

УДК 699.9

ДОСВІД НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА СТІЙКІСТЬ ДО УДАРНОЇ ХВИЛІ ВІКОННИХ БЛОКІВ РІЗНОГО СКЛАДУ

М.О. Орленко¹,
аспірант

В.С. Буравченко¹,
канд. техн. наук, доцент

С.П. Бісик²,
д-р техн. наук, професор

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ. 03680

²Національний університет оборони України, Київ, просп. Повітряних сил, 28, м. Київ. 03026

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.383-395

У роботі наведено узагальнений досвід серії проведених в 2023-2024 рр. натурних випробувань віконних блоків на стійкість до ударної хвилі (вибухостійкість). Зібрані віконні блоки відрізнялися схемою, складом склопакетів, маркою ПВХ чи алюмінієвих профілів, фурнітури та наявністю додаткових підсилень. За результатами випробувань деяким зразкам було надано класи стійкості до ударної хвилі EXR1 чи EXR2 відповідно стандарту [2].

Ключові слова: віконні системи; вибухостійкість; ударна хвиля; натурні випробування.

1. Вступ

Повномасштабна війна в Україні, що триває з 2022 р., кардинально змінила вимоги до безпеки будівель у містах, зокрема в частині їх стійкості до ударних навантажень. Одним з найбільш вразливих елементів конструкції будівель є світлопрозорі огорожувальні конструкції (СОК) - вікна, фасади, двері, скляні перегородки. Пошкодження цих елементів внаслідок вибухів призводить не лише до фізичних руйнувань, а й до утворення небезпечних вторинних уламків, які загрожують життю та здоров'ю людей у приміщеннях [15]. На рис. 1 подано приклад характерних руйнувань світлопрозорих житлових будинків унаслідок вибухових ударів - типовим є повне руйнування скління, пошкодження профілю, виліт фурнітури та уламкове засмічення внутрішнього простору.



Рис. 1. Пошкодження вікон вибуховою хвилею та дрібними уламками, Київська обл., 2025 р. (фото Орленка М.О.)

У бюлетені [14] зазначено: «Анкерна система часто є найслабшою частиною віконної конструкції при дії вибуху. Важливо розглядати всі компоненти віконної системи – раму, скло, кріплення – як єдину цілісність». Багато дослідників [1] вивчали поведінку саме скління, а не СОК із урахуванням всіх їх структурних елементів, але як показали дослідження сучасних вчених, що займаються пов'язаними питаннями [1, 18] поведінка світлопрозорих конструкцій під впливом ударної хвилі може суттєво відрізнятися від теоретичних моделей, а результати вибухового навантаження конструкції суттєво відрізнятися залежно від форми заряду і точки його детонації [12].

В попередній статті [5] співавтор проаналізував існуючі вимоги до огорожувальних світлопрозорих конструкцій в частині вибухостійкості та методи перевірки означених характеристик.

2. Мета і задачі дослідження

Метою проведеного дослідження була експериментальна оцінка стійкості зразків СОК різного складу до дії ударної хвилі, з урахуванням впливу на систему в цілому, та на ключові елементи її конструкції: склопакет, профільну систему, фурнітуру та монтажний вузол, та відшукування конструктивних рішень СОК, які:

- 1) зменшують ймовірність утворення вторинних уламків,
- 2) зберігають цілісність монтажного вузла після вибуху,
- 3) забезпечують часткову або повну працездатність приміщення після атаки.

Це особливо актуально для об'єктів, які мають функціонувати навіть під час бойових дій - освітні установи, медзаклади, органи управління, критична інфраструктура.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні задачі:

1. Розробити програму випробувань, що охоплює декілька послідовних серій натурних випробувань з різними типами конструкцій - від базових до експериментальних рішень;
2. Відібрати конструктивні рішення з різними комбінаціями скла, профілів, фурнітури й монтажних методів (включаючи використання попередньо стиснутої саморозширювальної ущільнювальної стрічки (ПСУС), армування, анкерних пластин тощо), що дозволяють найбільш інформативно оцінити особливості поведінки різних типів елементів СОК під дією ударної хвилі;
3. Визначити параметри навантаження (масу вибухової речовини (ВР), відстань від зразка ВР до зразка СОК, значення піку тиску та імпульсу ударної хвилі), зафіксувати їх за допомогою датчиків у контрольних точках, порівняти виміряні та розрахункові значення, зробити висновки про причини їх розходження;
4. Провести фрактографічний аналіз ушкоджень складових елементів СОК, з документуванням типових руйнувань, поведінки скла, цілісності вузлів, утворення вторинних уламків;
5. Класифікувати результати згідно з вимогами стандартів EXR та рівнями небезпеки РС [13], оцінити клас вибухостійкості EXR систем СОК, за наявності такої можливості;
6. Виявити ключові конструктивні фактори, що забезпечують найкращу поведінку СОК під впливом ударної хвилі;
7. Напрацювати інформаційну базу, із якою можна буде в подальших дослідженнях порівнювати результати досліджень на теоретичних моделях.

3. Методика випробувань

3.1. Загальна програма дослідження

Дослідження стійкості світлопрозорих огорожувальних конструкцій до дії ударної хвилі було реалізовано в чотири серії тестів протягом 2023–2024 рр. У ході натурних випробувань на спеціалізованому полігоні було протестовано 11 зразків віконних конструкцій, що відрізнялись складом скління, профілю, фурнітури та монтажного стику.

Кожна серія випробувань мала окремий набір цілей:

Серії 1–3: тестування вікон різного складу, представлених на будівельному ринку України, із глухою частиною та стулкою;

Серія 4: тестування нових експериментальних конфігурацій із урахуванням досвіду попередніх тестів:

- конструкція з двома стулками;
- ПВХ-профіль з алюмінієвою накладкою;
- алюмінієва конструкція зі штульпом.

3.2. Опис зразків

У процесі натурних полігонних випробувань проаналізовано поведінку одинадцяти зразків СОК при дії вибухового навантаження, що імітує типові сценарії атак на цивільну та критичну інфраструктуру. Конструкції тестувались на відповідність вимогам класів EXR згідно з чинними вітчизняними стандартом [2] та міжнародними аналогами [10, 11, 13, 16].

Ключові характеристики кожного зразка було систематизовано в Таблиці 1 за структурою:

- Конфігурація склопакета (тип та товщина скла, товщина повітряних камер);
- Профіль рами та стулки (марка, матеріал);
- Фурнітура (тип петлевої групи, замикання, обмежувачі);
- Монтажний шов (тип кріплення, ущільнення, стрічки);
- Тип конструкції (глухе, поворотне, двостулкове, штупове);

Усі зразки мали однакові габарити: 1780×1460 мм, площа - 2,6 м².

3.3. Методика та умови випробувань та вимірювальні засоби

Випробування проводились на відкритому спеціалізованому полігоні на базі покинутої промислової будівлі із масивними залізобетонними стінами, що імітують реальні умови монтажу у житлових і адміністративних будівлях. Віконні зразки встановлювались у існуючі зовнішні прорізи зовнішніх стін, безпосередньо у конструктивну частину стіни.

Умови випробувань та їх результати систематизовано в таблиці 2.

Кожен зразок було змонтовано із дотриманням типової технології: із застосуванням монтажної піни, внутрішньої та зовнішньої паропроникної стрічки (типу Illbruck ME 508) та комбінованого кріплення: турбошурупи 7,5×152 мм та анкерні пластини товщиною 1,5 мм.

Для створення ударної хвилі використовувалась вибухівка масою 3 кг (ТНТ). Її розміщували на пінополістирольному підвищенні на контрольних відстанях 5 м чи 3 м від зовнішньої площини вікна.

Для фіксації параметрів вибуху використовувались два п'єзоелектричні датчики тиску DYTRAN 2300V5 (максимально допустимий тиск 34 474 кПа), розташовані в контрольних точках. За їх допомогою визначались:

- P_{so} (інцидентний) і P_{ref} (відбивний) тиск;
- тривалість позитивної фази t_{d+} , мс.

Тести, в яких випробування супроводжувалося інструментальним вимірюванням, позначені у таблиці 2 індексом М (measurement), для інших надаються значення розраховані відповідно розраховані відповідно до емпіричної моделі Kingery–Bulmash [9, 17], позначені індексом С (calculation).

Результати вимірювань відповідають методиці випробування, адаптованій до вимог [3], з урахуванням специфіки натурного випробування на реальному об'єкті.

4. Результати випробувань

4.1. Загальні підходи до аналізу результатів

Аналіз результатів випробувань СОК, стійких до ударної хвилі, здійснювався з урахуванням вимог та класифікацій згідно з нормативними документами [2, 3], а також відповідних міжнародних стандартів [4, 10, 11, 13, 16]. Оцінювання проводилось за такими основними критеріями:

- Рівень максимального тиску та імпульсу ударної хвилі, що фіксувалися за допомогою п'єзоелектричних датчиків;
- Ступінь пошкодження елементів конструкції (скло, профіль, імпост, монтажний вузол);
- Наявність та характер вторинних уламків у зоні захисту;
- Збереження цілісності конструкції та функціональності після впливу;
- Відповідність фактичного результату цільовому EXR-класу (Explosion Resistance Rating) та вимозі відсутності уламків у зоні захисту (критерій NS).

Результати тестів підтверджувалися протоколами випробувань [6-8].

Візуальні спостереження та фрактографічний аналіз пошкоджень доповнювали дані, отримані шляхом фотофіксації з високою роздільною здатністю до та після впливу. Особливу увагу було приділено виявленню слабких зон у вузлах конструкцій, які могли призвести до виходу з ладу всієї системи. У таблицях 1, 2 надано відомості щодо підтвердженого класу стійкості (EXR1, EXR2 тощо), типу профілю, конфігурації конструкції, що дозволяє виявити залежності між конструктивними рішеннями та стійкістю до впливу вибухового навантаження.

Таблиця 1

Характеристики випробуваних зразків

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Код зразка (ID)	S1-01_2022	S1-02_2022	S2-01_2023	S2-02_2023	S3-01_2023	S3-02_2023	S3-03_2023	S4-01_2024	S4-02_2024	S4-03_2024	S4-04_2024
Зовнішнє скло	4LEF	6LEESG	4LEF	4LEF	6LEF	6LEF	4LEF	4LEF	6LEF	4LEF	6LEF
Зовнішній прошарок	14AR	12AR	14AR	14AR	14AR	14AR	14AR	14AR	14AR	14AR	14AR
Проміжне скло	4LEF	4LEF	4F	4LEF	6LEF	6LEF	4LEF	4F	6LEF	4LEF	6LEF
Внутр. прошарок	12AR	12AR	14AR	12AR	14AR	14AR	12AR	14AR	14AR	12AR	14AR
Внутр. скло	44.4VSG (P4A)	44.4VSG (P4A)	4LEF	44.4VSG (P4A)	44.4VSG (P4A)	44.4VSG (P4A)	44.4VSG (P4A)	4LEF+ зах. плівка	44.4VSG (P4A)	44.4VSG (P4A)	44.4VSG (P4A)
Марка профілів	VEKA MD	VEKA MD	EPSILON MD	VEKA MD	Reynaers ML8HI	Reynaers Sunrise	VEKA MD	EPSILON MD	Reynaers Sunrise	VEKA MD	Reynaers Sunrise
Матеріал та товщина профілю	PVC, 82 мм	PVC, 82 мм	PVC, 70 мм	PVC, 82 мм	Al, 77 мм	Al, 77 мм	PVC, 82 мм	PVC, 70 мм	Al, 77 мм	PVC, 82 мм, Al накладка	Al, 77 мм
Тип конструк.	1 ступ. + 1 глуха	1 ступ. + 1 глуха	1 ступ. + 1 глуха	1 ступ. + 1 глуха	1 ступ. + 1 глуха	1 ступ. + 1 глуха	1 ступ. + 1 глуха	1 ступ. + 1 глуха	1 ступ. + 1 ступ.	1 ступ. + 1 ступ.	1 ступ. + 1 ступ. (шпатель)
Фурнітура	Winkhaus ActivPilot RC2	Winkhaus ActivPilot RC2	Axor	Winkhaus ActivPilot RC2	SIEGE-NIA	Winkhaus ActivPilot RC2	Winkhaus ActivPilot RC2	Axor	Winkhaus ActivPilot RC2	Winkhaus ActivPilot RC2	Winkhaus ActivPilot RC2
Монтажний шов	Ext+Int ME 508 Ø7,5×152	Ext+Int ME 508 Ø7,5×152	PU піна	Ext+Int ME 508 Ø7,5×152	Ext+Int ME 508 Ø7,5×152	Ext+Int ME 508 Ø7,5×152	Ext+Int ME 508 Ø7,5×152	PU піна	Ext+Int ME 508 Ø7,5×152	Ext+Int ME 508 Ø7,5×152	Ext+Int ME 508 Ø7,5×152

Таблиця 2

Умови і результати випробувань

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Відстань до заряду, м	5	3	5	5	3	3	3	3	3	3	5
Метод визначення тиску і імпульса	C	C	C	C	M	M	M	C	M	M	C
Пік інцидентного надлишкового тиску, P_{so} , кПа	86	259	86	86	576,3	415,5	564,6	259	324	302,9	86
Пік відбивного надлишкового тиску, P_r , кПа	228	939	228	228	826	892,5	802,1	939	1013,1	1117,2	228
Позитивний імпульс інцидентної фази, I_{so} , кПа·мс	118	187	118	118	264,5*	232,6*	273,3*	187	162,6*	45,7*	118
Цільовий клас EXR	EXR 1 (NS)	EXR 2 (NS)	N/A	EXR 1 (NS)	EXR 2 (NS)	EXR 2 (NS)	EXR 2 (NS)	N/A	EXR 2 (NS)	EXR 2 (NS)	EXR 1 (NS)
Рівень небезпеки	PC 1 (No Hazard)	N/A	N/A	PC 1 (No Hazard)	PC 1 (No Hazard)	PC 1 (No Hazard)	N/A	N/A	N/A	PC 1 (No Hazard)	PC 1 (No Hazard)
Підсумок	Пройшов	Hi	Hi	Пройшов	Пройшов	Пройшов	Hi	Hi	Hi	Пройшов	Пройшов
Фактичний результат EXR	EXR 1 (NS)	FAIL (EXR2 NS)	N/A	EXR 1 (NS)	EXR 2 (NS)	EXR 2 (NS)	FAIL (EXR2 NS)	N/A	FAIL (EXR2 NS)	EXR 2 (NS)	EXR 1 (NS)
Протокол випробування	-	-	-	[8]	[6]	[6]	-	-	[7]	[7]	[7]
Світлина, Рис. №	-	-	-	4	5	6	-	-	7	8	9

Розрахункові показники (С). Для сценаріїв, де інструментальні вимірювання не проводилися, інцидентний (падаючий) надлишковий тиск P_{so} (incident/side-on) та позитивний імпульс I_{so} визначали за емпіричною моделлю Kingery–Bulmash [9, 17] для півсферичного вибуху на поверхні (hemispherical surface burst). Розрахунок позитивного імпульсу виконували за формулою (1), як інтегральний параметр позитивної фази:

$$I_{so} = \int_0^{t_+} P(t) dt, \quad (1)$$

де t_+ - ивалість позитивної фази.

Значення P_{so} брали з КВ-поліномів/таблиць для відповідного інтервалу масштабованої відстані Z , яка визначається за рівнянням

$$Z = R/W^{1/3}, \quad (2)$$

де R - дистанція від заряду до зразка, м; W - маса заряду TNT, кг.

Для контрольних «еталонних» комбінацій, що відповідають вимогам [2] (EXR1: 3 кг та 5 м; EXR2: 3 кг та 3 м), були прийняті референтні значення згідно [17]: EXR1: $P_{so} \approx 86$ кПа, $I_{so} \approx 118$ кПа·мс; EXR2: $P_{so} \approx 259$ кПа, $I_{so} \approx 187$ кПа·мс. Усі розрахункові значення в таблицях позначено індексом С (calculation) та подано в одиницях SI (кПа; кПа·мс) після округлення до цілих. Оцінювана невизначеність методу (модель КВ+геометрія полігону) становить орієнтовно $\pm 5\text{--}10\%$.

Інструментальні вимірювання (М). У тестах із реєстрацією тиску застосовували два п'єзоелектричні датчики тиску DYTRAN 2300V5 (Рис. 2). ДТ№1 встановлювали в зоні монтажного стику (нижня частина рами) врівень із жорсткою таргет-пластиною, площа якої була перпендикулярна до напрямку поширення фронту; він реєстрував відбивний надлишковий тиск P_{ref} і використовувався для оцінки локальних навантажень на вузли (рама–штапик–монтажний стик), але не для зіставлення з нормативними параметрами (Рис. 3 (а)). ДТ№2 розміщували на окремій стійці напроти зразка на тій самій відстані R ; мембрана була паралельна фронту хвилі (side-on), тож датчик реєстрував інцидентний (падаючий) надлишковий тиск P_{so} падаючої ударної хвилі у вільному полі (Рис. 3 (б)). Для порівняння з вимогами [3] використовували безпосередньо виміряні значення P_{so} . Масштабовану відстань обчислювали за формулою (2), приймаючи $W = 3$ кг і $R = 3$ м, $Z \approx 2,08$ м·кг^{-1/3}, а для $W = 3$ кг і $R = 5$ м, $Z \approx 3,47$ м·кг^{-1/3}.



Рис. 2. Схема встановлення вимірювального обладнання [7]

Позитивний імпульс інцидентної фази I_{so} у табл. 2 позначено «*» і обчислено за аналітичною формулою Фрідлендера (3)

$$I_{so} = \kappa P_{so} t_+, \quad (3)$$

де κ - коефіцієнт форми, що приймається $\kappa = 0,30$; t_+ - те саме, що формулі (1), визначалася за сигналом ДТ№2 від моменту приходу фронту до першого перетину нульової лінії; післяінерційні коливання та повільний дрейф базової лінії не враховувалися.

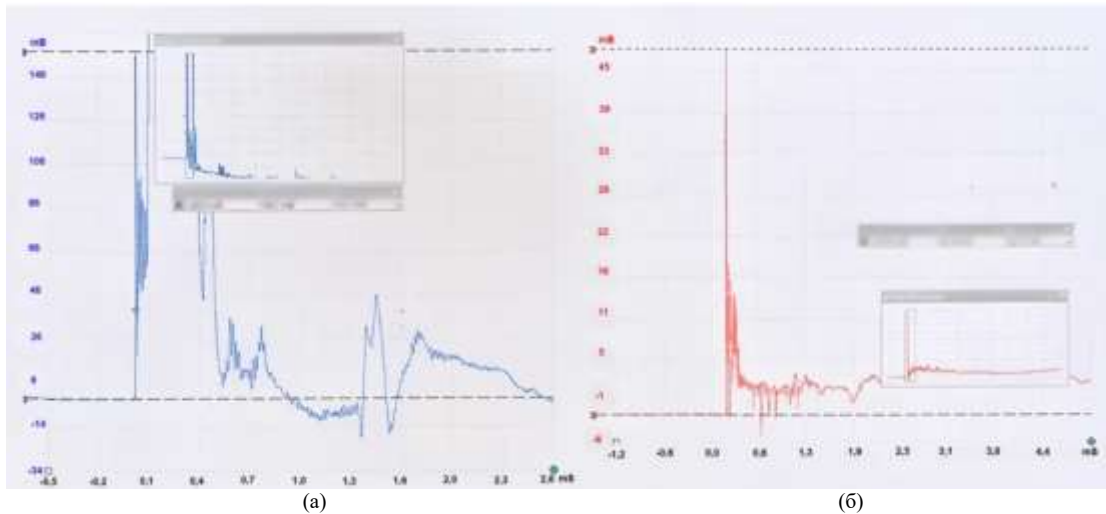


Рис. 3. Графіки змін тиску біля датчиків ДТ№1 (а) і ДТ№2 (б) під час випробування №9 [7]

Усі виміряні величини позначено індексом «М»; у протоколі [7] наведено окремо зафіксовані P_{so} (ДТ№2) та $P_{ref} P_{ref}$ (ДТ№1), а також зазначено випадки втрати сигналу чи пошкодження кабелю.

4.2. Фрактографічний та конструктивний аналіз ушкоджень

Для кожного протестованого зразка після дії ударної хвилі проводився фрактографічний та конструктивний аналіз з метою виявлення характеру руйнувань і локалізації критичних зон. Результати фотофіксації деяких зразків до і після проведення тестів надано на рис. 4-9.

Залежно від типу скла, профілю, вузлів кріплення та конфігурації віконної системи, типові сценарії ушкоджень суттєво різнилися.

Скло

У процесі дослідження було перевірено поведінку різних типів скла у складі склопакетів:

- Флоат-скло продемонструвало характерні радіальні та дугоподібні лінії розломів, які свідчать про крихке руйнування. Часто спостерігалось випадання уламків у напрямку дії ударної хвилі.

- Захисна плівка не забезпечує захисту від руйнування та утворення вторинних елементів враження.

- Загартоване скло (ESG) не дало очікуваних переваг: під час вибухового навантаження воно фрагментувалося на дрібні уламки, які мали потенційно небезпечну кінетичну енергію. Його стійкість виявилась подібною до флоат-скла.

- Ламіноване скло (VSG, типу P4A) показало найбільш передбачувану поведінку. У разі руйнування скло залишалося закріплене на плівковій основі, зменшуючи ризик травмування. Проте важливо зазначити, що ефективність цього рішення залежить від забезпечення цілісності фіксації скла в рамі.

Рама та з'єднання

Критичними точками виявилися кути стулок і рам, особливо в ПВХ-системах без додаткового підсилення. Тут часто фіксувалося локальне відшарування армування, механічна деформація профілю або його повний розрив. У зразках з алюмінієвим профілем ці проблеми не спостерігалися.

У випадку застосування зовнішньої алюмінієвої накладки на ПВХ-профіль фіксувалося значне підвищення стійкості – руйнування профілю не відбувалося навіть за умов досягнення тиску класу EXR2 NS.



Рис. 4. Віконна конструкція зразка №S2-02_2023 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [8]



Рис. 5. Віконна конструкція зразка №S3-01_2023 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [6]



Рис. 6. Віконна конструкція зразка №S3-02_2023 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [6]



Рис. 7. Віконна конструкція зразка №S4-02_2024 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [7]



Рис. 8. Віконна конструкція зразка №S4-03_2024 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [7]



Рис. 9. Віконна конструкція зразка №S4-04_2024 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [7]

Кріплення імпосту та самої конструкції, монтажний.

В конструкціях із комбінованим кріпленням (турбогвинт + анкерна пластина) основними сценаріями руйнування були:

- Руйнування кріплення імпосту;
- Часткове відривання конструкції по монтажному шву;
- Деформація анкерів або втрата зчеплення з несучою конструкцією.
- Зріз анкерного кріплення.

4.3. Групування результатів за EXR-класами

Усі протестовані світлопрозорі конструкції були систематизовані відповідно до отриманих результатів на відповідність класам стійкості до ударної хвилі, згідно з класифікацією EXR (Explosion Resistance Rating), встановленою стандартом [2]. Результати представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

Розподіл результатів випробувань

Клас стійкості		Матеріал профілів		
		PVC, 70-82мм	PVC, 82 мм з Al накладкою	Al, 77мм
		Номер тесту		
Без цільового класу	Зруйновані	3,8		
EXR1	Пройшов	1,4		11
	Не пройшов			
EXR2	Пройшов		10	5,6
	Не пройшов	2,7		9

На початковому етапі дослідження (серії випробувань 1–3) основна увага приділялася випробуванням віконних конструкцій на базі ПВХ-профілю. За результатами натурних тестів було встановлено, що такі конструкції, за умов застосування армування та відповідної фурнітури, здатні забезпечити відповідність класу EXR1 NS (без викиду уламків у захищений простір).

Втім, при переході до рівня EXR2 NS, виявилось, що ПВХ-профілі виявляють недостатню стійкість: найчастіше руйнування виникало у зонах кутових з'єднань, що призводило до втрати цілісності конструкції.

Для досягнення вищого класу стійкості були застосовані альтернативні рішення:

• конструкції на базі алюмінієвого профілю, які успішно пройшли випробування на відповідність класу EXR2 NS;

• комбіновані системи, у яких ПВХ-профіль підсилювався зовнішніми алюмінієвими накладками. Це дозволило зберегти економічну ефективність пластикових конструкцій, водночас досягнувши необхідного рівня вибухозахисту.

На завершальному етапі дослідження були випробувані нові конструктивні типи: зразок з двома стулками та алюмінієвий штульповий варіант. Конструкція з двостулковим відкриванням не змогла пройти випробування на EXR2 NS через руйнування зони кріплення імпосту, що потребує подальших інженерних удосконалень. Натомість алюмінієва штульпова система успішно пройшла випробування на рівень EXR1 NS.

Таким чином, групування результатів за EXR-класами дозволило:

- чітко виявити межу ефективності стандартних ПВХ-рішень;
- підтвердити ефективність застосування алюмінієвих систем для підвищення рівня вибухозахисту;
- обґрунтувати доцільність інженерної модифікації конструкцій на основі комбінованих матеріалів.

Висновки. Проведення серії випробувань у 2023-2024 рр. дозволило отримати наступні результати:

- Визначити межі ефективності вікон різного складу конструкцій.

• Візуалізувати слабкі місця для кожної конфігурації методами фотофіксації та інструментального вимірювання параметрів вражаючих факторів.

• Закласти підґрунтя для формування рекомендацій щодо доцільних комбінацій профілю, скла та монтажних рішень при проектуванні конструкцій, стійких до ударної хвилі.

Як видно з результатів, наявні на будівельному ринку України продукти архітектурного скла, віконних профілів, фурнітури та кріплень дозволяють виготовляти СОК, що відповідають класам стікості EXR1 та EXR2. При цьому поведінка СОК під впливом ударної хвилі також залежить від конфігурації вікна: його розмірів, пропорцій, а також типу відкривання, розмірів та пропорцій окремих його секцій тощо.

Дане питання має стати предметом дослідження на наступних етапах.

Подяки / Фінансування. Практичні випробування були профінансовані та матеріально підтримані чотирма компаніями: ТОВ «Вікна-Стар», «Вінкхаус Україна», «Рейнарс Алюмініум» та Glas Trösch Ukraine. Фінансувальники не впливали на проектування, дослідження, збирання та аналіз даних, ухвалення рішення про публікацію або підготовку рукопису.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Басок Б.І., Недбайло О.М. Стійкість світлопрозорих конструкцій до впливу вибуху боеприпасу. Огляд методів дослідження та аналіз окремих результатів / Теплофізика та теплоенергетика. – 2024 – Вип. 46 (3), С. 69-81.
2. ДСТУ EN 13123-2:2006. Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Класифікація. Частина 2: Полігонне випробування. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 2 с
3. ДСТУ EN 13124-2:2006. Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Метод випробування. Частина 2: Полігонне випробування. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 11 с.
4. ДСТУ EN 13541:2014. Склопакети. Вибухостійке захисне скління. Випробування та класифікація. Київ: Міністерства економічного розвитку і торгівлі України, 2014. 10 с.
5. Орленко М.О. Випробування світлопрозорих конструкцій на стійкість до ударної хвилі: аналіз міжнародних стандартів та перспективи їх застосування в Україні // Сучасні проблеми архітектури і містобудування. -Вип. 71 (2025), Київ: КНУБА, 2025, с. 658-669.
6. Протокол випробування №345-В/2023 вікон вибухотривких від 27 вересня 2023 р. / Науково-випробувальний відділ науково-дослідного центру випробувань, експертизи та сертифікації персональних броньованих засобів Національного університету оборони України. – 10 арк.
7. Протокол випробування №796-В/2024 вікон вибухотривких від 28 грудня 2024 р. / Науково-випробувальний відділ науково-дослідного центру випробувань, експертизи та сертифікації персональних броньованих засобів Національного університету оборони України. – 9 арк.
8. Протокол №4317/2023 випробувань вікна, наданого ТОВ «Компанія Вікна-Стар» від 22 травня 2023 р. / ВЛ Товариства з обмеженою відповідальністю «Науково-інженерний центр випробувань виробів та матеріалів захисту». – 5 арк.
9. AASTP-1. Manual of NATO Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives / NATO International Staff – Defense Investment Division. 588 с.
10. ASTM F1642/F1642M-17. Standard Test Method for Glazing and Glazing Systems Subject to Airblast Loadings. ASTM International, 2017. 6 с.
11. ASTM F2248-19. Standard Practice for Specifying an Equivalent 3-Second Duration Design Loading for Blast Resistant Glazing Fabricated with Laminated Glass. ASTM International, 2019. 5 с
12. Bisys, S.P., Korbach, V.G., Davydovskiy, L.S. et al. Assessment of the Armor Plate Response to the Blast Action of Differently-Shaped Charges in Air and in a Metallic Container. Strength Mater 52, 900–907 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00243-9>
13. GSA-TS01:2003. Standard test method for glazing and window systems subject to dynamic overpressure loadings. US General Services Administration, 2003. 6 с.
14. Information Bulletin: Blast Protection for Windows. Publications UN Department of Safety and Security. Division of Specialized Operational Support Physical Security Unit (PSU), 2021. 39 с.
15. Insulate Ukraine. How to save Ukraine's broken windows (відео на YouTube) [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=AZ3eprDmUd4>, вільний. – Назва з екрана.
16. ISO 16933:2007-07. Glass in building — Explosion-resistant security glazing — Test and classification for arena air-blast loading. International Organisation for Standardisation, 2007. 22 с.
17. Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator: [Електронний ресурс] URL: <https://unsafeguard.org/un-safeguard/kingery-bulmash> (дата звернення: 20.10.2025)
18. Zhang X., Hao H. The response of glass window systems to blast loadings: An overview // International Journal of Protective Structures. – 2016. – Vol. 7, iss.1. – P. 123–54.
19. UFC 4-010-01. United Facilities Criteria. DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings. Change 3. USA, DoD, 2024. 95 р.

REFERENCES

1. Basok B.I., Nedbailo O.M. Stiykist' svitloprozorykh konstruktсий do vplyvu vybukhu boyepriypasiv (Resistance of Transparent Structures to Explosion Influences. Overview of Research Methods and Analysis of Individual Results) / Teplofizyka ta Teploenerhetyka – 2024 – Vol. 46 (3), P. 69-81 (in Ukrainian)
2. DSTU EN 13123-2:2006. Vikna, dveri ta zhalyuzi. Stiykist do vybuchu. Klyasyfikatsiya. Chastyna 2: Polihonne vyprobuвання (Windows, doors and shutters. Resistance to explosion. Classification. Part 2: Field test). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. – 2 p. (in Ukrainian)

3. DSTU EN 13124-2:2006. Vikna, dveri ta zhalyuzi. Stiykist' do vybukhu. Metod vyprovuvannya Chast. 2. Plihone vyprovuvannya [Windows, doors and jalousie. Explosion resistance. Testing method. Part 2. Field test]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. 11 p. (in Ukrainian)
4. DSTU EN 13541:2014. Sklopakety. Vybukhostiye zakhyse sklinnya. Vyprovuvannya ta klasyfikatsiya [Insulated glass units. Explosion resistant protective glazing. Tests and classification.] Kyiv: Ministry of economical development and trading of Ukraine, 2014. 10 p (in Ukrainian)
5. *Orlenko M. O.* Vyprovuvannya svitloprozorykh konstruksiy na stiykist do udarnoy khvyli (Testing Translucent Structures for Shock Wave Resistance: Analysis of International Standards and Prospects for their Application in Ukraine) // *Suchasni problem arkhitektury i mistobuduvannya* (Contemporary problems of architecture and urbanism). – Vyp. 71 (2025), Kyiv: KNUCA, 2025, s. 658-669. (in Ukrainian)
6. Test protocol №345-V/2023 of blast-resistant windows from September 27th of 2023/ Research and test department of research center for testing, expertise and certification of means of personal protection of National university of defense of Ukraine – 10 p. (in Ukrainian)
7. Test protocol №796-V/2024 of blast-resistant windows from December 28th / Research and test department of research center for testing, expertise and certification of means of personal protection of National university of defense of Ukraine – 9 p. (in Ukrainian)
8. Protocol №4317/2024 of the tests of the window submitted by LTD “Kompaniya Vikna-Star” from May 22th 2023 / LTD “Research center for tests of products and materials for protection” – 5 p. (in Ukrainian)
9. AASTP-1. Manual of NATO Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives / NATO International Staff – Defense Investment Division. 588 p.
10. ASTM F1642/F1642M-17. Standard Test Method for Glazing and Glazing Systems Subject to Airblast Loadings. (2017) ASTM International. 6 p.
11. ASTM F2248-19. Standard Practice for Specifying an Equivalent 3-Second Duration Design Loading for Blast Resistant Glazing Fabricated with Laminated Glass. (2019) ASTM International. 5 p.
12. *Bisys, S.P., Korbach, V.G., Davydovsky, L.S. et al.* Assessment of the Armor Plate Response to the Blast Action of Differently-Shaped Charges in Air and in a Metallic Container. *Strength Mater* 52, 900–907 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00243-9>
13. GSA-TS01:2003. Standard test method for glazing and window systems subject to dynamic overpressure loadings. (2003) US General Services Administration. 6 p.
14. Information Bulletin: Blast Protection for Windows. Publications UN Department of Safety and Security. Division of Specialized Operational Support Physical Security Unit (PSU), 2021. 39 c.
15. Insulate Ukraine. How to save Ukraine's broken windows (YouTube video) [Online resource]. – 2024. – Access link: <https://www.youtube.com/watch?v=AZ3eprDmUd4>.
16. ISO 16933:2007-07. Glass in building — Explosion-resistant security glazing — Test and classification for arena air-blast loading. (2007) International Organisation for Standardisation. 22 p.
17. Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator : [Online resource] URL: <https://unsafeguard.org/un-safeguard/kingery-bulmash> (version from 10.20.2025)
18. *Zhang X., Hao H.* The response of glass window systems to blast loadings: An overview // *International Journal of Protective Structures*. – 2016. – Vol. 7, iss.1. – P. 123–54.
19. UFC 4-010-01. United Facilities Criteria. DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings. Change 3. USA, DoD, 2024. 95 p.

Стаття надійшла 31.10.2025

Орленко М.О., Буравченко В.С., Бісик С.П.

ДОСВІД НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА СТИЙКІСТЬ ДО УДАРНОЇ ХВИЛІ ВІКОННИХ БЛОКІВ РІЗНОГО СКЛАДУ

У цій роботі розглядається досвід серії практичних випробувань зразків світлопрозорих конструкцій на стійкість до впливу ударної хвилі. Випробування проводилися в 2023-2024 рр. на полігоні поблизу м.Києва на території покинутої промислової будівлі. Зразки мали однаковий розмір, але відрізнялися матеріалом та маркою профілів (ПВХ та алюміній), наявністю додаткового підсилення, типом та товщиною листів скла, маркою фурнітури. Більшість складалася з однієї глухих секції та однієї стулки, розділених центральною стійкою, окрім останніх тестів, де випробувалися зразки інших конфігурацій. За результатами випробувань деяким зразкам було надано класи стійкості до ударної хвилі EXR1 чи EXR2, що підтверджується протоколами випробувань.

Випробування супроводжувалися фотофіксацією зразків до і після тесту та вимірюваннями умов за допомогою датчиків тиску з обох боків від заряду вибухівки.

Статистика результатів випробувань показує, що використання ламінованого скла є необхідною передумовою забезпечення класу стійкості та попередження виникнення вторинних вражаючих елементів. При цьому використання захисних плівок та загартованого скла не надає очікуваних переваг.

Вікна з профілями з ПВХ товщиною 82 мм здатні забезпечити клас стійкості EXR1, але при більшій навантаженні призводять до руйнування профілів і проникнення уламків у приміщення. Для забезпечення класу EXR2 потрібне використання алюмінієвих профілів чи ПВХ із підсиленням. При цьому зразок вікна із двома стулками в аналогічних умовах зазнав руйнування. Таким чином результат також залежить не тільки від складу, але й від конфігурації вікна – співвідношення в ньому глухих секцій та стулок. Дослідження цього фактору методами цифрового моделювання та натурних випробувань планується в наступних роботах авторів.

Дослідження є важливим, як напрямок зменшення шкоди життю і здоров'ю населення країн, що зазнають руйнувань через воєнні дії.

Ключові слова: віконні системи, вибухостійкість, ударна хвиля, натурні випробування.

Orlenko M.O., Buravchenko V.S., Bisyk S.P.

EXPERIENCE OF FIELD TESTS OF WINDOW UNITS OF VARIOUS COMPOSITION FOR SHOCK WAVE RESISTANCE

This paper reviews the experience of a series of practical tests of samples of translucent structures for resistance to shock wave. The tests were conducted in 2023-2024 at a testing range near Kyiv in the territory of an abandoned industrial building. The samples had the same size, but differed in the material and brand of profiles (PVC and aluminum), the presence of additional reinforcement, the type and thickness of glass sheets, and the brand of fittings. Most consisted of one blind section and one sash, separated by a central rack, except for the last tests, where samples of other configurations were tested. According to the test results, some samples were assigned shock wave resistance classes EXR1 or EXR2, which is confirmed by the test protocols.

The tests were accompanied by photos of samples before and after the test and measurements of conditions using pressure free-field (side-on) sensor and reflected target sensor near the specimen.

The statistics of the test results show that the use of laminated glass is a necessary prerequisite for ensuring the resistance class and preventing the occurrence of secondary impact elements. At the same time, the use of protective films and tempered glass does not provide the expected advantages.

Windows with PVC profiles with a thickness of 82 mm are able to provide the resistance class EXR1, but at higher loads they lead to the destruction of the profiles and the penetration of fragments into the room. To ensure the EXR2 class, it is necessary to use aluminum profiles or PVC with reinforcement. In this case, a sample of a window with two sashes was destroyed under similar conditions. Thus, the result also depends not only on the composition, but also on the configuration of the window - the ratio of blind sections and sashes in it. The study of this factor using digital modeling methods and full-scale tests is planned in the authors' subsequent works.

The study is important as a direction for reducing harm to the life and health of the population of countries have suffered damage due to military actions.

Keywords: glazing systems, explosion resistance, shock wave, field tests.

УДК 699.9

Орленко М.О., Буравченко В.С., Бісик С.П. Досвід натурних випробувань на стійкість до ударної хвилі віконних блоків різного складу // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник. – К.: КНУБА, 2025. – Вип. 115. – С. 383-395.

У цій роботі наведено узагальнений досвід серії проведених в 2023-2024 рр. натурних випробувань віконних блоків на стійкість до ударної хвилі. Зібрані віконні блоки відрізнялися схемою, складом склопакетів, маркою ПВХ чи алюмінієвих профілів, фурнітури та наявністю додаткових підсилень. За результатами випробувань деяким зразкам було надано класи стійкості до ударної хвилі EXR1 чи EXR2.

Табл. 3. Іл. 9. Бібліогр. 19 назв.

UDC 699.9

Orlenko M.O., Buravchenko V.S., Bisyk S.P. Experience of Field Tests of Window Units of Various Composition for Shock Wave Resistance // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2025. – Issue 115. – P. 383-395.

This paper presents a generalized experience of a series of field tests of window blocks for shock wave resistance conducted in 2023-2024. The assembled window blocks differed in their scheme, composition of glass units, brand of PVC or aluminium profiles, fittings and the presence of additional reinforcements. According to the test results, some samples were given the shock wave resistance classes EXR1 or EXR2.

Tabl. 3. Fig. 9. Ref. 19.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): аспірант кафедри архітектурних конструкцій КНУБА ОРЛЕНКО Михайло Олександрович.

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, пр. Повітряних сил 31, КНУБА, кафедра архітектурних конструкцій, ОРЛЕНКО М.О.

Тел.: +38(050) 441-67-67

E-mail: orlenko_mo-2022@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0001-9890-4520>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри архітектурних конструкцій КНУБА БУРАВЧЕНКО Всеволод Сергійович.

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, пр. Повітряних сил 31, КНУБА, кафедра архітектурних конструкцій, БУРАВЧЕНКО В.С.

Тел.: +38(050) 358-48-53

E-mail: buravchenko.vs@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0907-3014>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, начальник науково-випробувального відділу Національного університету оборони України БІСИК Сергій Петрович.

Адреса: 03049 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил 28, НУОУ, науково-випробувальний відділ, БІСИК С.П.

Тел.: +38(097) 715-15-11

E-mail: sergey-new@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5009-2113>