresses: Glass-Glass vs. Glass-Backsheet. *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, м. Fort Lauderdale, FL, USA, 20–25 черв. 2021 р.
<https://doi.org/10.1109/pvsc43889.2021.9518938>.
10. Pepi J. W. Applied Stress Determination. *Strength Properties of Glass and Ceramics*. Melbourne, 2014. С. 93–107.
<https://doi.org/10.1117/3.1002530.ch12>.
11. Pepi J. W. Weibull Analysis. *Strength Properties of Glass and Ceramics*. Melbourne, 2014. С. 71–83.
<https://doi.org/10.1117/3.1002530.ch10>.
12. Pepi J. W. Inert Strength Determination. *Strength Properties of Glass and Ceramics*. Melbourne, 2014. С. 85–92.
<https://doi.org/10.1117/3.1002530.ch11>.
13. Tran N. Shear strength of reinforced glass beams. *Darmstadt Concrete - Annual Journal on Concrete and Concrete Structures*. 2019. №34. С. 49-50.
14. EN 61649:2008. Weibull analysis. Brussels. European committee for standardization. 2009. – 14 с.
15. EN 12603:2002. Glass in building - Procedures for the goodness of fit and confidence intervals for Weibull distributed glass strength data. Brussels. European committee for standardization. 2002. – 33 с.
16. Medrano R.E., Gillis P.P. Bending strength of silica glass. *Journal of Materials Science*. 2000. Т. 35, № 18. С. 4649–4652.
17. Demchyna B., Osadchuk T. Flexural strength of glass using Weibull statistic analysis. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2018. Т. 2, № 87. С. 49..61.
<https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.2827>.
18. Демчина Б. Визначення фізико-механічних властивостей скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла. / Сурмай С., Ткач Р., Гула В //36. наук. праць Будівельні конструкції. Теорія і практика., Київ.: КНУБА.-2020.- № 6. С. 94–113.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.94-113>.
19. ASTM C1161-18. Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature. West Conshohocken, PA. ASTM International. 2018. – 19 с.

20. **Timoshenko S.** Theory of elastic stability. New York: McGraw-Hill Book Company, inc., 1936. 518 c.

REFERENCES

1. **DSTU B V.2.7-122:2009 (EN 572:2004, NEQ).** Budivelni materialy. Sklo lystove. Tekhnichni umovy. Kyiv. Minrehionbud Ukrainy. 2010. - 48 s.
2. **EN 572-2:2012.** Glass in building Basic soda lime silicate glass products - Part 2: Float glass. Brussels. *European committee for standardization. 2012. – 14 s.*
3. **prEN 13474-3:2009.** Glass in building - Determination of the strength of glass panes - Part 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing. Brussels. European committee for standardization. 2009. – 34 s.
4. **ASTM C158-02.** Standard Test Methods for Strength of Glass by Flexure (Determination of Modulus of Rupture). *West Conshohocken, PA. ASTM International. 2017. – 9 s.*
5. **EN 1288-3:2016.** Glass in Building - Determination of the Bending Strength of Glass - Part 3: Test with Specimen Supported at Two Points (Four Point Bending). Brussels. European committee for standardization. 2016. – 8 s.
6. **Achintha M.** Sustainability of glass in construction. *Sustainability of Construction Materials. 2016. S. 79–104.*
<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100370-1.00005-6>.
7. **Inoue M., Yoshida S., Matsuoka J.** 2-Point Bending Strength of Glass Fibers. *Journal of the Society of Materials Science, Japan. 2008. T. 57, № 6. S. 557–561.*
<https://doi.org/10.2472/jsms.57.557>.
8. **Maniatis I., Nehring G., Siebert G.** Studies on determining the bending strength of thin glass. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings. 2016. T. 169, № 6. S. 393–402*
<https://doi.org/10.1680/jstbu.14.00003>.
9. **Slauch I. M., Vishwakarma S., Tracy J.** Manufacturing Induced Bending Stresses: Glass-Glass vs. Glass-Backsheet. *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, м. Fort Lauderdale, FL, USA, 20–25 червн. 2021 р.
<https://doi.org/10.1109/pvsc43889.2021.9518938>.
10. **Pepi J. W.** Applied Stress Determination. *Strength Properties of Glass and Ceramics. Melbourne, 2014. S. 93–107.*
<https://doi.org/10.1117/3.1002530.ch12>.
11. **Pepi J. W.** Weibull Analysis. *Strength Properties of Glass and Ceramics. Melbourne, 2014. S. 71–83.*
<https://doi.org/10.1117/3.1002530.ch10>.
12. **Pepi J. W.** Inert Strength Determination. *Strength Properties of Glass and Ceramics. Melbourne, 2014. S. 85–92.*
<https://doi.org/10.1117/3.1002530.ch11>.
13. **Tran N.** Shear strength of reinforced glass beams. *Darmstadt Concrete - Annual Journal on Concrete and Concrete Structures. 2019. №34. S. 49-50.*
14. **EN 61649:2008.** Weibull analysis. *Brussels. European committee for standardization. 2009. – 14 s.*
15. **EN 12603:2002.** Glass in building - Procedures for the goodness of fit and confidence intervals for Weibull distributed glass strength data. *Brussels. European committee for standardization. 2002. – 33 s.*
16. **Medrano R.E., Gillis P.P.** Bending strength of silica glass. *Journal of Materials Science. 2000. T. 35, № 18. S. 4649–4652.*
17. **Demchyna B., Osadchuk T.** Flexural strength of glass using Weibull statistic analysis. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2018. T. 2, № 87. S. 49..61.*
<https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.2827>.
18. **Demchyna B.** Vyznachennia fizykomekhanichnykh vlastyivostei skla na zghyn za dopomohoiu dvoparametrychnoho rozpodilu Veibulla. /Surmai S., Tkach R., Hula V //Zb. nauk. prats Budivelni konstruksii. *Teoriia i praktyka., Kyiv.: KNUBA.-2020.- № 6. S. 94–113.*
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.94-113>.
19. **ASTM C1161-18.** Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature. West Conshohocken, PA. ASTM International. 2018. – 19 s.
20. **Timoshenko S.** Theory of elastic stability. *New York: McGraw-Hill Book Company, inc., 1936. 518 s.*

DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF GLASS FOR BENDING: COMPARISON OF STRENGTH

VALUES UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF THE ORIENTATION OF A TEST SAMPLE

*Bohdan DEMCHYNA,
Roman KOZAK,
Paula MAJCHER,
Janusz NIEMIEC*

Summary. The estimation of various methods of determining of strong characteristics of glass samples is carried out. The method of the research of glass samples with the orientation of the wider side of the cross-section of the sample, in contrast to the different research methods based on the vertical orientation of the wider side of the cross-section of the sample. The main physical and mechanical characteristics of ordinary sheet glass when tested for bending, and the bending strength itself is determined. Statistical analysis of the obtained results was performed using the two-parametric Weibull distribution.

The object of the study was to determine the strength characteristics, which by standard methods complicates the process of making standard samples and leads to a large waste of material. For the research, the optimal technologies of manufacturing and consumption of materials of research samples

were developed.

The method of studying the strength of glass at three-point bends was used, and to determine the modulus of elasticity used methods to determine its relative deformations using strain gauges and deflections. The statistical method for estimating strength was the two parametric Weibull distribution.

The result confirms the feasibility of using the recommended approach for the manufacture and testing of test specimens to determine their strength, which is an additional reduction in costs as a material. The use of the Weibull statistical distribution allowed the characteristic values of strength that developed for individual series of samples with sufficient accuracy.

The study confirmed the feasibility of further research on the stability of flat glass elements and the use of accurate methods for determining the modulus of elasticity of glass. The result of the evaluation of the influence of the orientation of the samples on the experimental stand and the influence of the flat form of deformation of the value of strength and modulus of elasticity in vertically oriented samples is obtained.

Keywords. Glass; glass construction; glass sample; bending test; bending strength of glass; Two-parameter Weibull distribution.

Стаття надійшла до редакції 30.04.22