

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

М. М. БОНДАРЕНКО, М. О. ОРЛЕНКО,
Д. В. ФІРСОВ

**Сучасні аспекти
проєктування та технології
монтажу світлопрозорих
конструкцій**

Монографія

Київ
Видавництво Ліра-К
2026

УДК 692.23:69.057

Б81

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Київського національного університету будівництва і архітектури
(протокол № 43 від 28.05.2026р.)*

Рецензенти:

Тугай О. А., д.т.н., професор завідувач кафедри організації та управління будівництвом, Київський національний університет будівництва і архітектури (м. Київ)

Шумаков І. В., д.т.н., професор завідувач кафедри технології та організації будівельного виробництва, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова (м. Харків)

Бондаренко М. М., Орленко М. О., Фірсов Д. В.

Б81 Сучасні аспекти проектування та технології монтажу світлопрозорих конструкцій : монографія / М. М. Бондаренко та ін. – Київ : Видавництво Ліра-К, 2026. – 117 с.

ISBN 978-617-9002-20-5

Викладено науково-прикладні основи специфічного напрямку організаційно-технологічної підготовки будівництва з урахуванням особливостей проектування та технології монтажу світлопрозорих конструкцій в частині стійкості до ударних навантажень та організаційно-технологічних рішень застосування віконних та дверних конструкцій з полівінілхлориду в пам'ятках архітектури.

УДК 692.23:69.057

ISBN 978-617-9002-20-5

© М. М. Бондаренко, М. О. Орленко,
Д. В. Фірсов, 2026

© Видавництво Ліра-К, 2026

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ СВІТЛОПРОЗОРИ КОНСТРУКЦІЇ У ПАМ'ЯТКАХ	
АРХІТЕКТУРИ. АКТУАЛЬНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ	8
1.1. Аналіз діючого законодавства та будівельних норм	8
1.2. Світовий досвід застосування вікон з ПВХ у пам'ятках архітектури	12
1.3. Фактори впливу на вибір та застосування вікон з ПВХ у пам'ятках архітектури	19
1.4. Типові рішення та рекомендації з проєктування та монтажу вікон з ПВХ у об'єктах архітектурної спадщини.....	24
Висновки до розділу 1	32
РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ МОНТАЖУ СВІТЛОПРОЗОРИХ	
КОНСТРУКЦІЙ	34
2.1. Аналіз сучасного стану технології та організації виконання монтажу світлопрозорих конструкцій	34
2.2. Впливи і систематизація організаційних факторів при виконанні монтажу	38
2.3. Фактори навантаження та засоби кріплення віконних конструкцій.....	44
2.4. Приклади виконання робіт	50
2.5. Екологічні фактори при виконанні робіт.....	55
Висновки до розділу 2.....	57
РОЗДІЛ 3. УЛАМКОВА ДІЯ НА СВІТЛОПРОЗОРИ ОГОРОДЖУВАЛЬНІ	
КОНСТРУКЦІЇ.....	59
3.1 Феноменологія уламкоутворення при вибуху поблизу світлопрозорих конструкцій	59
3.1.1 Класифікація уражальних факторів вибуху	59
3.1.2 Часова послідовність дії хвилі та уламків	61
3.1.3 Роль світлопрозорих конструкцій у загальній картині уражальної дії	62
3.1.4 Межі нормативного оцінювання уламкової дії	63
3.1.5 Огляд підходів до феноменологічного опису уламкоутворення.....	64
3.1.6 Типи загроз та поєднання уражальних дій.....	65
3.2 Характеристики поля первинних уламків і вихідні дані для оцінювання	67
3.2.1 Класифікація засобів ураження за характером поля первинних уламків	67
3.2.2 Аналітичні моделі формування поля первинних уламків.....	68
3.2.3 Вихідні дані для оцінювання сучасної уламкової загрози	70
3.2.4 Просторовий і кутовий розподіл поля уламків: значення для СОК.....	71
3.2.5 Параметри загрози та межі нормативного підтвердження	72
3.3 Вторинні уламки та небезпека руйнування СОК	73
3.3.1 Класифікація вторинних уламків при вибуховому навантаженні на будівлю	73

3.3.2	Механіка руйнування скла і утворення вторинних уламків	74
3.3.3	Кількісні характеристики скляних уламків і критерії небезпечності	75
3.3.4	Система оцінювання небезпечності — hazard rating	76
3.3.5	Роль прошарку і плівки в утриманні вторинних уламків	77
3.4	Уламкостійкість матеріалів та елементів СОК	78
3.4.1	Фізичні механізми взаємодії уламка зі склінням	79
3.4.2	Механічні характеристики матеріалів СОК при ударному навантаженні	80
3.4.3	Балістичні стандарти для скління: EN 1063 і EN 1522/1523	81
3.4.4	FEBR та підтвердження кількох захисних властивостей	83
3.4.5	Вимоги до репрезентативного ударника	83
3.4.6	Чисельне моделювання уламкостійкості СОК	85
3.5	Сумісна дія ударної хвилі та уламків на СОК	86
3.5.1	Хронологія і просторова структура комбінованого навантаження	86
3.5.2	Механізми погіршення властивостей конструкції при комбінованому навантаженні	87
3.5.3	Типові сценарії руйнування СОК при комбінованому навантаженні	88
3.5.4	Підходи до аналітичного і чисельного опису комбінованого навантаження	88
3.5.5	Взаємодія ударної хвилі і вторинних уламків (уламки скла + хвиля)	89
3.5.6	Стан досліджень: що відомо і що залишається відкритим	90
3.5.7	Практичне значення: уроки для проєктування СОК в умовах збройного конфлікту	91
3.6	Методи випробувань і нормативне оцінювання уламкостійкості СОК	92
3.6.1	Карта стандартів у сфері захисту СОК від вибухових і балістичних навантажень ..	92
3.6.2	Матриця покриття стандартів	97
3.6.3	Методичні перешкоди для комбінованого оцінювання	98
3.6.4	Стан нормативної бази України	99
3.6.5	Можливі підходи до розробки нормативного методу	100
3.7	Напрями досліджень і рекомендації щодо підтвердження захисту	101
3.7.1	Пріоритетні напрями фундаментальних і прикладних досліджень	101
3.7.2	Практичні рекомендації для проєктування і оцінювання СОК	104
3.7.3	Пропозиції щодо включення уламкостійкості до нормативної бази України	106
	Висновки до розділу 3	107
	Загальні висновки	109
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	112

ВСТУП

Світлопрозорі конструкції формують архітектурний образ будівлі, забезпечують природне освітлення та беруть участь у створенні належних умов її експлуатації. Їхні властивості залежать від поєднання конструктивного рішення з технологією встановлення у стіновий проріз. Для об'єктів архітектурної спадщини до цих вимог додається збереження автентичності, а в умовах збройного конфлікту особливого значення набуває обмеження небезпеки руйнування скління. Взаємозв'язку цих завдань присвячено цю монографію.

Оновлення вікон у будівлях, що мають історичну та архітектурну цінність, потребує обґрунтованого вибору матеріалів і способів виконання робіт. Поліпшення енергоефективності та комфорту користування слід узгоджувати зі збереженням цінних елементів пам'ятки, рисунка віконних заповнень і характеру фасаду. Можливості застосування сучасних систем залежать від стану об'єкта, значення його вікон для архітектурної автентичності та умов допустимого втручання. Міжнародний досвід і результати експертного оцінювання допомагають визначити чинники вибору, проте остаточне рішення потребує дослідження самої пам'ятки.

Проектні характеристики віконної конструкції необхідно узгоджувати з технологією монтажу. Передача навантажень на стіну, герметичність примикання та захист монтажного шва від зволоження залежать від спільної роботи всіх елементів вузла. Кріплення й матеріали герметизації добирають з урахуванням будови стіни, розмірів і маси виробу, його положення у прорізі та умов експлуатації. Організаційна підготовка робіт і контроль виконання мають забезпечувати відтворення проєктного рішення на будівельному майданчику.

Відновлення пошкоджених будівель загострює питання безпеки скління. Під час вибуху на конструкцію можуть впливати повітряна ударна хвиля та зовнішні уламки, а руйнування самого заповнення створює додаткову небезпеку для людей. Обґрунтування захисного рішення потребує розмежування цих впливів та оцінювання роботи скління разом із рамою, кріпленнями й опорною

конструкцією. Це безпосередньо пов'язує дослідження уламкової дії з питаннями проєктування та монтажу.

Метою монографії є узагальнення наукових і прикладних підходів до вибору, проєктування та монтажу світлопрозорих конструкцій з урахуванням особливостей архітектурної спадщини, умов експлуатації та уламкових загроз. Для цього розглянуто чинники застосування сучасних віконних систем у пам'ятках архітектури, систематизовано вимоги до монтажних рішень і проаналізовано можливості підтвердження захисних властивостей огорожень. Окрему увагу приділено межах використання наявних методів випробувань та завданням подальших досліджень.

Об'єктом розгляду є світлопрозорі огорожувальні конструкції у складі будівель, зокрема віконні системи та їхні примикання до стін. Предмет монографії охоплює умови їх застосування, організаційно-технологічні рішення монтажу й підходи до оцінювання поведінки під дією уламків та ударної хвилі. Матеріал ґрунтується на аналізі нормативних документів і наукових публікацій, узагальненні практичних рішень, експертному оцінюванні факторів вибору вікон та зіставленні методів випробувань.

У першому розділі розглянуто нормативні передумови й міжнародний досвід використання вікон із полівінілхлориду в пам'ятках архітектури. Наведено фактори прийняття рішень і типові варіанти проєктування та монтажу за умови збереження автентичності об'єкта. Другий розділ присвячено технологічним і організаційним вимогам до монтажу. У ньому систематизовано навантаження, засоби кріплення та функціональні рівні монтажного шва, розглянуто приклади виконання робіт і пов'язані з ними екологічні питання.

Третій розділ охоплює механізми уламкоутворення, характеристики первинних уламків, небезпеку вторинних уламків скла та поведінку конструкцій за комбінованого навантаження. Зіставлено нормативні методи оцінювання вибухостійкості й балістичного опору, визначено їхні обмеження стосовно уламкової загрози. Запропоновані напрями експериментальних і чисельних досліджень спрямовано на перевірку роботи повної конструкції та її залишкової

стійкості після пошкодження. Конкретні рівні захисту мають підтверджуватися відповідними випробуваннями.

Монографію адресовано науковцям, проєктувальникам, фахівцям із реставрації та організації будівництва, виробникам і монтажникам світлопрозорих конструкцій, а також здобувачам будівельних спеціальностей. Наведені положення покликані допомогти узгодити вимоги до об'єкта з вибором конструкції, виконанням монтажу та перевіркою заявлених властивостей.

Ключові слова: автентичність вікон, активні та пасивні будинки, архітектура, архітектурно-історична цінність, балістична межа, балістична стійкість, безпілотні літальні апарати, будівельні конструкції, будівництво, будівельні процеси, вибір технології монтажу, вибухові навантаження, вибухостійкість, віконна конструкція, відновлення, відтворення, віконні блоки, віконні системи з полівінілхлориду, віконні системи, вибухова хвиля, вторинні уламки, готові вражаючі елементи, динамічні навантаження, експертне дослідження, експертне опитування, енергоефективне малоповерхове будівництво, енергозбереження, енергоефективні рішення, енергоефективність будівель, загартоване скло, залишкова стійкість, засоби ураження, інноваційний підхід у будівництві, історична ідентичність, кінетична енергія уламків, класи навантаження, класи небезпеки, класи уламкостійкості, комбіноване навантаження, ламіноване скло, малоопераційні системи монтажу, метод скінченних елементів, методи реставрації, методика досліджень, модель вибуху, монтаж вікон, напружено-деформований стан, натурні випробування, національний додаток, нормативна база, об'єкт реставрації, обґрунтування методів, об'єкти критичної інфраструктури, об'ємно-планувальні рішення, організаційно-технологічні моделі, організаційно-технологічні обмеження, організаційно-технологічні рішення, організація будівництва, осколки скла, пам'ятки архітектури, параметри фронту робіт, первинні уламки, пластичні деформації, полігонне випробування, пристосованість методів виконання, проєктування світлопрозорих конструкцій, проєктування, раціональна технологія, раціональне конструктивне рішення, раціональні методи монтажу, реставраційні процеси, реставрація, рівень автентичності, світлопрозорі огорожувальні конструкції, сучасні тенденції у застосуванні ПВХ конструкцій, технологічна продуктивність, технологія монтажу, типові рішення, ударна хвиля, уламковий потік, уламкостійкість, улаштування віконних конструкцій з полівінілхлориду, фактори впливу, характеристичні параметри, чисельне моделювання.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ СВІТЛОПРОЗОРІ КОНСТРУКЦІЇ У ПАМ'ЯТКАХ АРХІТЕКТУРИ. АКТУАЛЬНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ

1.1. Аналіз діючого законодавства та будівельних норм

Важливість і значимість об'єктів нерухомої спадщини переоцінити неможливо. «Архітектурний код» нації розповідає про нас набагато більше, ніж може здатись на перший погляд. Традиції у будівництві, проєктуванні, використанні тих чи інших будівельних матеріалів, зовнішня естетика будівель – це все дає можливість вивчати і систематизувати знання про нас як націю, етнос та, що найважливіше, передавати ці знання наступним поколінням.

Збереження пам'яток архітектури для нащадків є таким же важливим завданням сучасників, як і розвиток культури, науки, літератури, образотворчого мистецтва тощо. І саме державна політика, яка спрямована на захист та розвиток «культурного коду», має бути одним із пріоритетних напрямків у будь-які часи.

Сучасна українська держава усвідомлює важливість і значимість об'єктів культурної, історичної та архітектури спадщини, вибудувавши відповідне законодавство (рис. 1.1) та чітко зазначивши у Конституції України [1]:

- Стаття 11: *«Держава сприяє консолідації та розвитку української нації, її історичної свідомості, традицій і культури, а також розвитку етнічної, культурної, мовної та релігійної самобутності всіх корінних народів і національних меншин України»;*
- Стаття 54: *«Культурна спадщина охороняється законом. Держава забезпечує збереження історичних пам'яток та інших об'єктів, що становлять культурну цінність, вживає заходів для повернення в Україну культурних цінностей народу, які знаходяться за її межами».*

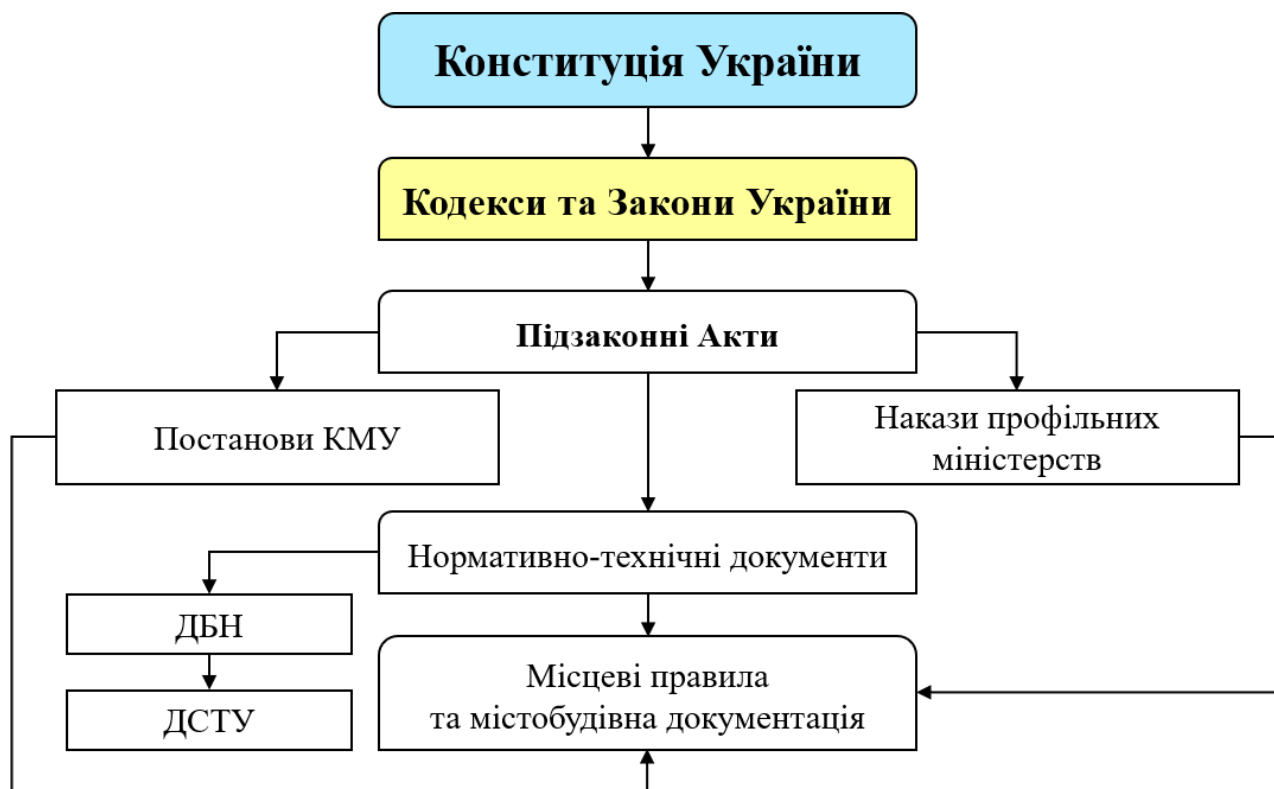


Рис. 1.1. Вертикаль законодавства у сфері будівництва в Україні

(узагальнення автора)

Проте самого захисту недостатньо. Цілком природньо, що об'єкти культурної спадщини потребують особливого догляду та відповідних умов зберігання. Пам'ятки ж архітектури ще й експлуатуються, а значить періодично потребують проведення реставраційних робіт. Окрема категорія «щойно виявлених об'єктів архітектурної спадщини» може потребувати відтворення в цілому. І ці процеси мають бути регламентованими й чітко визначеними.

Основні засади державної політики у сфері захисту культурної та архітектурної спадщини, що зафіксовані в Конституції України, реалізуються в Законах та підзаконних Актах, Державних будівельних нормах та Державних стандартах, а також у системі містобудівної документації.

Базовим законом щодо пам'яток архітектури, який реалізує засадничі положення Конституції, є Закон України «Про охорону культурної спадщини» [2], який чітко зазначає, що «...цей Закон регулює правові, організаційні, соціальні та економічні відносини у сфері охорони культурної спадщини як одного з головних елементів національних інтересів України з метою її збереження, використання об'єктів культурної спадщини у суспільному житті, захисту традиційного

характеру середовища в інтересах нинішнього і майбутніх поколінь». Окрім цього, Закон класифікує об'єкти культурної спадщини, визначає роль Держави, повноваження та функції центральних і місцевих органів влади, регулює права та доступ до об'єктів спадщини, визначає порядок реєстрації і забезпечує охорону та захист об'єктів культурної спадщини. Також цей закон визначає терміни і дає таке визначення поняття реставрації, як «...сукупність науково обґрунтованих заходів щодо укріплення (консервації) фізичного стану, розкриття найбільш характерних ознак, відновлення втрачених або пошкоджених елементів об'єктів культурної спадщини із забезпеченням збереження їхньої автентичності».

Вагому значимість для реставраційних процесів на об'єктах нерухомої спадщини мають Закони України «Про архітектурну діяльність» [3], який визначає правові та організаційні засади здійснення архітектурної діяльності, та «Про регулювання містобудівної діяльності» [4], який встановлює правові та організаційні основи містобудівної діяльності, зокрема і щодо пам'яток архітектури.

Для практичного впровадження вимог та положень зазначених вище Конституції та Законів України, передбачені підзаконні Акти у вигляді Постанов Кабінету Міністрів України та Наказів профільного міністерства. І одним з головних документів є Постанова Кабінету Міністрів України від 22 червня 2026 р. № 795 «Про затвердження кваліфікаційних вимог до науково-проектних, науково-дослідних організацій, що є розробниками науково-проектної документації у сфері охорони культурної спадщини» [8].

Важливо зазначити, що пам'ятки архітектури відносяться до об'єктів класу ССЗ і, відповідно до вимог Закон України «Про ліцензування видів господарської діяльності» [5], у виконавця реставраційних робіт має бути відповідна ліцензія. Перелік органів, що уповноважені видавати відповідні ліцензії, затверджений у Постанові Кабінету Міністрів України «Про затвердження переліку органів ліцензування та визнання такими, що втратили чинність, деяких постанов Кабінету Міністрів України» від 5 серпня 2015 р. № 609 [6]

Спеціалізований (галузевий) рівень законодавства представлений у вигляді нормативних документів- Державні Будівельні Норми (ДБН) та Державні стандарти України (ДСТУ). Не дивлячись на назву, ДНБ має силу закону у будівельній галузі та є обов'язковим до виконання.

Єдиними діючими ДБН у сфері реставрації об'єктів нерухомої спадщини є ДБН А.2.2-14:2016 "Склад та зміст науково-проектної документації на реставрацію пам'яток архітектури та містобудування" із Зміною № 1 [7], які *«...встановлюють вимоги до складу та змісту науково-проектної документації на вид будівництва – “реставрація”, що складається з таких видів робіт і заходів: консервація, реставрація, реабілітація, музеєфікація, ремонт (реставраційний), пристосування пам'яток, а також на невідкладні консерваційні та протиаварійні роботи»*. Даний документ окрім перерахованих складових, дає визначення термінів та понять, встановлює склад та зміст попередніх робіт на об'єкті; визначає склад та зміст наукових досліджень об'єкту й науково-проектної документації на протиаварійні або невідкладні консерваційні роботи; описує склад та зміст ескізного, робочого та загального проекту, робочої документації та науково-реставраційного звіту.

Останньою ланкою законодавчої вертикалі у сфері будівництва є містобудівна документація, яка регулюється Законом України «Про регулювання містобудівної діяльності» [4], який *«...встановлює правові та організаційні основи містобудівної діяльності і спрямований на забезпечення сталого розвитку територій з урахуванням державних, громадських та приватних інтересів»*.

Отже, можна зробити висновок, що будівельна галузь, зокрема у сфері реставрації, досить добре врегульована законодавчо як на державному рівні, так і на місцевому.

1.2. Світовий досвід застосування вікон з ПВХ у пам'ятках архітектури

Реставрація об'єктів нерухомої спадщини доволі чутлива та делікатна тема, яка передовсім потребує наукового і виваженого підходу. Особливо, зважаючи на

вид об'єкту, його культурну та історичну значимість, технічний стан та призначення.

Культові споруди, археологічні знахідки, твори культурного чи монументального мистецтва вимагають максимального дотримання автентичності і використання ідентичних матеріалів при реставрації. Та чи всі об'єкти із пам'яткоохоронним статусом потребують такого підходу? Де проходить межа між автентичністю та потребою максимального збереження та тривалої експлуатації?

Останні кілька десятиліть у світовій професійній спільноті, здебільшого у країнах Європи, не вщухають дискусії стосовно доцільності застосування сучасних матеріалів при реставрації пам'яток архітектури. Розвиток науки та техніки «дарує» людству матеріали, які воно не знало протягом минулих століть, та вони доступні зараз і дають значно ширші можливості у реставрації чи відтворенні тих чи інших об'єктів. Вони здатні суттєво покращити та значно подовжити експлуатацію об'єктів нерухомої спадщини, зменшити витрати на їх утримання та подальші ремонтні чи реставраційні роботи. І мова йде передовсім про об'єкти, які мають житлове призначення.

Найбільш консервативний підхід до реставрації має Німеччина, де на загальнонаціональному рівні хоч і немає єдиного Закону щодо захисту об'єктів нерухомої спадщини, проте існують єдині методичні підходи, стандарти та професійні настанови. А вже на регіональному рівні кожна Федеральна Земля має власне законодавство, яке визначає правила та вимоги до реставраційних робіт. Однак, сферу реставрації усіх Федеральних Земель координує єдиний Федеральний орган під назвою DNK (Німецький національний комітет з охорони пам'яток) [9].

Враховуючи, що саме в Німеччині був вперше розроблений та запущений у масове виробництво профіль для вікон та дверей з полівінілхлориду, їх досвід представляє найбільший інтерес. Оскільки вже у 80-х роках минулого століття активно дискутувалась тема застосування вікон з ПВХ, яка лишається актуальною до тепер.

Німецьке законодавство доволі чітко регулює будівельну галузь, зокрема і у сфері реставрації та вимог до енергоефективності будівель. Саме така комбінація спричиняє найбільше дискусій довкола пам'яток архітектури в цілому, та об'єктів житлового призначення зокрема.

На федеральному рівні діють доволі жорсткі вимоги до енергоефективності будівель, які частково можуть поширюватись і на об'єкти з охоронним статусом. На прикладі законодавства Федеральної Землі Північна Рейн-Вестфалія (NRW) розглянемо окремі підходи до реставрації в частині застосування віконних конструкцій з полівінілхлориду.

Основою пам'яткоохоронного законодавства Федеральної Землі Північна Рейн-Вестфалія є Закон про охорону пам'яток Північного Рейну-Вестфалії (Закон про охорону пам'яток – DSchG NRW) [10] від 13.04.2022 р., який визначає, що головним завданням є *«Охорона та збереження історичних пам'яток відповідають суспільним інтересам. Завданням охорони та збереження пам'яток є захист та утримання пам'яток, проведення наукових досліджень над ними та поширення знань про них. Також необхідно докласти зусиль для забезпечення їх належного використання»*.

Вказаний закон встановлює права та обов'язки власників, регулює нагляд відповідального Земельного Органу, встановлює правила проведення реставраційних робіт тощо. Разом з тим, закон диференціює обмеження у реставрації і у Параграфі 9 зазначає, що *«...будь-хто, хто бажає знести, змінити, перемістити або змінити використання будівлі, що є пам'яткою архітектури, або її частини, повинен отримати дозвіл від Нижчого управління пам'яток. Дозвіл не потрібен для реставраційних робіт, якщо вони зачіпають лише частини пам'ятки, які не мають відношення до її історичного значення»*.

Не менш важливим є регулювання щодо надання дозволу на проведення будівельних, ремонтних чи реставраційних робіт. Закон у тому ж таки Параграфі 9 наголошує, що *«Дозвіл також потрібен для будь-кого, хто має намір зводити, змінювати або демонтувати споруди в безпосередній близькості від пам'ятки архітектури, якщо це може вплинути на сутність або зовнішній вигляд*

пам'ятки архітектури. Дозвіл відповідно до пунктів 1 та 2 надається, якщо немає суперечностей у інтересах охорони історичних пам'яток або якщо такого заходу вимагає переважаючий суспільний інтерес. Під час прийняття рішення належним чином враховуються також, зокрема, інтереси житлового будівництва, клімату, використання відновлюваних джерел енергії та доступності». Отже, можна зробити висновок, що Закон враховує інтереси власників, суспільства, потреб у енергоефективності та спонукає шукати підходи у проведенні реставраційних робіт, які не зашкодять пам'ятнику архітектури.

Практичний досвід застосування даного закону різноманітний, як і Судова практика Адміністративних Судів Федеральної Землі Північна Рейн-Вестфалія щодо оцінки правомірності проведення тих чи інших будівельних або реставраційних робіт власниками на об'єктах із захищеним статусом. І саме досвід вирішення спірних питань щодо застосування вікон з полівінілхлориду у пам'ятках архітектури є одним із найпоширеніших через потреби власників у поліпшенні умов експлуатації, підвищенні енергоефективності та зменшенні залежності від енергоносіїв. Що, відповідно до вказаного вище Закону, є суспільним інтересом.

Досліджуючи досвід судових справ щодо оцінки правомірності застосування вікон з ПВХ у пам'ятках архітектури, ми можемо бачити диференційований підхід у вирішенні суперечностей. Вихідною умовою є Опис пам'ятки архітектури на момент надання статусу, де описуються окремі елементи будівлі як такі, що представляють цінність, є невід'ємною частиною об'єкту і також охороняються законом. І не завжди вікна представляють таку ж цінність, як наприклад елементи фасаду, покрівлі чи огорожі. А відтак, вони можуть не мати охоронного статусу. При розгляді судових позовів до власників пам'яток архітектури щодо заміни вікон на сучасні вікна з полівінілхлориду, Суд бере до уваги баланс інтересів власників, громади, місцезорешування об'єкту, позицію влади щодо ступеню зміни автентичності пам'ятки архітектури.

Судова практика доволі часто вважає заміну вікон незначним порушенням. Тому не кожне незначне порушення інтересів збереження історичної спадщини

може призвести до непоправних наслідків. Натомість, суди намагаються встановити відповідні обставини кожного окремого випадку, а також збалансувати інтереси збереження історичної спадщини із суспільними та приватними інтересами. І якщо Суд приходить до висновку, що *«...порушення є незначними через законний приватний інтерес у використанні більш енергоефективних, менш витратних на обслуговування та стійких до атмосферних впливів пластикових вікон переважає інтереси збереження пам'ятки у збереженні пам'ятки з дерев'яними вікнами, максимально точними до оригінального матеріалу, який буде використано»* [11], рішення виноситься на користь власника пам'ятки архітектури і дозволяє встановлення сучасних вікон з ПВХ.

Не менш цікавим, але практично протилежним, є досвід Австрійської Республіки у реставрації пам'яток архітектури. Головним органом з охорони пам'яток культури є Федеральне управління пам'яток [12], яке *«...охороняє, зберігає, досліджує та популяризує культурну спадщину Австрії. Пам'ятки є унікальними та незамінними матеріальними свідченнями нашої історії від доісторичних часів до сьогодення. Це включає, перш за все, архітектурні пам'ятки, археологічну спадщину та збереження значних культурних цінностей країни. Практичне збереження пам'яток охоплює постійне обслуговування будівель, що входять до списку архітектурних пам'яток, та встановлює рамки для будь-яких потенційних змін»*. Дане відомство у своїй роботі опирається на головний документ Австрійської Республіки «Закон про охорону пам'яток» [13], який тлумачить захист пам'яток культурної спадщини наступним чином: *«Збереження пам'ятки відповідає суспільним інтересам, якщо історичне, художнє чи інше культурне значення пам'ятки, ансамблю чи колекції сприяє, принаймні з регіональної чи місцевої точки зору, якості, кількості, різноманітності та поширенню культурної спадщини Австрії в цілому. Також важливо, якою мірою можна досягти історичної документації шляхом збереження пам'ятки, ансамблю чи колекції»*. В параграфі 5 цього ж Закону встановлені можливі межі втручання у стан об'єкту нерухомої спадщини:

«Знищення або зміна пам'ятки, що знаходиться під охороною, може бути дозволено Федеральним управлінням пам'яток лише у випадку, якщо причини, висунуті та доведені заявником, переважають суспільний інтерес у її збереженні в незмінному вигляді».

Практичний досвід Австрійської республіки свідчить про значно жорсткішу заборону застосування вікон з полівінілхлориду у пам'ятках архітектури. На відміну від описаного вище досвіду Федеративної Республіки Німеччина, австрійське законодавство головним чином опирається на створені охоронні зони, в межах яких заміна вікон у будь-якій будівлі потребує дозволу.

Для оформлення дозволу на проведення будівельних робіт необхідні наступні документи:

1. Заява на будівництво у довільній формі, яка має бути підписана заявником.

2. План проведення будівельних робіт, схеми, фотографії існуючої конструкції (наприклад, фотографії існуючих фасадів – із зазначенням, які вікна потрібно замінити), а також інформація про орієнтацію вікон (вихід на вулицю чи у внутрішній двір).

3. Зображення майбутнього вигляду, включаючи всю необхідну інформацію для проведення оцінки, таку як матеріал, товщина профілю, поділ, колір та дані по коефіцієнту теплопровідності. Зображення (план чи фотомонтаж) повинні бути підписані уповноваженими авторами.

Перед проведенням будівельно-монтажних робіт, підрядник зобов'язаний:

1. Повідомити відповідний орган про початок робіт із заміни вікон (повідомлення про початок будівництва).

2. Після завершення робіт із заміни вікон власник будівлі повинен подати повідомлення про завершення. Це повідомлення про завершення повинно містити декларацію від керівника будівельного майданчика (ліцензованої спеціалізованої компанії), яка підтверджує, що заміна вікон відповідала нормам та вимогам діючого законодавства.



Рис. 1.2. Приклад застосування внутрішнього вікна. Фото компанії Tischlerei Falk Seidel, Німеччина.

Та на практиці це означає, що допускається покращення енергоефективності будівлі в цілому, із застосуванням сучасних віконних конструкцій. Про це говорить архітектор Клаудіу Сільвестру [14], який *«...працює керівником проєктів в іС consulenten Ziviltechniker GesmbH, де відповідає за реалізацію ініціатив, пов'язаних зі сталим розвитком наявних будівель із пам'яткоохоронним статусом. Будучи сертифікованим консультантом ÖGNI (Австрійської ради зі сталого будівництва), радником із таксономії ЄС (ÖGNI), а також зареєстрованим експертом із демонтажу згідно з австрійським стандартом ÖNORM B3151 у BRV (Австрійська асоціація з переробки будівельних матеріалів), пан Сільвестру активно залучається до збереження культурної спадщини. Він є багаторічним членом ICOMOS Austria (національного відділення Міжнародної ради з охорони пам'яток та історичних місць) і з 2024 року керує робочою групою з питань сталого розвитку та культурної спадщини, приділяючи особливу увагу принципам циркулярної*

економіки. Також він є учасником двох міжнародних наукових комітетів ICOMOS із питань енергоефективності та сталості, а також із питань інтерпретації та презентації культурної спадщини».

Одним з рішень, яке широко застосовується для покращення енергоефективності при реставрації пам'яток архітектури, є додавання теплоізоляційного внутрішнього скління у короб існуючих вікон, що за формою та кольором повторюють зовнішні дерев'яні вікна (рис. 1.2). І часто це саме вікна з полівінілхлориду через їх властивості як технологічні, так і експлуатаційні. Дане рішення відповідає суспільному запиту щодо дотримання автентичності пам'ятки, потребі власників та збереженню об'єкту нерухомої спадщини.



Рис. 1.3. Колишня будівля головної пошти Габсбурзької монархії 1850-х років, м. Відень, вул. Постгассе 8–12. Фото: OPTIN Immobilien GmbH [14].



Рис. 1.4. Будівля освітнього центру для дорослих, м. Відень. Пам'ятка архітектури, збудована у 1904-1905 роках. Фото: Magistrat der Stadt Wien, MA-34 (за позначенням на зображенні).

1.3. Фактори впливу на вибір та застосування вікон з ПВХ у пам'ятках архітектури

Для вирішення головного завдання - вибору та застосування вікон з полівінілхлориду у пам'ятках архітектури, необхідно дослідити фактори, що впливають як на вибір та застосування вікон з полівінілхлориду у пам'ятках архітектури, так і підвищення ефективності їх застосування.

У якості *робочої гіпотези* прийнято наступне припущення: підвищення ефективності застосування віконних конструкцій з полівінілхлориду може бути досягнуто на основі дослідження факторів, що найбільше впливають на вибір та застосування вікон з ПВХ у пам'ятках архітектури. На основі оцінки значущості факторів, здійснюється вибір та впровадження системи методів та рішень, виходячи із принципу збереження автентичності, підвищення ефективності будівельних та монтажних робіт при реставрації пам'ятки архітектури, покращення енергоефективності об'єкту.

У якості *вхідних показників* розглядається запропонована множина можливих факторів, що впливають на рішення застосування вікон з полівінілхлориду у пам'ятках архітектури. У якості *вихідних показників*-

фактори, що найбільше впливають на застосування вікон з полівінілхлориду у пам'ятках архітектури.

Дослідження факторів впливу базується на наступних методах:

- проведення *експертного опитування* на основі запропонованої множини факторів;
- *аналіз та систематизація* факторів впливу;
- *оцінка значущості* факторів впливу;
- *ранжування* факторів, що найбільше впливають на застосування вікон з полівінілхлориду у пам'ятках архітектури.

Збір думок виконано групою експертів у кількості 10 фахівців ($M=10$), кількісний та фаховий склад якої має достатній рівень компетентності у питаннях, що розглядаються. Рівень компетентності фахівців оцінювався у відповідності до анкети самооцінки (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Анкета самооцінки експерта

Ознака	Рівень оцінки		
	високий	середній	низький
1. Рівень знайомства з проблемним питанням (<i>досвід проектування та реставрації пам'яток архітектури та/ або віконних конструкцій, років</i>)	понад 10	5-10	до 5
2. Ваша теоретична підготовка	д. т. н. або професор	к.т.н. або доцент	інженер
3. Ваш виробничий досвід, років	понад 10	5-10	до 5

Оцінка рівня компетентності експерта відбувається за системою коефіцієнтів вагомості: високий рівень експерта дорівнює 1, середній – 0,8, низький – 0,5.

До складу групи експертів увійшли чотири доктори технічних наук, два кандидати технічних наук та чотири інженерів з досвідом роботи у будівельній галузі не менше 3 років.

Опитування експертів виконано у послідовності, відповідно до наступної схеми:

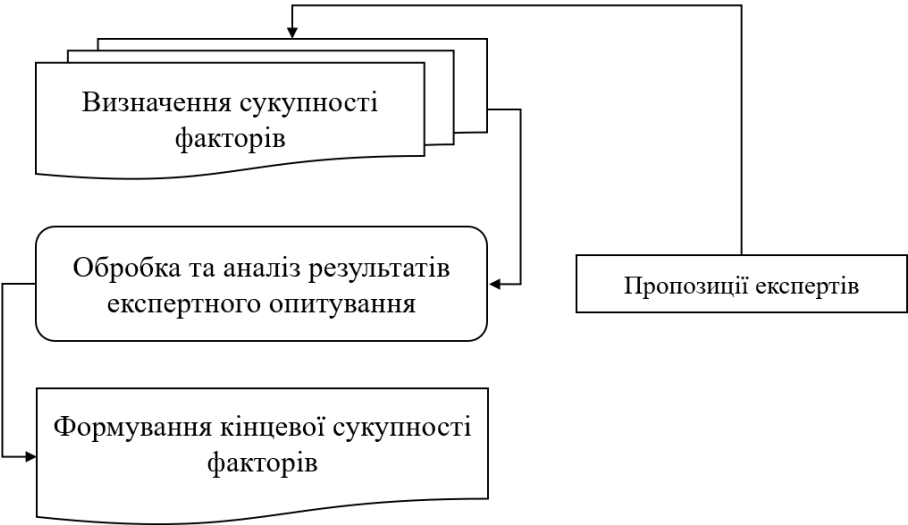


Рис. 1.5. Схема опитування експертів

Експертне опитування проводилось згідно опитувального листа, в якому експертам були запропоновані фактори які можуть бути найбільш вагомими на ухвалення рішення щодо застосування вікон з полівінілхлориду у пам’ятках архітектури.

Таблиця 1.2

Перелік факторів впливу для опитування

№ п./п.	Назва фактору впливу
1	2
1	Архітектурна автентичність.
2	Тип пам’ятки архітектури за призначенням.
3	Ступінь збереженості пам’ятки архітектури.
4	Наявність попередніх утручань.
5	Архітектурний ансамбль довкола об’єкту реставрації.
6	Наявність креслень, фото чи графічних зображень об’єкту.
7	Покращення енергоефективності пам’ятки архітектури.
8	Будівельно-технологічні рішення монтажу вікон з ПВХ.

<i>№ п./п.</i>	<i>Назва фактору впливу</i>
<i>1</i>	<i>2</i>
9	Будівельні обмеження.
10	Науковий підхід до застосування вікон з ПВХ.
11	Можливі конструктивні рішення профільних систем з ПВХ.
12	Наявність проєктних рішень щодо віконних конструкцій.
13	Параметри фронту робіт.
14	Наявність раніше замінених вікон.
15	Організаційні умови та обмеження.

В результаті виконаного опитування, аналізу та систематизації отриманих даних, було узгоджено перелік із десяти факторів, які на думку експертів є найбільш вагомими (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Перелік узгоджених факторів впливу

<i>№ п./п.</i>	<i>Назва фактору впливу</i>
<i>1</i>	<i>2</i>
1	Архітектурна автентичність.
2	Ступінь збереженості пам'ятки архітектури.
3	Архітектурний ансамбль довкола об'єкту реставрації.
4	Покращення енергоефективності пам'ятки архітектури.
5	Будівельно-технологічні рішення монтажу вікон з ПВХ.
6	Науковий підхід до застосування вікон з ПВХ.
7	Можливі конструктивні рішення профільних систем з ПВХ.
8	Параметри фронту робіт.
9	Наявність раніше замінених вікон.

<i>№ п./п.</i>	<i>Назва фактору впливу</i>
<i>1</i>	<i>2</i>
10	Організаційні умови та обмеження.

Для визначення значущості сформованої сукупності факторів впливу, експертами було виконаного оцінювання значущості факторів, що найбільше впливають на вибір та застосування вікон з ПВХ у пам'ятках архітектури. Запропонована система оцінювання значущості фактору $N=1-10$, де 1- найвища значущість, а 10- найменша.

Отримані дані представлені у вигляді діаграми (рис. 1.6), де на осі X позначені суми рангів, а на осі Y вказані об'єкти дослідження у порядку, що відповідає факторам з таблиці 1.3.

Таблиця 1.4

Матриця рангів

Фактори, що найбільше впливають на вибір та застосування вікон з ПВХ
у пам'ятках архітектури

Номер експерта, М= 10	Об'єкти дослідження, N=10									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	3	6	5	4	2	7	10	8	9
2	1	4	3	5	7	2	6	9	8	10
3	1	2	3	5	4	6	7	8	9	10
4	1	3	4	5	6	2	7	9	8	10
5	1	7	6	5	4	8	2	9	3	10
6	1	4	5	3	6	2	7	9	8	10
7	1	4	6	3	5	7	2	9	8	10
8	1	5	6	3	4	2	7	8	9	10
9	1	5	6	3	4	2	7	10	8	9
10	1	3	6	5	4	2	10	8	7	9
<i>Сума рангів</i>	<i>10</i>	<i>38</i>	<i>51</i>	<i>42</i>	<i>48</i>	<i>35</i>	<i>62</i>	<i>89</i>	<i>76</i>	<i>97</i>

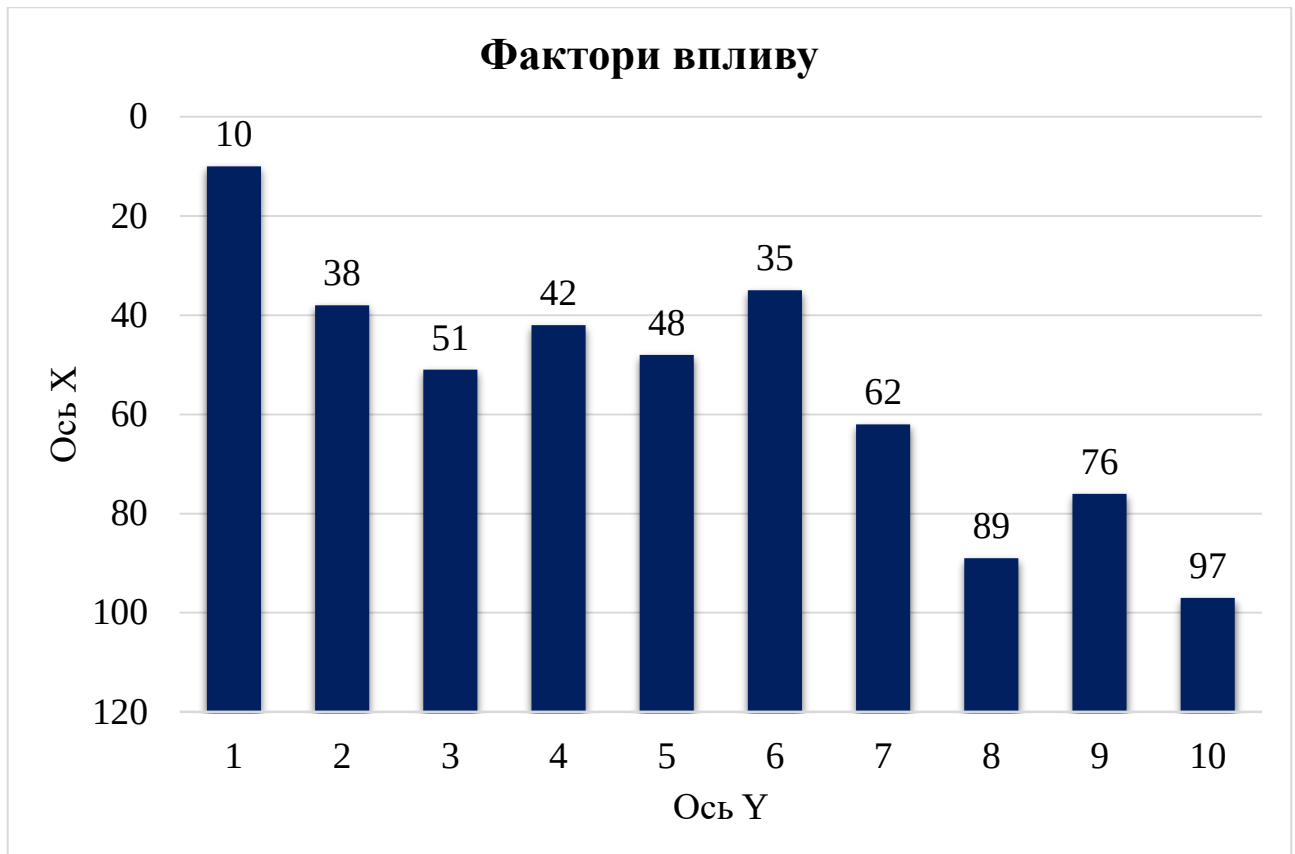


Рис. 1.6. Оцінка значущості факторів, що найбільше впливають на вибір та застосування вікон з ПВХ у пам'ятках архітектури

Чим менше значення фактору, тим більший вплив він має на застосування вікон з полівінілхлориду у пам'ятках архітектури. Аналіз діаграми показує, що найбільший вплив має *Архітектурна автентичність (фактор 1)*. Суттєвий вплив має фактор *Науковий підхід до застосування вікон з ПВХ (фактор 6)*, дещо менший вплив мають *Ступінь збереженості пам'ятки архітектури (фактор 2)*, *Покращення енергоефективності пам'ятки архітектури (фактор 4)*, *Будівельно-технологічні рішення монтажу вікон з ПВХ (фактор 5)* та *Архітектурний ансамбль довкола об'єкту реставрації (фактор 3)*. Рештою факторів, на думку експертів, можна знехтувати як такими, що не здійснюють суттєвий вплив на застосування вікон з полівінілхлориду у пам'ятках архітектури.

1.4. Типові рішення та рекомендації з проєктування та монтажу вікон з ПВХ у об'єктах архітектурної спадщини

Розробка рекомендацій, проєктування застосування та монтажу тих чи інших типових рішень пов'язані із умовами, що склались на об'єкті. Вихідними

даними для проєктування застосування обраного рішення мають бути оцінка та аналіз стану віконного прорізу, а саме:

1. ступінь пошкоджень та руйнацій елементів прорізу вікна;
2. наявність зовнішніх декоративних елементів фасаду, що примикають до прорізу та їх стан;
3. технологічні та проєктні можливості профільної системи з полівінілхлориду;
4. організаційні умови та обмеження.

Нижче запропоновано рішення на основі практичного досвіду та ситуацій, які найчастіше трапляються як в Україні, так і у країнах Європи.

1. Внутрішнє вікно. Дане рішення застосовується в умовах, коли вікно є невід'ємною частиною пам'ятки архітектури і дозволяється виключно реставрація. Проєктується із повним відтворенням зовнішнього вигляду, дотриманням пропорцій окремих елементів вікна.

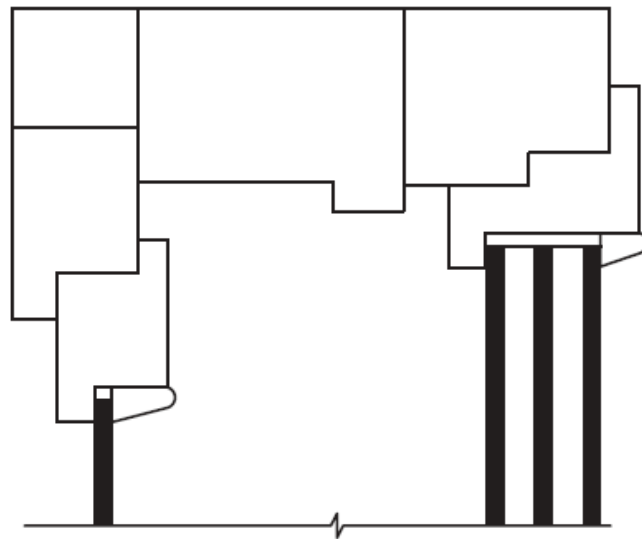


Рис. 1.7. Схема застосування внутрішнього вікна зі збереженням старого.



Рис. 1.8. Приклад застосування внутрішнього вікна зі збереженням старого зовнішнього вікна, що є невід'ємною частиною пам'ятки архітектури. Фото компанії Schneider Tischlerei, Німеччина.

2. Нове вікно із застосуванням реставраційної рами. Рішення застосовується в умовах повної заміни вікна, яке не є частиною пам'ятки архітектури. Натомість, дозволяє зберегти існуючу дерев'яну раму, особливо в умовах ризику руйнації прорізу вікна після демонтажу старої коробки. Характерною рисою даного рішення є можливість наближеного відтворення зовнішнього вигляду за рахунок профілів з меншою вистою, у порівнянні зі стандартними елементами сучасного вікна з полівінілхлориду.

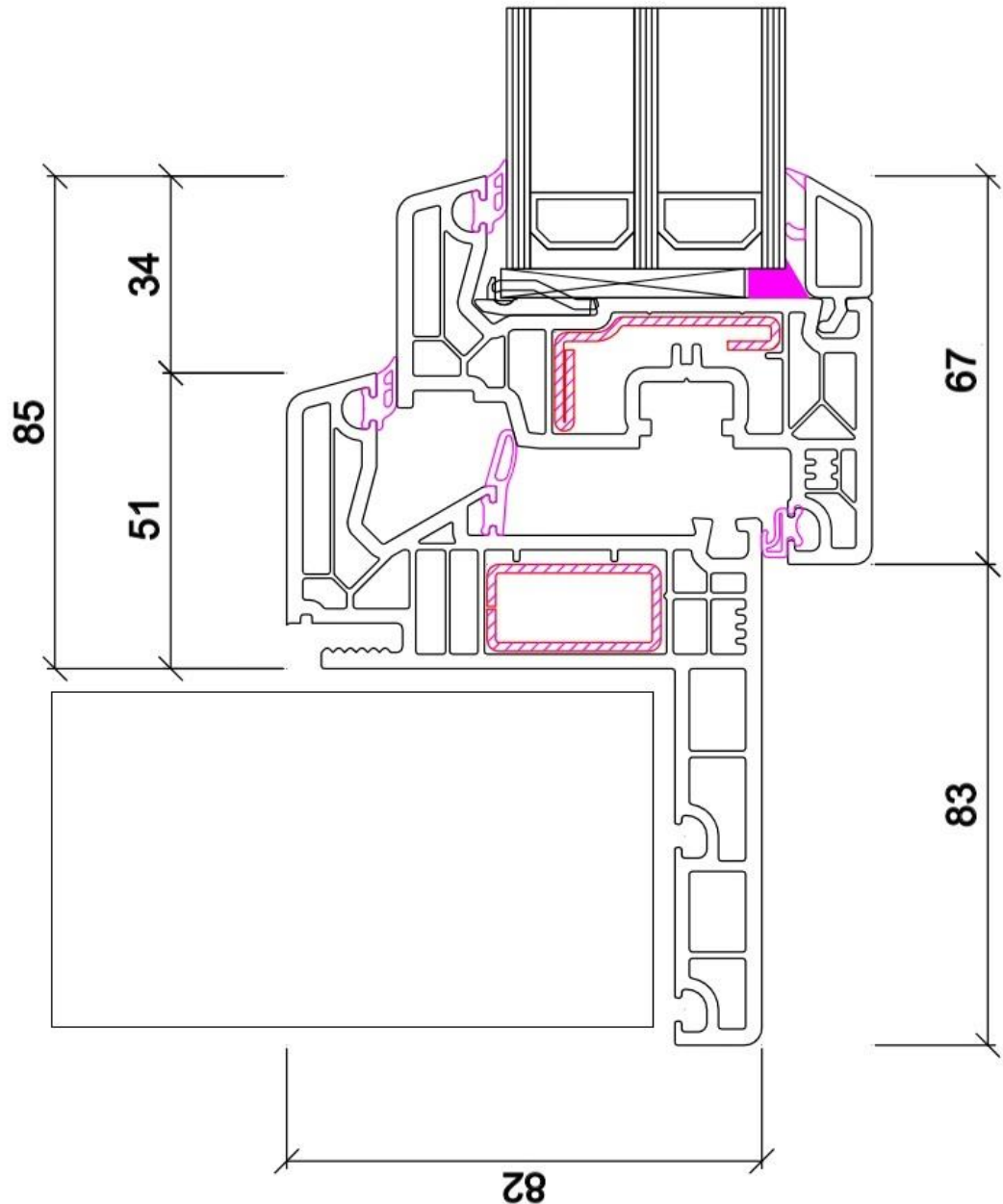


Рис. 1.9. Креслення розрізу вікна з ПВХ із застосування реставраційної рами.

3. Вузькі елементи вікна для максимально наближеного відтворення зовнішнього вигляду. Досліджуючи віконні конструкції пам'яток архітектури житлового призначення, особливо періоду від другої половини 19 століття і до початку 20 століття, можна дійти висновку, що усі елементи вікна мають дизайн. При проєктуванні нових вікон слід також застосовувати тонкі елементи, зокрема профілі стулки, штаульпа та намагатись максимально відтворити зовнішній вигляд старого вікна.

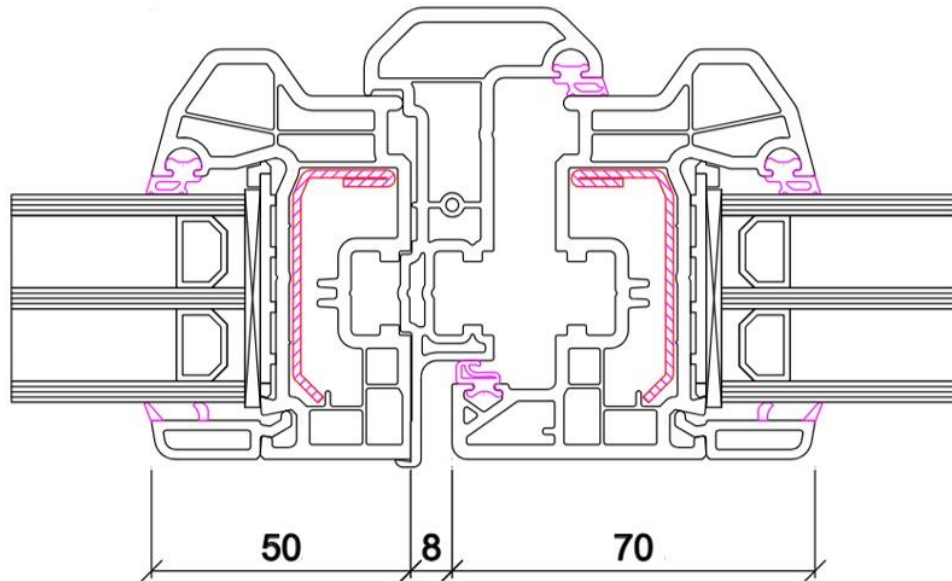


Рис. 1.10. Креслення розрізу вікна з ПВХ із застосуванням спеціальних вузьких елементів.

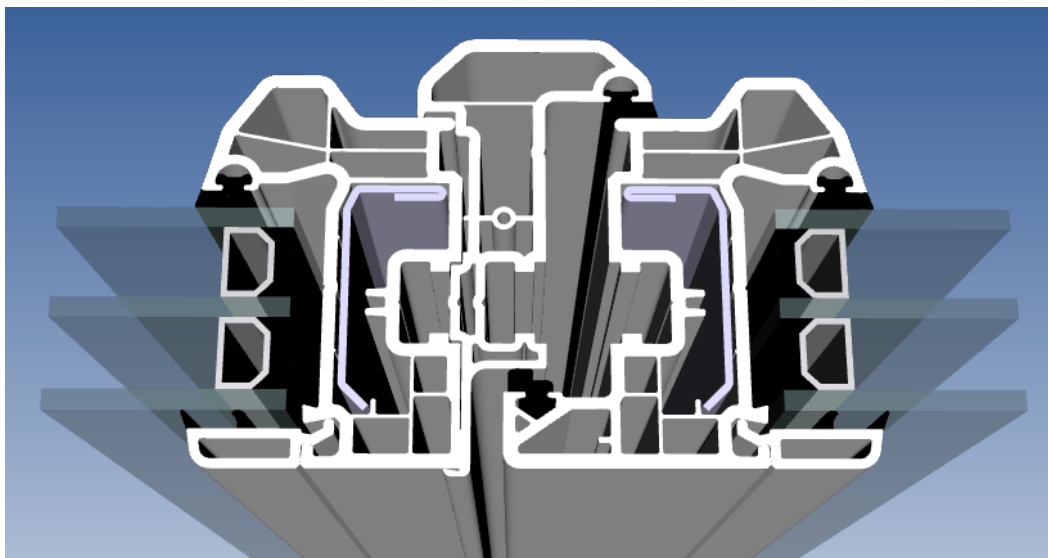


Рис. 1.11. 3Д модель розрізу вікна з ПВХ із застосування спеціальних вузьких елементів.

4. Нове вікно з відтворенням зовнішнього вигляду старого вікна.

Сучасна віконна галузь відповідає на запити щодо покращення енергоефективності житлових будівель зі статусом пам'ятки архітектури та пропонує рішення, які дозволяють відтворити зовнішній вигляд старого вікна. Можливо використати зовнішні накладні декоративні елементи як стандарті, так і виготовлені під замовлення.



Рис. 1.12. Фото вікна із зовнішніми декоративними накладними елементами. Фото компанії Neuffer Fenster + Türen GmbH, Німеччина.

5. Проектування монтажу. Під час проектування монтажу віконних конструкцій з полівінілхлориду важливо враховувати наступні умови та особливості:

1. Тип примикання вікна до прорізу (з чвертю або без);
2. Глибина входження у чверть та необхідність врахування додаткових розширювальних елементів віконної конструкції;
3. Тип матеріалу стіни (цегла, камінь, вапняк, ракушняк) для правильного підбору матеріалів кріплення;
4. Провести візуальне обстеження на предмет деформацій або часткових руйнувань прорізу стіни;

5. Змодельювати позиціонування вікна у прорізі та проходження ізотерм (рис. 1.14);
6. Розрахувати кількість точок кріплення.

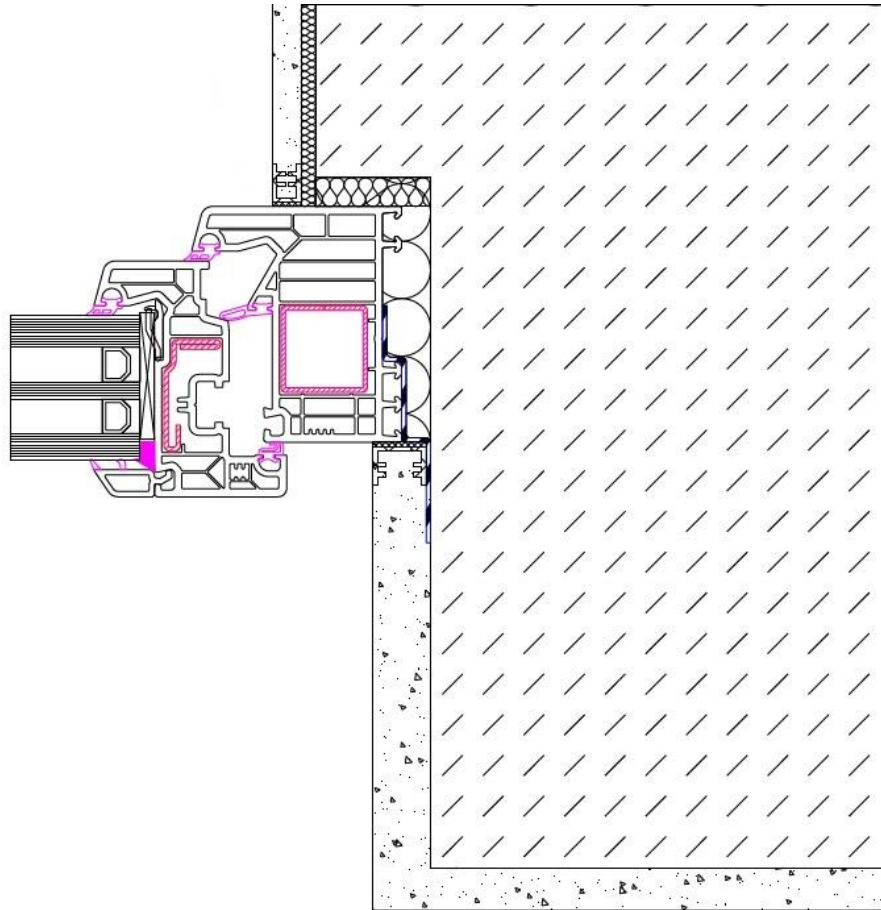
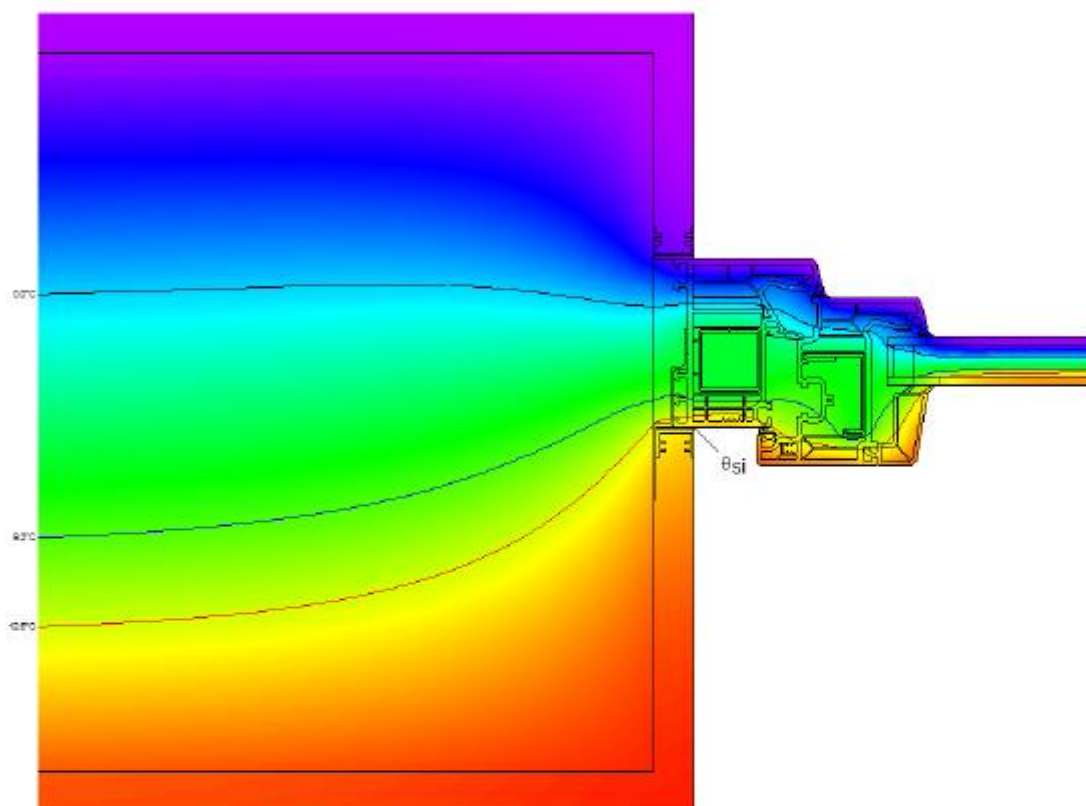


Рис. 1.13. Приклад проектування монтажного вузла у проріз вікна з чвертю.

Візуалізація проходження ізотерм



Проходження ізотерм

Червона: 13°C - ізотерна появи плісняви

Синя: 10°C - точка роси

Жовтий: 0°C - ізотерна

Властивості будівельного елементу:

Профільна система: SOFTLINE 82 MD

Ug:

0 W/(m²K)

Рама: 101290 Рама 73 мм

Стулка: 103341 Стулка 84 мм

Граничні умови:

Зовні: -10°C, 80% Відносна вологість повітря

Всередині: 20°C, 50% Відносна вологість повітря

Рис. 1.14. Візуалізація проходження ізотерм у прорізі вікна

Висновки до розділу 1

1. Протягом століть в Україні формувалась архітектурна спадщина, яка дозволяє вивчати наше історичне минуле та розуміти, хто ми і ким є. Головне завдання кожного покоління- дбати та оберігати нашу спадщину, доглядати її у належному стані та робити усе можливе для продовження її існування. Пам'ятки архітектури захищені законом і будь-яке утручання регламентоване законодавством та будівельними стандартами. Та чи завжди воно відповідає потребам часу, чи враховує можливості сучасних будівельних матеріалів та технологій? Вочевидь, ні. Головною метою і суспільним інтересом громадянського суспільства є збереження та продовження існування пам'ятки архітектури для нащадків. Для власників пам'яткоохоронних об'єктів важливим є ще і енергоефективні аспекти будівлі протягом експлуатації. Сучасні матеріали та технології здатні вирішувати вказані завдання.

2. Іноземні країни у питаннях реставрації пам'яток архітектури мають різний досвід і він інколи протилежний. Дискусії довкола застосування сучасних будівельних матеріалів у реставрації точаться вже кілька десятиліть. Однак практичний досвід демонструє, що застосування вікон з полівінілхлориду у пам'ятках архітектури вже відбувається. Пошук більш досконалих рішень продовжується, фахівці намагаються переосмислювати місце і роль сучасних віконних систем у об'єктах архітектурної спадщини. Однак, суспільний запит у більш тривалому збереженні пам'яток архітектури, покращенні їх енергоефективності, особливо у європейських країнах, вимагає адаптувати законодавство, шукати оптимальні рішення у застосуванні сучасних будівельних матеріалів та технологій, зокрема і вікон з полівінілхлориду.

3. Розглянуті експертами фактори, що впливають на застосування вікон з полівінілхлориду у пам'ятках архітектури, дозволяють зробити висновок щодо припустимості застосування вікон з ПВХ у пам'ятках архітектури за умов збереження архітектурної автентичності, із застосуванням наукового підходу. Це цілком справедливо та закономірно, оскільки будь-яка реставрація передбачає

збереження автентичності. Тому, потреба у рішеннях застосування та монтажу вікон з полівінілхлориду, які не спотворять пам'ятку архітектури, є очевидною.

4. Розроблено та запропоновано типові рішення застосування та монтажу вікон з полівінілхлориду, які дозволять зберегти автентичність пам'ятки, покращити енергоефективність та комфорт експлуатації об'єктів із захищеним статусом. Передовсім, мова йде про пам'ятки архітектури житлового призначення, де вікна можуть не бути невід'ємною частиною об'єкту, або ж їх відтворення не зашкодить цілісному сприйняттю.

РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ МОНТАЖУ СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1. Аналіз сучасного стану технології та організації виконання монтажу світлопрозорих конструкцій

Розвиток будівництва йшов завжди поруч з розвитком людини. Створення перших поселень вимагало від людини постійного пошуку нових матеріалів, методів та засобів для будівництва. Отже, цей постійний розвиток вивів будівельну галузь в одну з найважливіших у світі. Безперервний розвиток прикладних наук дозволив створити багато нових матеріалів, які відповідають різним вимогам та дозволяють збудувати споруди різного призначення відповідно до існуючих кліматичних умов в залежності від того де розташована та чи інша будівля.

Аналіз світових трендів показує щорічний постійний зріст обсягів будівництва і як наслідок, нам потрібно виробляти більше будівельних матеріалів, та готувати більше фахівців. На цей сегмент припадає понад 50% усіх видобутих природних ресурсів у світі, третина загального обсягу світових відходів і майже 40% глобальних викидів вуглекислого газу. Використання первинних будівельних матеріалів, у тому числі сталі, бетону, цементу, цегли та скла, створює численні проблеми. Виробництво цих матеріалів є енергоємним, вимагає масштабного видобутку обмежених природних ресурсів і часто призводить до утворення тон відходів [21]. Але ж наша планета не є безмежною, та в усіх напрямках повинен бути відповідний баланс, тому використання корисних копалин повинно мати певні обмеження. Окрім того, вже збудовані споруди мають певний термін експлуатації, після якого вони мають бути демонтовані, а будівельне сміття перероблено та знов піде у будівництво. Питання декарбонізації, активний розвиток «зеленого» будівництва та збереження ресурсів планети це важливе питання для майбутнього людини.

Постійний розвиток технології дуже значно впливає на вище згадані питання. Будівельна індустрія як фундаментальний сектор економіки зазнає значних змін через цифрову трансформацію, зростання екологічних стандартів

та глобальні економічні зрушення. Інновації та інтеграція передових технологій допомагають модернізувати процеси й підвищити продуктивність. Водночас акцент робиться на сталому розвитку та енергоефективності, що зумовлює необхідність використання екологічно чистих матеріалів і методів. Сучасні тенденції включають використання цифрових технологій, таких як інформаційне моделювання будівель (BIM), автоматизація будівництва, інтернет речей, модульне будівництво та інноваційні матеріали [20]. Впровадження цих технологій революціонізує традиційні методи будівництва, забезпечуючи більш ефективне планування, управління проєктами та розподіл ресурсів. BIM, наприклад, сприяє кращій співпраці, мінімізує помилки й дозволяє здійснювати точніше прогнозування та бюджетування [22].

В процесі розвитку будівництва, його окремі напрямки також значно трансформувались та зросли до самостійних галузей. Віконна галузь також не стала винятком і протягом часу, від простого закриття віконних прорізів різними напівпрозорими матеріалами, ми дійшли до повноцінних інженерних конструкцій, які мають відповідати певним властивостям. Ці конструкції та рішення є частиною цілісного комплексу якому дали назву «розумний» будинок, мета якого створити комфортне середовище для проживання людини. В цьому комплексі повинні враховуватись такі питання як енергоефективність, інсоляція, екологічність, інклюзивність, безпека та якість повітря.

Однак між стіновим прорізом та віконною конструкцією ми маємо відповідний монтажний шов, розміри та характеристики якого регламентуються чинними ДСТУ [25]. Тільки поєднання якісного продукту та кваліфікованого виконання монтажних робіт за сучасними технологіями, забезпечує замовнику гарантовані властивості та довготривалу експлуатацію.

Розвиток технології монтажу світлопрозорих конструкцій невід’ємно проходив з розвитком стінових матеріалів конструктиву віконних елементів, кріпильних елементів, засобів герметизації тощо (Рис. 2.1.). Наразі ми маємо багато додаткових критеріїв як звукоізоляція, енергоефективність, передача навантажень, безпека.

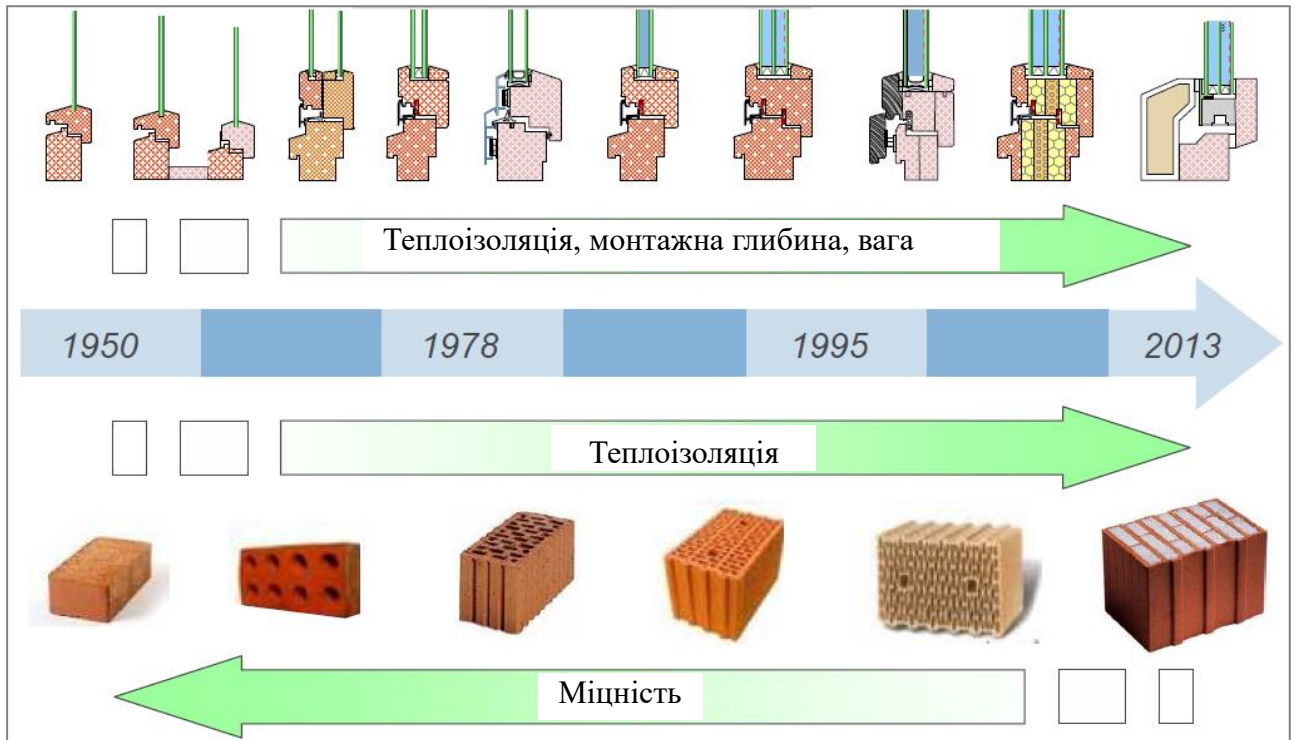
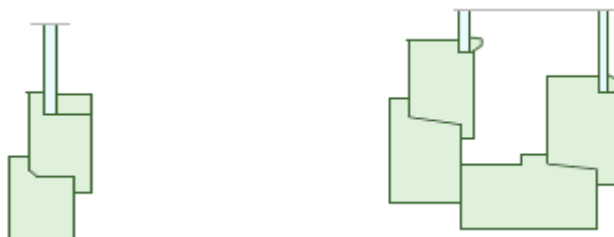


Рис. 2.1. Розвиток матеріалів та вимог теплоізоляції

Згідно діючих норм монтажний шов повинен витримувати відповідні деформації, а також зберігати функціональні властивості протягом періоду експлуатації [25].

Технологія виконання монтажних робіт також змінювалась протягом часу, та розвитком і появою нових матеріалів. Якщо згадати шлях змін за останні сто років, то можна побачити, що спочатку для закриття щілин між вікном та стіною використовувались різні матеріали які закривались глиною. Пізніше прошарок між дерев'яним вікном та бетонною стіною закривали підручними матеріалами та оштукатурювались цементним розчином. Коли взимку з'являвся протяг в приміщенні, мешканці додатково заклеювали периметр вікна залишаючи відривної тільки кватирку та у проміжок між вікнами закладали вату, щоб прибрати зайвий конденсат який утворювався в зоні «точки роси» при зустрічі холодного та теплого повітря (Рис. 2.2.).

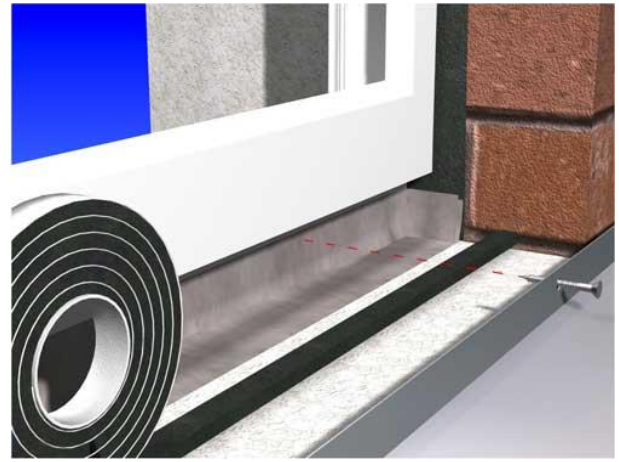


а)

б)

Рис. 2.2. Приклади виконання вікон: а) – одинарне вікно, б) – спарений віконний блок.

З початку 60-х років минулого століття розвиток хімічної промисловості привів нас до появи віконних систем з полівінілхлориду (ПВХ). Однак ПВХ має відповідні обмеження які залежать від температури навколишнього середовища. Для компенсації температурних розширень виробники профільних систем використовують металеві вкладиші, тому вікна назвали металопластикові.



а)

б)

Рис. 2.3. Приклад технології монтажу віконних конструкцій: а) – без використання ізоляційних стрічок (не відповідає діючому ДСТУ), б) – з використанням паропроникних та водонепроникних стрічок.

З розвитком віконних систем з'явилися нові матеріали для герметизації та ущільнення, такі як монтажна піна та герметики, а поява нових матеріалів стін надала поштовх для формування цілого комплексу кріпильних елементів (дюбелі, анкери, хімічні анкери, тощо). Оскільки монтажна піна не може виконувати функції гідроізоляції, та при попаданні вологи з часом руйнується, монтажні бригади використовують у роботі відповідні паропроникні та водонепроникні стрічки, які забезпечують відвід вологи, ефективну експлуатацію монтажного шву, та запобігають утворенню плісняви всередині приміщення, а це є одним із умов комфортного середовища та зберігання здоров'я мешканців (Рис. 2.3.).

Підвищені вимоги до енергоефективності, розвиток фасадних систем та систем утеплення будинків на початку 2000-х років створив умови для появи

систем виносного монтажу зі спіненого полістиролу EPS. Зараз системи виносного монтажу дуже часто використовуються на будівельних майданчиках Європи. Для оптимізації технології монтажу світлопрозорих конструкцій також можна використовувати системи виносного монтажу з ПВХ (Рис. 2.4.). Такі системи дозволяють оптимізувати параметри трудомісткості та скоротити час виконання робіт на будівництві.



Рис. 2.4. Варіанти систем виносного монтажу а) – система виносного монтажу з профілів EPS, б) – система виносного монтажу з ПВХ-профілів

2.2. Впливи і систематизація організаційних факторів при виконанні монтажу

Світлопрозорі конструкції, згідно діючому стандарту ДСТУ EN 14351-1:2020 [24], є багатофункціональними будівельними елементами, які виконують різноманітні функції залежно від вимог конкретного об'єкта. До цього можна віднести наступне [23]:

1. Потрапляння необхідного освітлення в приміщення;
2. Протидія втратам тепла – енергоефективність;
3. Захист від зайвого сонячного випромінювання та нагріву;
4. Звукоізоляція;
5. Безпека;
6. Вентиляція приміщення.

Як на об'єкт в цілому, так і на окремі елементи ми маємо багато різних впливів з різних боків (Рис. 2.5.):

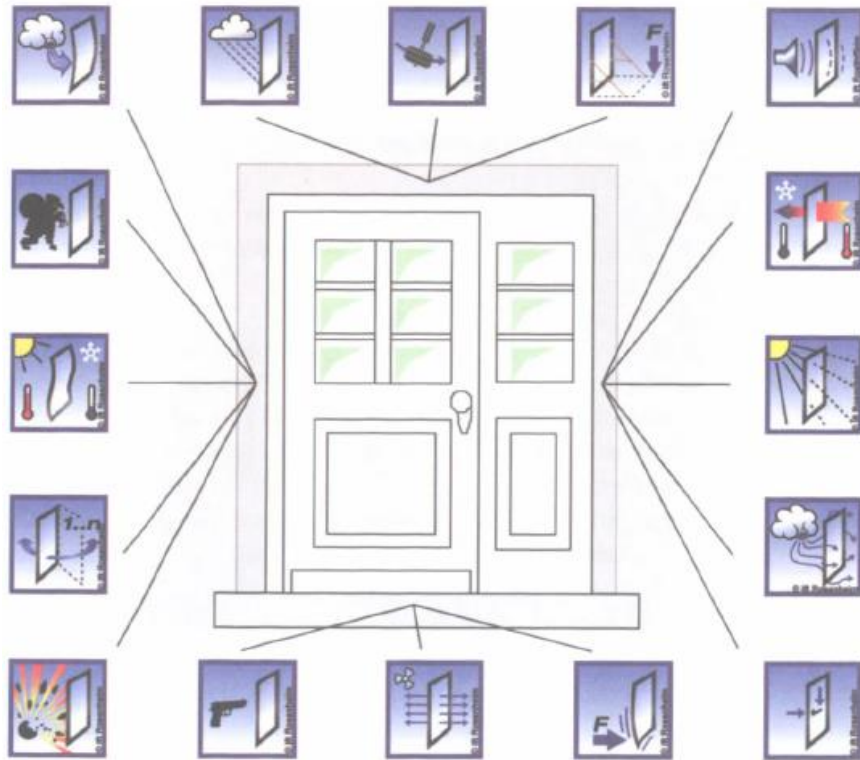


Рис. 2.5. Впливи на світлопрозорі конструкції

1. Зовнішня сторона будинку:

1. атмосферні осадки (дощ, сніг);
2. вітрове навантаження;
3. випромінювання;
4. шум;
5. злам;
6. кулестійкість (для банківських/державних установ).

7. Додатково під час військових дій:

8. вибухова хвиля;
9. уламки.

10. З середини приміщення:

11. експлуатаційні навантаження;
12. вологість;
13. вентиляція приміщення;
14. температурні коливання
вогнестійкість.

15. Площина стіни та вікна:

16. рух будівельної конструкції;
17. рух віконної конструкції;
18. вага конструкції.

Множина діючих впливів на світлопрозорі конструкції створюють певні вимоги для вікон. Відповідно до цього ми можемо сформулювати основні властивості, яким повинні відповідати світлопрозорі конструкції, а саме:



Повітропроникність



Звукоізоляція

Протидія вітровому
навантаженню

Водонепроникність



Енергоефективність



Сонцезахист

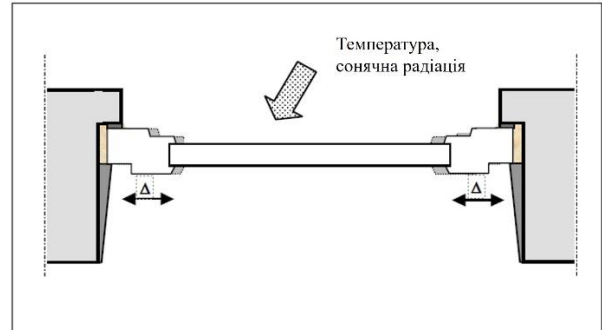


Стійкість до зламу

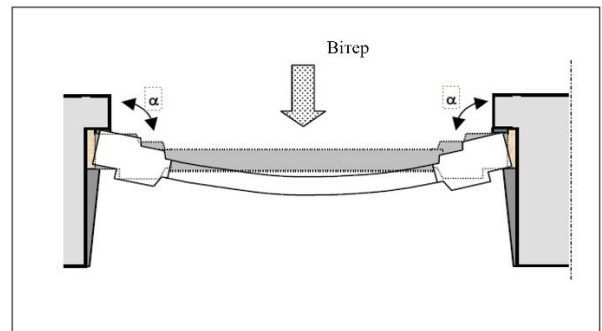
Будівельна організація при проведенні тендера на постачання необхідної продукції вказує в проектній документації та тендерному завданні підряднику необхідні класи властивостей продукції, які відповідають діючим впливам. Для отримання класу продукції, виробник добровільно проводить випробування продукції в лабораторії, та вносить цю інформацію до Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва.

Оскільки монтажний шов також є важливою частиною комплексу «стіна-вікно», ми повинні враховувати впливи і на цей вузол. При експлуатації на монтажний шов діють наступні навантаження:

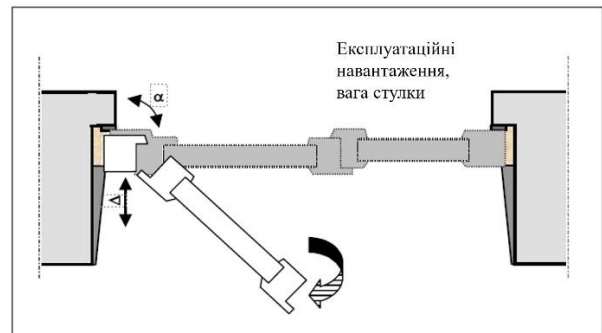
19. температурні (призводять до циклічного розширення віконних профілів, що постійно впливає на монтажний шов);



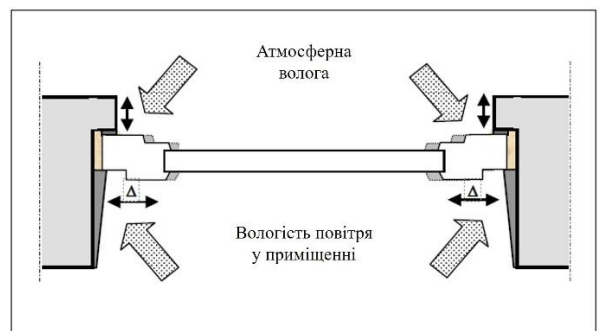
20. статичні (вітрові навантаження)



21. експлуатаційні (відкривання/закривання стулки)



22. атмосферні (вологість повітря – дифузія повітря скрізь монтажний шов)



Враховуюче вищезгадане, ми отримали дві основних групи впливів – 1) Впливи на конструкцію, та 2) Впливи на монтажний шов. Обидві групи впливів мають велике значення при виконанні проектування як конструкцій, так і монтажних робіт на будівельному майданчику.

До організаційних факторів виконання монтажних робіт, по оцінкам експертів, можна віднести:

- 23. планування робіт (терміни та послідовність робіт)
- 24. режими будівництва (змінність, експлуатація будівлі)
- 25. умови організації будівництва.

Практичний досвід відкриває реальну картину, що основними причинами рекламаций та недоліків на вже встановлених світлопрозорих конструкціях є відсутність або недосконале проектування, оскільки всі проектні рішення, розмежування та координацію виконання робіт можна достатньо легко описати.

Для визначення послідовності робіт та обрання відповідних рішень щодо монтажу світлопрозорих конструкцій необхідно проаналізувати основні метод-утворюючі ознаки, а саме:

I-ознака. Метод улаштування віконних конструкцій

- I_1 - улаштування у новобудові;
- I_2 - вибіркова заміна у існуючому будинку;
- I_3 - ремонт вікон.

II-ознака. Параметри фронту робіт

- II_1 - просторові параметри фронту робіт (кількість поверхів, діляниць, захваток);
- II_2 - технологічні параметри фронту робіт (обсяги та трудомісткість процесів);
- II_3 - часові параметри (терміни монтажу, інтенсивність);

III-ознака. Конструктивні параметри

- III_1 – параметри стін та розміщення конструкції;
- III_2 – наявність додаткових елементів (вбудовані/навесні ролети, захист від випадіння, маркізи);
- III_3 – додаткові вимоги до теплоізоляції та захисту від вологи (реставрація);
- III_4 – додаткові вимоги по водовідведенню.

IV-ознака. Технологічність процесу монтажу

- IV_1 - наявність системи механізації;
- IV_2 - наявність спеціального інструменту;
- IV_3 - малоопераційність процесу монтажу віконної конструкції;

IV_4 - трудомісткість підготовчих та допоміжних операцій.

V-ознака. Дані щодо об'єкта

V_1 - технічний стан будівлі;

V_2 - наявність пошкоджень прорізу;

V_3 - наявність попередніх модернізацій

Комбінація вищезгаданих ознак може сформувати будь-який варіант монтажу. Для визначення методу монтажу на конкретному об'єкті, потрібно провести систематизацію та узагальнення будівельно-технологічних характеристик та умов виконання монтажу світлопрозорих конструкцій.

Оскільки дверні або балконні конструкції також є частиною світлопрозорих конструкцій будівлі, ми повинні враховувати особливості проектування та монтажу і для цих будівельних елементів. Для прикладу можна навести складові процесу проектування та відповідальність учасників процесу будівництва (Табл. 2.1.).

Таблиця 2.1.

Процес проектування та розподіл відповідальності

Процес	Складові	Відповідальний
Збір вихідних даних	Кліматичні вимоги; Рівень підлоги всередині; Безбар'єрність; Рівень підлоги зовні; Компенсаційні заходи; Послідовність будівельних робіт; Вимоги державних норм.	Замовник, проєктувальник
Визначення висот	Визначення висот, рівень зсередини і ззовні, поріг; Висота накопичення води, стандартне водовідведення; Висота накопичення води, водовідведення у надзвичайної ситуації.	Проектувальник

Процес	Складові	Відповідальний
Проектування віконних і дверних конструкцій	Проектування конструкції; Уточнення висоти накопичення води; Конструкція цоколя, водовідведення; Придатність ізоляційного примикання. Підтвердження водонепроникності (за потреби)	Проектувальник, фахівець по гідроізоляції, проектувальник вікон
Проектування примикання гідроізоляції	Визначення способу примикання; Виконання примикання підлоги; Додаткові заходи (за потреби); Сумісність контактних матеріалів	Проектувальник, фахівець по гідроізоляції, виробник гідроізоляції
Узгодження з наступними будівельними роботами	Належне примикання фасаду; Перехід від відкритої території до будівлі	Проектувальник, фахівець з проектування в цій сфері, проектувальник будівельної організації
Надання дозволу проведення робіт	Підтвердження проектування да виконання робіт	Замовник, уповноважена особа

2.3. Фактори навантаження та засоби кріплення віконних конструкцій

Усі навантаження які діють на віконні конструкції та на кріпильні елементи мають переноситись на будівельну конструкцію. Зворотної дії на конструкцію не має бути.

Сили, що діють, обумовлені наступними типами навантажень:

1. Власна вага віконної конструкції (діє постійно);
2. Вага додаткового обладнання (ролети та ін.);
3. Вітрові навантаження (змінні);
4. Температурні коливання (змінні);
5. Снігове навантаження (мансардні вікна, купола)

Крім того необхідно враховувати змінні види навантажень:

1. Вертикальні експлуатаційні та динамічні навантаження на рухомі частини вікон (стулки);

2. Механічне навантаження на зламо-, куле- і вибухостійки елементи конструкції;
3. Горизонтальне експлуатаційне навантаження та ударні навантаження елементів захисту від падіння;
4. Температурні навантаження (пожежа);
5. Землетрус.

Виходячи з цих параметрів, кріплення світлопрозорих конструкцій повинно здійснюватись з урахуванням характеристик матеріалів стін та конструкції, перенесення навантаження, засобів кріплення. Крім цього, при кріпленні віконних конструкцій ми також повинні враховувати і наступні фактори та критерії:

1. Конструкція вікон (розмір та конструкція вікон, загальна вага та вага стулки, а також тип відкривання);
2. Тип кріплення (залежно від обраного типу виникає різне навантаження та тримальна здатність);
3. Зовнішня стіна (Здатність стіни нести навантаження від кріплень);
4. Положення в прорізі (звичайний монтаж в зоні стіни або виносний монтаж).

Сучасний розвиток технологій не дозволяє здійснити належне кріплення вікон та передачу навантажень за допомогою піни, клею або герметиків. Кріплення конструкцій має відбуватись механічним способом.

Слід також розділяти сили, що діють в площині вікна, і сили, що діють під кутом. Перші передаються на будівельну конструкцію через несучи колодки, на які припадає тиск. В другому варіанті, де вікно встановлюється в зоні утеплювача, ці сили повинні передаватись на стіну за допомогою кронштейнів або попередньо встановлених монтажних рам з встановленими підкладками (Рис. 2.6.). Потрібно враховувати, що кріплення, де сили діють під прямим кутом до площини вікна, піддаються навантаженню на відрив, поперечний розтяг та згинання.

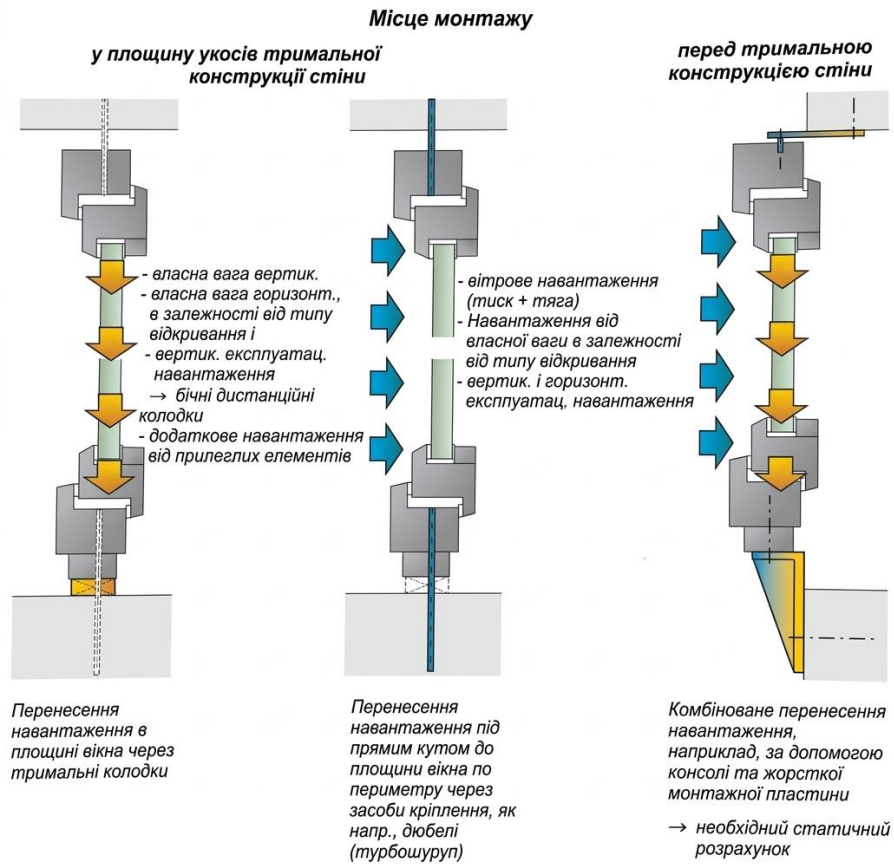
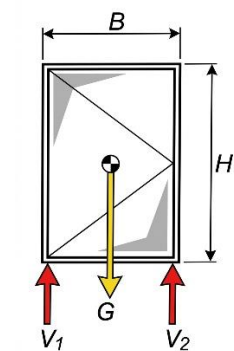
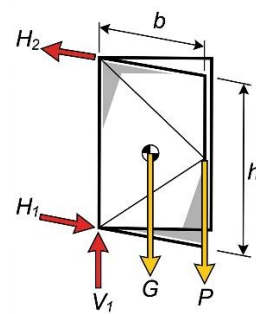


Рис. 2.6. Діючі сили та передача навантаження

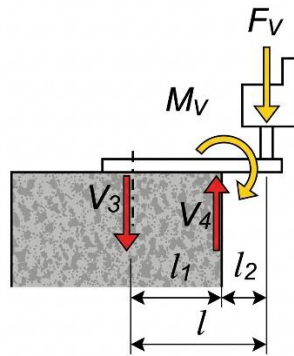
В залежності від положення вікна в стіні та типу відкривання ми можемо подивитися які сили діють на конструкцію та елементи кріплення в площині вікна (Рис. 2.7.):



Стулка закрыта

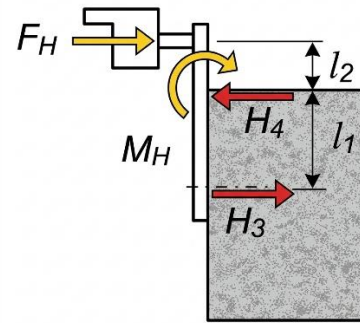


Стулка відкрита



Нижній вузол

(вікно не площині стіни)



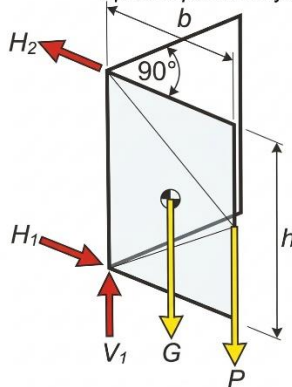
Бічний вузол

(вікно не площині стіни)

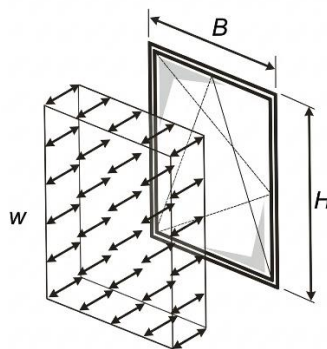
Рис. 2.7. Сили які діють в площині вікна

Сили, що діють перпендикулярно площині вікна, передаються на несучу конструкцію через механічне кріплення. При цьому враховуються наступні впливи (Рис. 2.8.):

Навантаження від власної ваги й вертикальне експлуат. навантаження при відкритій стулці



Вплив вітрового навантаження (тиск + тяга)



Вплив горизонтального експлуат. навантаження

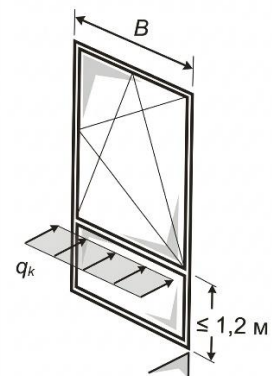


Рис. 2.8. Сили які діють перпендикулярно до площини вікна

Світлопрозорі конструкції, зазвичай, необхідно кріпити по всьому периметру. Якщо віконна конструкція має додаткові елементи, такі як ролети, вентиляційні системи, пряме кріплення до стіни в зоні стику неможливе. Тому тут треба передбачити альтернативні заходи. Наявність додаткових розширювачів також вимагає особливого підходу до кріплення конструкції, тому що багато з'єднань можуть привести до надмірних деформацій та погіршенню властивостей конструкції (Рис. 2.9.).

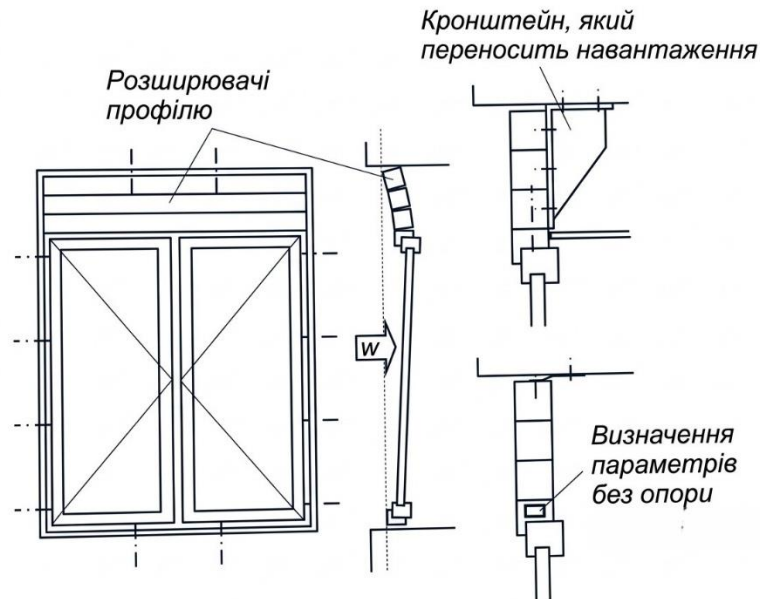


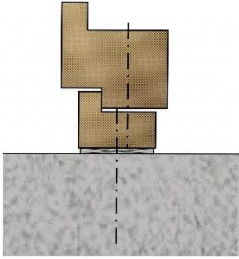
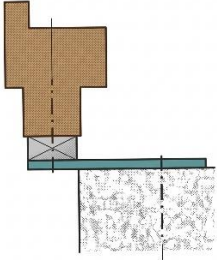
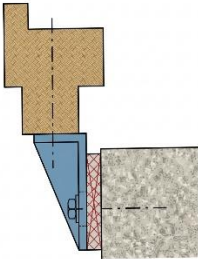
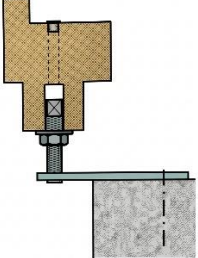
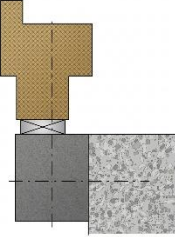
Рис. 2.9. Деформації збірної розширювача та варіант кріплення

Для кріплення світлопрозорих конструкцій використовується багато різних варіантів кріплення, які залежать від типу конструкції та матеріалу стін та місця розташування конструкції відносно стіни (Табл. 2.2.):

Таблиця 2.2.

Системи кріплення світлопрозорих конструкцій

	Рамні дюбелі та шурупи для прямого кріплення. Мають універсальне застосування як у старих, так і у нових будівлях. Навантаження на зсув, розтяг і згін.
	Анкерні пластини. Гнучкість дозволяє компенсувати зміну довжини рами внаслідок термічного впливу. Навантаження діють перпендикулярно площині вікна.
	Направляючі рейки. Доцільні там де є високі вимоги до компенсації руху, наприклад високі прольоти. Потрібні компенсуючі ковзаючі прокладки.

	Рама попереднього монтажу. Такі рами встановлюються на етапі «мокрого» будівництва або це можуть бути закладні рами у «префаб» будівництві. Фальш рами запобігають пошкодженню вікон на перших етапах будівництва.
	Металеві планки. Вони як правило стійкі до згину та витримують великі конструкції, наприклад «французькі балкони». Вони як правило прикручуються або зварюються з металевими частинами у перекритті або стіні.
	Консолі. Такі рішення використовуються в багатошарових стінах. Потрібно звертати увагу на забезпечення переносу навантаження, ізоляцію, антикорозійний захист.
	Регульовані системи кріплення. Використання у багатошарових стінах. Є можливість регулювання встановленої конструкції. Потрібно звертати увагу на забезпечення переносу навантаження, ізоляцію, антикорозійний захист.
	Рама виносного монтажу. Допоміжна рама з спіненого полістиролу або ПВХ-профілю для кріплення конструкції в зоні утеплювача. Встановлюється заздалегідь.

Підтвердження придатності засобів і систем кріплення, а також визначення несучої здатності та розрахункових навантажень залежно від впливу можуть надаватись виробником кріплень.

У якості типових елементів кріплення використовуються наступні засоби наведені у Табл. 2.3.

Таблиця 2.3.

Типові засоби кріплення світлопрозорих конструкцій

	Шурупи для прямого кріплення. Використання з дюбелями або без них. Універсальне використання в різних будівлях. Необхідно використання дистанційних колодок.
	Пластикові та металеві рамні дюбелі. Для кріплення рами різних типах будівель. Наскрізний монтаж. Необхідно використання дистанційних колодок.
	Анкерні болти, анкери високих навантажень. Для кріплення консолей, несучих кронштейнів. Для кріплення рами різних типах будівель. Наскрізний монтаж. Треба звертати увагу на рекомендований момент затягування.
	Композитні та хімічні анкери. Для кріплення консолей, кронштейнів тощо. Кріплення у перфоровані блоки. Треба звертати увагу на рекомендований момент затягування.
	Шурупи для дерев'яних конструкцій. Шурупи для прямого кріплення кронштейнів, монтажних рам у дерев'яні стіни.

Для коректного вибору засобу кріплення для певного матеріалу та виду навантажень, потрібно порадитись с сертифікованим консультантом виробника кріпильних елементів. Оскільки металеві елементи в стиках примикання є тепловими містками, потрібно звертати увагу на їх розташування в поєднання з ізоляційними матеріалами, щоб уникати утворення теплових містків.

2.4. Приклади виконання робіт

У якості прикладу виконання робіт були обрані найбільш поширені в країні варіанти профільних систем та стін. До них відносяться:

5. Дерев'яні вікна (Рис. 2.10.);

6. ПВХ-вікна (Рис. 2.11.);
7. Алюмінієві вікна (Рис. 2.12.);
8. Дерев'яно-алюмінієві вікна (Рис. 2.13.).

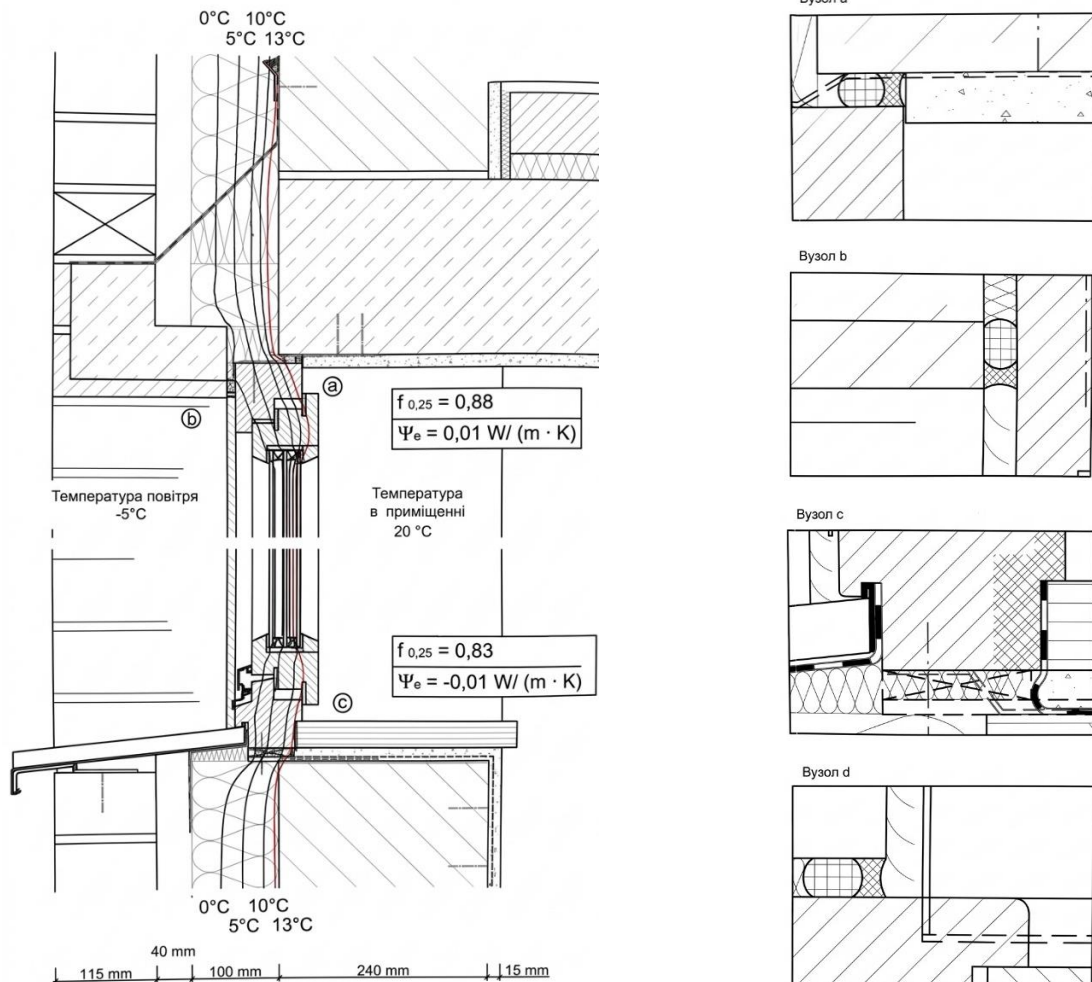


Рис. 2.10. Приклад улаштування дерев'яного вікна

Конструкція зовнішньої стіни:

Зовнішня стіна з теплоізоляцією між стіновими панелями та вентильованим фасадом, важкою облицювальною оболонкою, сформованою з функцією упору з чвертю. Облицювальна оболонка - відкрита клінкерна кладка. Зовнішня стіна складається з легкої вертикально перфорованої цегли з товщиною теплоізоляції між стіновими панелями 100 мм та парапетом з гладкою обробкою. З боку приміщення — підвіконня з граніту.

Віконна конструкція: Дерев'яне вікно (IV 78, м'яка деревина).

Положення вікна:

Встановлене з виносом спереду на зовнішній край (укосу) кладки.

Кріплення до будівельної конструкції:

За допомогою жорстких анкерних пластин збоку з можливістю регулювання, верхнє — за допомогою пластин, прикріплених дюбелями або гвинтами, передачею навантаження за допомогою жорстких опор унизу, закріплених з боку приміщення дюбелями чи шурупами.

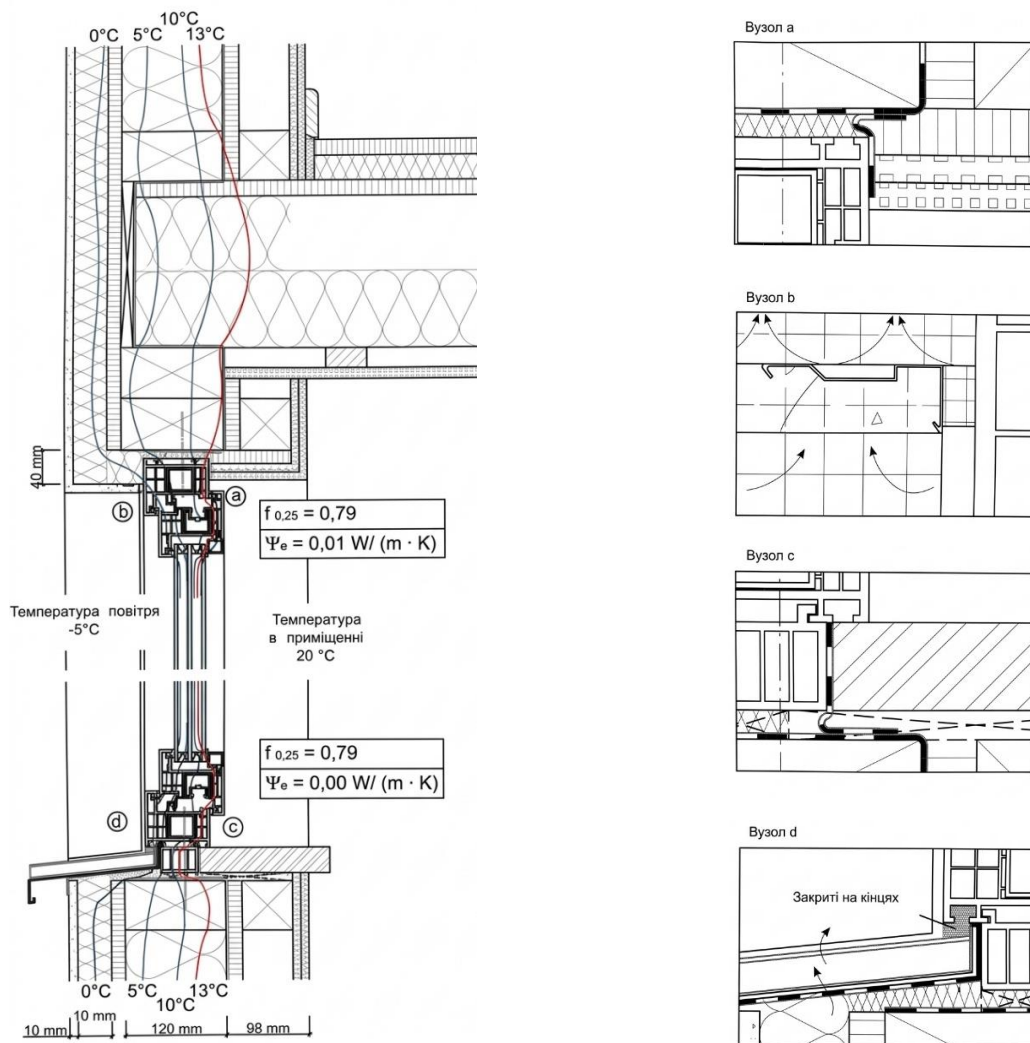


Рис. 2.11. Приклад улаштування ПВХ-вікна

Конструкція зовнішньої стіни:

Стіна з дерев'яної каркасно-балкової конструкції з монтажною площиною без чверті та інсталяційною площиною 60 мм з системою теплоізоляції зовні загальною товщиною 50 мм та гіпсокартонними плитами зсередини з перерізом балок 60 x 120 мм. У верхній зоні — подвійна перемичка. Товщина теплоізоляції в балковій стіні — 120 мм, з боку приміщення - підвіконня з натурального каменю.

Віконна конструкція: Пластикове вікно (5-камерна система).

Положення вікна: Вікно встановлене в одному рівні з каркасно-балковою стіною.

Кріплення до будівельної конструкції: Пряме кріплення шурупами.

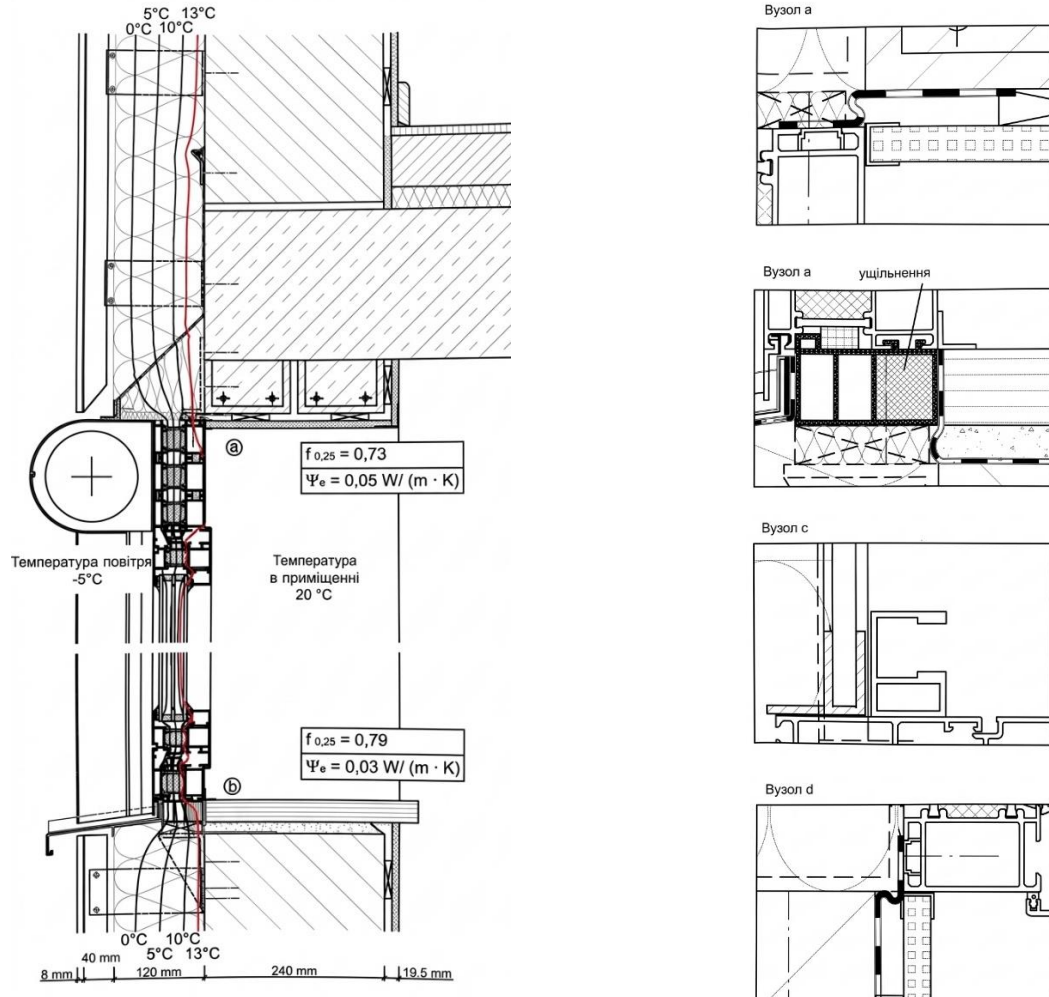


Рис. 2.12. Приклад улаштування вікна з алюмінію

Конструкція зовнішньої стіни: Зовнішня стіна з теплоізоляцією між стіновими панелями та вентильованим фасадом, легкою облицювальною оболонкою без чверті. Облицювальна оболонка виконана з ламінованих плит високого тиску (HPL панелі). Зовнішня стіна виконана з легкої вертикально перфорованої цегли з товщиною теплоізоляції між стіновими панелями 120 мм. З боку приміщення — підвіконня з граніту. Зовнішня стіна облицьована гіпсокартонними плитами з боку приміщення.

Віконна конструкція: Алюмінієве вікно з термомостом, розширювачем для фронтальних ролет угорі.

Положення вікна: З виносом у площину теплоізоляції, так що фронтальні ролети з заокругленням примикають до фасаду.

Кріплення до будівельної конструкції: За допомогою кутів на дюбелях чи шурупах, перенесення навантаження через консолі вниз.

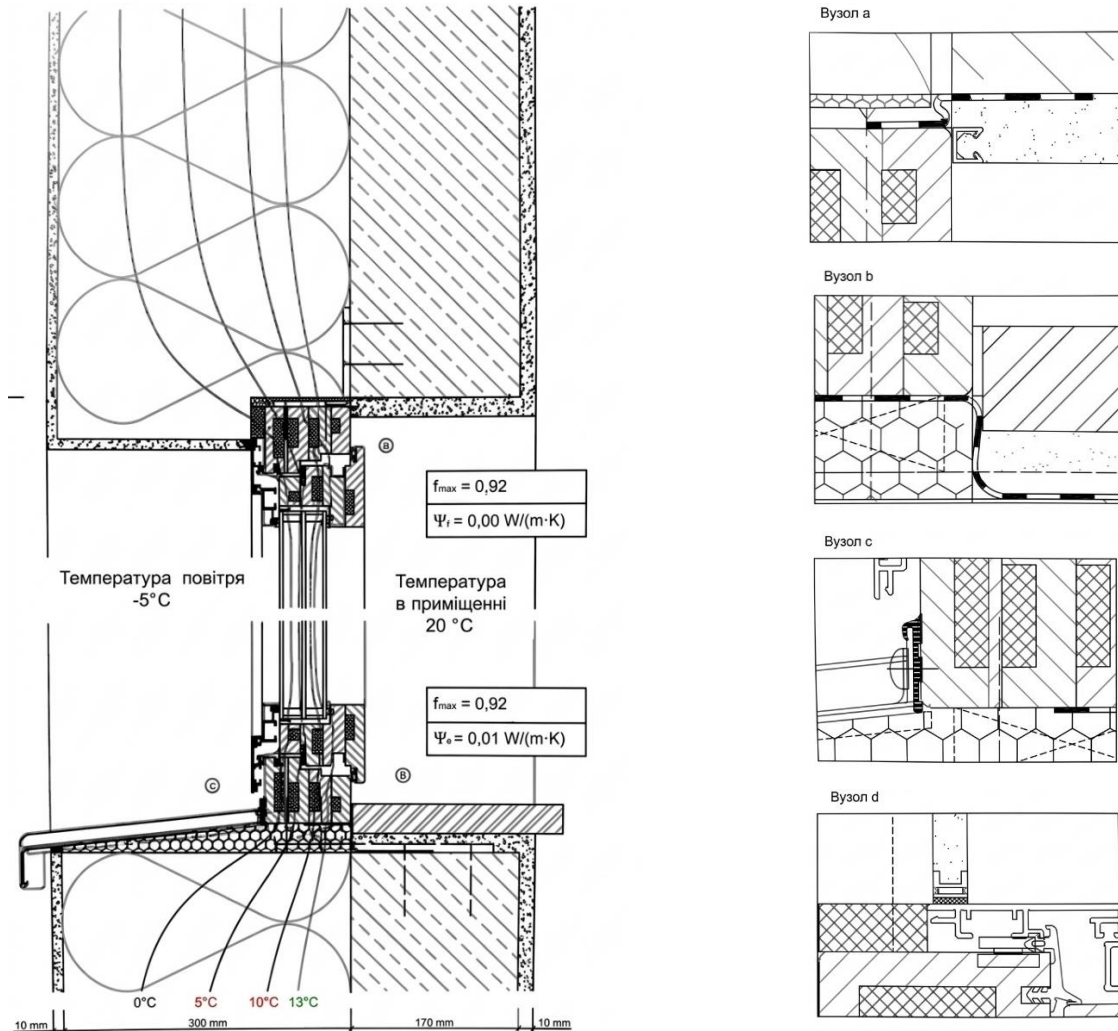


Рис. 2.13. Приклад улаштування вікна з дерево-алюмінію

Конструкція зовнішньої стіни: Зовнішня стіна за стандартом пасивного будинку з зовнішньою теплоізоляцією та силікатної цегли без чверті. Зовнішня система теплоізоляції загальною товщиною 310 мм, з боку приміщення — підвіконня з граніту.

Віконна конструкція: Дерев'яно-алюмінієве вікно (конструкція з алюмінієвою накладкою) за стандартом пасивного будинку. Алюмінієва накладка зі звареними (герметичними) кутами.

Положення вікна: Встановлене в площині теплоізоляції, внутрішня частина рами вікна в одній площині зі стіною із силікатної цегли.

Кріплення до будівельної конструкції: За допомогою пластин, встановлених на дюбель або шуруп.

2.5. Екологічні фактори при виконанні робіт

При демонтажу старих вікон потрібно уникати пошкоджень прорізу, тому що будь яке пошкодження потрібно буде відновлювати під час встановлення нових вікон. Наразі існує багато відповідного інструменту який допомагає уникнути таких ситуацій.

Демонтовані вікна мають потрапити на спеціальний майданчик для вторинної переробки. Наразі в Україні такі заводи ще відсутні. В європейських країнах цей процес врегульований. Старе вікно попадає на переробку де відбувається відокремлювання основних компонентів вікна: скла, армування, ущільнювачів, ПВХ або іншого матеріалу рам. Після чого всі матеріали направляються до вторинної переробки. Наприклад, зі старого ПВХ виготовляються гранули, які їдуть на виробництво нових профілів для вікон. Повторне використання будівельних компонентів має значний потенціал у сфері екологічної відновлюваності, оскільки дозволяє переносити ресурси зі збудованого середовища на один або навіть кілька наступних життєвих циклів. Це, своєю чергою, дозволяє використовувати менше первинних ресурсів при будівництві або реконструкції будівель. За цих обставин розглядають дві основні стратегії, щоб досягти максимального успіху при повторному застосуванні матеріалів у будівельній сфері:

1. Повторне використання будівельних матеріалів у разі (часткового) знесення будівель.

Це передбачає, що будівельні компоненти не містять шкідливих речовин і технічно придатні для повторного використання. В будівлях, збудованих до 2000 року, потенційно присутня значна кількість шкідливих речовин, тому можливості повторного використання тут обмежені.

2. Урахування майбутнього повторного використання та перероблення при плануванні нових будівель.

Крім основної мети - уникнення зайвих відходів, необхідно враховувати аспекти логістики для неруйнівного демонтажу, транспортування та тимчасового зберігання, економічної ефективності й правових перешкод. Рішенням, орієнтованим на вирішення двох перших аспектів, може бути двоетапний монтаж з використанням монтажних рам.

Шкідливі та небезпечні речовини в будівлях можуть потрапляти в будівельну конструкцію з різних причин. Можна виділити три основні групи та інші особливі випадки (таблиця 2.4).

Таблиця 2.4.

Шкідливі та небезпечні речовини в будівельних спорудах

Причина	Опис/Визначення	Приклади
Присутні в будівельних матеріалах	Шкідливі речовини, які присутні у виробництві будівельних виробів, будівельних матеріалів та арматури. Як правило, вони мають вигляд добавок або природного основного матеріалу.	Азбестоцементні плити, герметики для швів, що містять ПХБ (поліхлоровані біфеніли), дерев'яні конструкції, що містять ПХФ (поліхлоровані феноли), розчин/бетон з вмістом хрому, важкі метали
Спричинені використанням	Шкідливі речовини, які потрапили в будівельну конструкцію в результаті специфічної експлуатації об'єкта.	Забруднення МКВ/БТЕХ (мінеральні вуглеводні/бензол, толуол, етилбензол, ксилол) у виробничій зоні, сажа, що містить ПАУ (поліароматичні вуглеводні вид роботи опалювальних систем), зберігання та використання хімічних речовин (кислоти/розчинники) тощо.

Причина	Опис/Визначення	Приклади
Вплив довкілля	Шкідливі речовини, які потрапляють у повітря у вигляді газу, аерозолі, пилу, а також через фауну. Мікробіологічні пошкодження, спричинені будівельними дефектами.	Важкі метали, бензоли, поліциклічні ароматичні вуглеводні у вигляді залишків або через проникнення в стіни/фасади, голубиний послід, пліснява, домовий грибок тощо.

Підприємства, які займаються ремонтними роботами, повинні призначити відповідальних працівників, які мають відповідне підтвердження знань і здатні провести первинну оцінку стану старих вікон і будівельних матеріалів, щоб виключити будь-які ризики під час робіт.

Висновки до розділу 2

Важливими передумовами для експлуатаційної придатності вікон і зовнішніх дверей є обов'язкове дотримання наступних вимог до виконання примикань:

3. Чітке розмежування функціональних рівнів і функціональної зони.
4. Захист стику примикання від зовнішніх і внутрішніх навантажень.

Примикання до будівельної конструкції з боку приміщення повинно бути герметичним по всьому периметру. Потік повітря між внутрішньою та зовнішньою стороною, який проходить через стик примикання, має бути практично виключений згідно з вимогами до герметичності.

У функціональній зоні повинні бути виконані вимоги щодо передачі навантаження, теплоізоляції та, за необхідності, допоміжні заходи зі звукоізоляції. На зовнішньому та внутрішньому рівнях має бути гарантовано, щоб функціональна зона залишалася сухою і постійно забезпечувалося стабільне виконання вищезгаданих властивостей.

Захист від атмосферних впливів зовнішнього рівня повинен бути непроникним для проливної дощу, будь-яка волога, що проникла, має контролюватися відводитися назовні. Щоб уникнути пошкоджень від вологи в зоні примикання, будівельні елементи «стик - стіна» повинні розглядатися як цілісна система. З огляду на дифузію водяної пари, вся система мусить бути виконана за принципом «більша щільність зсередини, ніж ззовні».

Ці загальні вимоги рівноцінно діють при виконанні робіт у новобудові та при реконструкції старих будівель.

РОЗДІЛ 3. УЛАМКОВА ДІЯ НА СВІТЛОПРОЗОРИ ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

3.1 Феноменологія уламкоутворення при вибуху поблизу світлопрозорих конструкцій

Вибух поблизу будівлі рідко зводиться до одного уражального чинника: повітряна ударна хвиля, дія зовнішніх уламків і руйнування самого скління зазвичай поєднуються, причому в різних пропорціях. Тому стосовно світлопрозорих огорожувальних конструкцій (СОК) від самого початку слід розрізняти дві різні якості — стійкість до кожного з навантажень окремо та здатність обмежувати небезпеку вже після того, як конструкцію пошкоджено. Чинні стандарти вибухостійкості регламентують умови хвильового навантаження та порядок оцінювання наслідків руйнування, тоді як балістичні стандарти описують дію чітко визначених ударників [26–33]. Наскільки ці підходи придатні для уламкової загрози, якими є механізми взаємодії уламків зі склінням і куди варто спрямувати дослідження комбінованого навантаження — саме цим питанням присвячено розділ.

3.1.1 Класифікація уражальних факторів вибуху

Аналізуючи вплив вибуху на будівлю, доцільно розрізняти кілька уражальних чинників. Їхня відносна значущість не є сталою — вона залежить від типу джерела, відстані, положення конструкції та характеру навколишньої забудови [34, 35].

Першим і найкраще вивченим чинником є повітряна ударна хвиля — короткочасне навантаження тиском на поверхню конструкції. Її прийнято характеризувати часовою залежністю тиску, піковим надлишковим тиском, питомим імпульсом і тривалістю фаз; для фасаду при цьому важливо розрізняти параметри падаючої та відбитої хвиль і зважати на умови обтікання. Саме показники тиску й імпульсу покладено в основу випробувань за EN 13123/13124, ISO 16933 та ASTM F1642 [26–29, 36].

Другий чинник — первинні уламки, тобто фрагменти корпусу або заздалегідь сформовані елементи, які походять із самого джерела вибуху. Сюди

належать продукти природного та конструктивно заданого дроблення оболонки, а також готові уражальні елементи (ГУЕ). Маса, форма, швидкість і напрям руху таких уламків можуть істотно різнитися навіть у межах одного вибухового епізоду. Підкреслимо: термін «первинний» указує лише на походження уламка й нічого не каже про його швидкість чи дальність польоту.

Третім чинником є вторинні уламки — частини навколишніх об'єктів, що відокремлюються або набувають руху внаслідок вибуху: фрагменти скла, кладки, бетону, облицювання, ґрунту, незакріплених предметів. Стосовно конкретної СОК серед них варто виокремлювати зовнішні вторинні уламки, які вдаряють у конструкцію ззовні, та власні уламки скління, що утворюються при його руйнуванні, — ці групи мають різні механізми появи й оцінюються за різними критеріями [34, 35, 37]. Поділ на зовнішні та власні уламки завжди встановлюється відносно досліджуваної конструкції: фрагмент сусіднього вікна для неї — зовнішній вторинний ударник, тоді як уламок її власного скління — продукт руйнування. Відповідно, опір проникненню зовнішнього ударника, небезпека розльоту власних фрагментів та утримання заповнення, стулки й рами характеризують різні складові захисту й оцінюються окремо [34, 37].

Четвертим чинником виступають теплова дія та пожежа. Термічні напруження, нагрівання полімерних прошарків і подальше загоряння здатні змінювати стан скління; значущість цих впливів визначається конкретним сценарієм, і жодної універсальної дистанції, за якою їх можна не враховувати, не існує. Нарешті, п'ятий чинник — передавання коливань через ґрунт та опорні конструкції, яке залежить від положення джерела, ґрунтових умов і конструктивної схеми будівлі; його враховують тоді, коли воно входить до розрахункового сценарію.

Далі увагу зосереджено передусім на хвильовому та уламковому навантаженнях. Таке виокремлення окреслює межі аналізу, але аж ніяк не означає, що решта чинників для конкретного об'єкта є неістотними.

3.1.2 Часова послідовність дії хвилі та уламків

Для комбінованого навантаження визначальним є співвідношення трьох величин: часу прибуття хвилі, моменту удару уламка та поточного стану конструкції. Показово, що однакова відстань до джерела зовсім не гарантує однакової послідовності подій — вона різниться від сценарію до сценарію.

Швидкість фронту ударної хвилі змінюється в міру поширення, тож час її прибуття визначають або за моделлю, яка відповідає типу джерела й умовам поширення, або безпосередньо за вимірюваннями; у щільній забудові доводиться додатково враховувати відбиття та екранування. Зіставляти час руху хвилі та уламків коректно лише від спільного початку відліку.

Аеродинамічне гальмування уламка також нерівномірне. У спрощеній одновимірній моделі зі сталими масою, лобовою площею та коефіцієнтом опору залежність швидкості від пройденої відстані має вигляд

$$v(R) = v_0 e^{-kR}, \quad k = \frac{\rho_{\text{air}} C_D A}{2m}$$

де v_0 — початкова швидкість; R — пройдена відстань; ρ_{air} — густина повітря; C_D — коефіцієнт опору; A — лобова площа; m — маса уламка; k має розмірність м^{-1} . Зрозуміло, що обертання, зміна орієнтації, деформація тіла та залежність C_D від режиму обтікання звужують застосовність цього наближення.

Час прибуття уламка знаходять інтегруванням оберненої швидкості вздовж траєкторії — за змінної швидкості частка $R/v(R)$ часом польоту не є. Для наведеної моделі отримуємо

$$t_{fr}(R) = \int_0^R \frac{dx}{v(x)} = \frac{e^{kR} - 1}{kv_0}$$

Позначимо різницю часу прибуття уламка та хвилі як $\Delta t = t_{fr} - t_A$. За $\Delta t < 0$ удар передує хвилі, за $\Delta t > 0$ хвиля починає діяти раніше. Втім, додатне Δt ще не означає, що хвильове навантаження на момент удару вже вичерпалося: його тривалість і фазу руху конструкції треба зіставляти з моментом контакту.

З огляду на це доцільно розглядати три сценарії: С1 — удар уламка до приходу хвилі; С2 — удар після завершення прийнятого інтервалу суттєвої

хвильової дії, із заданим залишковим станом конструкції; С3 — удар у межах цього інтервалу, коли локальний і хвильовий впливи перекриваються. Межі інтервалу задаються програмою дослідження; наголосимо, що позначення С1–С3 — це не класи захисту й не дистанційні зони. Межі між сценаріями встановлюють розрахунком або вимірюванням для заданої загрози. Той факт, що уламок перейшов до дозвукового руху, ще не свідчить про втрату ним небезпечності, а у дослідженні залишкової стійкості слід враховувати і пошкодження, отримані перед хвилею, і стан конструкції в момент наступного удару [38].

3.1.3 Роль світлопрозорих конструкцій у загальній картині уражальної дії

Світлопрозоре заповнення нерідко руйнується за навантаження, яке ще не загрожує несучій здатності основної конструктивної системи будівлі. Утім, черговість пошкодження не є законом природи: вона залежить від розмірів, товщини, типу скла, рами та кріплень, тож узагальнене порівняння з несучою стіною не замінює аналізу конкретного елемента [35, 37].

Зруйноване скління саме стає джерелом власних вторинних уламків. Бюлетень UNDSS наводить промовисту оцінку для великих вибухових атак: близько 80% постраждалих пов'язують із первинними та вторинними уламками, і близько 80% відповідних уламкових поранень і смертей припадає на скло [37]. Ці частки характеризують саме узагальнення, наведене у джерелі, — механічно переносити їх на всі вибухи чи всі види бойових уражень будівель не варто.

Ця подвійна роль СОК — водночас об'єкта зовнішньої дії та джерела власних уламків — і змушує розглядати повний ланцюг пошкодження й утримання конструкції. Послідовність подій може включати дію хвилі або зовнішнього уламка, пошкодження скла й рами, утворення власних уламків, розрив прошарку чи втрату крайового утримання; порядок цих подій визначається сценарієм С1–С3. Для людей усередині приміщення небезпечними є і проникнення зовнішніх уламків, і переміщення пошкоджених частин самої конструкції.

Попередня пробоїна або тріщина змінює напружений стан і подальший відгук скління. А от її вплив на тиск усередині приміщення не такий однозначний: він залежить від площі отворів, об'єму приміщення, інших прорізів та відбиття хвиль, тому сама наявність пробоїни не дає підстав для висновку ані про величину, ані навіть про напрям зміни внутрішнього тиску.

Зрештою, уламкова загроза за своєю природою потребує статистичного опису. Для проєктування важливі параметри удару саме на поверхні конструкції, а не лише початкові характеристики джерела, причому визначеність вихідних даних і межі їх застосування мають зазначатися разом із результатом.

3.1.4 Межі нормативного оцінювання уламкової дії

Розглянуті стандарти вибухостійкості — EN 13123/13124, ISO 16933 та ASTM F1642 — регламентують хвильове навантаження й оцінювання поведінки скління. Небезпека уламків, утворених самим випробуваним елементом, входить до такого оцінювання, однак отриманий результат нічого не говорить про стійкість до окремо заданого потоку зовнішніх твердих уламків [26–30].

Своєю чергою, EN 1063 установлює класи BR1–BR7 та SG1/SG2 для захисного скління, а EN 1522 і EN 1523 стосуються кулетривкості відповідних будівельних виробів та методу їх випробування [31–33]. Результат тут жорстко прив'язаний до встановлених ударників і процедури, тому переносити його на довільний уламок тієї самої швидкості або енергії без додаткового обґрунтування некоректно.

Отже, предметом подальшої розробки має стати метод оцінювання цивільних СОК за визначеної уламкової загрози, зокрема після хвильового навантаження або під час нього. Показово, що в суміжній галузі — балістичному захисті — вже існують стандартизовані методи MIL-STD-662 та STANAG 2920 / AEP-2920 [39–42]; дослідницька задача, власне, й полягає в обґрунтуванні та перевірці їх адаптації до повної СОК, визначеного стану пошкодження та критеріїв безпеки в захищеному просторі. Мета розділу — визначити фізичні механізми, межі наявних методів і вимоги до досліджень, без яких обґрунтоване оцінювання уламкостійкості СОК неможливе.

3.1.5 Огляд підходів до феноменологічного опису уламкоутворення

Уламкову дію описують аналітичними моделями, експериментальними методами та чисельним моделюванням. Кожен із цих підходів закриває свою частину задачі й має власні межі застосування.

Аналітичні моделі — статистичний опис мас уламків і моделі їх руху — дають початкові оцінки параметрів загрози. Класичні підходи Мотта й Гарні спираються на цілком конкретні припущення, тож їх застосування до іншої геометрії або до готових уражальних елементів щоразу потребує окремого обґрунтування [43–45].

Оцінювання вторинних уламків базується на випробуваннях скління, які дозволяють зафіксувати стан конструкції, розташування уламків і пошкодження контрольних поверхонь. Такі спостереження є основою для визначення категорії небезпеки, хоча повного розподілу швидкостей усіх частинок вони, звісно, не дають [28–30, 46].

Чисельне моделювання — методи скінченних елементів, контактної взаємодії та опису руйнування — відкриває шлях до дослідження і локального, і загального відгуку скління. Надійність прогнозу тут цілком визначається якістю матеріальних моделей, просторової дискретизації та зіставленням із дослідями: сама по собі наявність потужного програмного інструмента ще не гарантує достовірності конкретного розрахунку [47, 48].

Нарешті, експериментальні дослідження поєднаних впливів уже мають перші результати. Osnes, Dey, Hopperstad і Børvik вивчали багатопарове ламіноване скло після попереднього пошкодження, зокрема кульового удару, з подальшим навантаженням в ударній трубі, і показали, що попереднє пошкодження знижує вибухостійкість досліджених зразків [38]. Ця робота переконливо підтверджує значущість послідовності навантажень, хоча універсальних характеристик для всіх склопакетів, рам і сценаріїв уламкового потоку вона, зрозуміло, не встановлює.

Подальші зусилля, на наш погляд, варто зосередити на залишковій уламкостійкості повної СОК після хвильового впливу, множинних ударах,

часовому перекритті навантажень і ролі монтажного вузла. Новизна при цьому має визначатися конкретними умовами та результатами, які виходять за межі вже опублікованих робіт.

3.1.6 Типи загроз та поєднання уражальних дій

Оцінюючи захист СОК, пропонуємо розрізняти тип носія, функціональний тип бойової частини та власне навантаження на будівлю. Назва платформи — зокрема ударного БпЛА — сама по собі не визначає єдиного набору параметрів загрози: у проєктному сценарії потрібно встановлювати поєднання хвильового, уламкового, теплового та локального проникного впливів, а також положення джерела відносно огороження.

У таблиці 3.1 наведено аналітичне групування загроз за характером дії, призначене для постановки задачі захисту. Групи можуть частково перекриватися; цей поділ не претендує на роль нормативної класифікації боєприпасів чи переліку всіх наявних модифікацій, а відмінності конструктивного виконання всередині групи потребують окремих вихідних даних.

Таблиця 3.1 — Типи загроз та предмет оцінювання світлопрозорих конструкцій

Тип загрози	Поєднання дій	Предмет оцінювання СОК
Проникна фугасна	Локальне пошкодження перешкоди та вибуховий вплив; можливе утворення первинних і вторинних уламків.	Положення джерела відносно фасаду; стан прорізу, рами та основи кріплення.
Тандемна з кумулятивною та фугасною дією	Послідовна локальна проникна дія та подальший вибуховий вплив.	Наслідки попереднього пошкодження; межі застосовності результатів окремих хвильових і уламкових випробувань.
Фугасно-запалювальна	Хвильове навантаження, теплова дія та можливе займання навколишніх матеріалів.	Стан скління і вузлів утримання після механічного пошкодження; окрема оцінка пожежного сценарію.
Уламково-фугасно-запалювальна	Зовнішні первинні уламки, хвильова й теплова дія; вторинні уламки конструкцій.	Зовнішнє проникнення, небезпека власних уламків, утримання пошкоджених елементів та наслідки нагрівання.

Тип загрози	Поєднання дій	Предмет оцінювання СОК
Уламково-термобарична	Поєднання уламкового впливу, навантаження тиском і теплової дії.	Часова залежність тиску та теплового впливу; геометрія приміщення, прорізи й залишковий стан СОК.

Кілька застережень до цього групування. Кумулятивну дію слід відокремлювати від удару окремого твердого уламка: тандемність характеризує послідовність дій, а не походження уламків. У дослідженні СОК такі сценарії потребують самостійної постановки задачі, і результат випробування стандартним імітатором уламка не варто видавати за підтвердження захисту від усіх локальних проникних впливів. Для термобаричного та запалювального сценаріїв потрібно задавати фактичні параметри навантаження — сама назва типу не встановлює ані тривалості дії тиску, ані температури, ані меж ураження. Короткочасну теплову дію та подальшу пожежу розглядають окремо, адже підтверджена вибухо- чи уламкостійкість ще нічого не каже про вогнестійкість або здатність пошкодженої конструкції обмежувати поширення вогню.

Самостійною ознакою сценарію є положення джерела: вибух зовні будівлі, впритул до огороження або всередині приміщення вимагає різних граничних умов. Прямий удар носія чи великого його фрагмента слід відрізнити від дії уламкового поля — для звичайної фасадної СОК заявляти захист від прямого влучання лише на підставі окремого випробування скління неприпустимо. До оцінювання всієї системи включають також стан стіни, прорізу та монтажної основи [34, 35, 37].

Таким чином, вихідний опис загрози має містити склад дій, їхню послідовність, положення джерела, параметри навантаження на СОК, початковий стан конструкції та критерії прийнятності. Сценарії С1–С3 описують лише часовий зв'язок хвилі й уламкового удару — пожежу, прямий удар чи кумулятивну дію вони не охоплюють, і для кожного додаткового впливу умови підтвердження захисту доводиться визначати окремо.

Підсумовуючи: СОК одночасно сприймає зовнішні навантаження й сама може ставати джерелом небезпечних уламків. Хронологію комбінованого впливу

зручно описувати сценаріями С1–С3, встановленими для конкретної загрози, а нормативну прогалину слід пов'язувати з оцінюванням зовнішнього уламкового навантаження на цивільну СОК та його поєднання з хвилею — з опорою на наявні балістичні методи та експериментальні дослідження.

3.2 Характеристики поля первинних уламків і вихідні дані для оцінювання

Поле первинних уламків описують розподілами мас, форми, швидкості, напрямків руху та кількості влучень у задану площу. Принципово, що для оцінювання СОК усі ці параметри мають визначатися в місці розташування конструкції: початкові характеристики джерела та параметри удару на фасаді — величини не взаємозамінні. Нижче розглянуто типи уламкових полів, можливості спрощених моделей і вимоги до вихідних даних. Одразу зауважимо: аналітичні оцінки слугують тут для формування дослідницьких сценаріїв, а не для встановлення «безпечних дистанцій» чи гарантованого пробиття конкретної конструкції.

3.2.1 Класифікація засобів ураження за характером поля первинних уламків

За механізмом формування первинних уламків доцільно розрізняти три групи; змішане поле розглядається як їх поєднання.

Тип А — природна фрагментація оболонки, коли руйнування утворює нерегулярні фрагменти з великим розкидом мас, форми й орієнтації. Одним із класичних наближень для опису мас тут є розподіл Мотта [43], хоча відповідність конкретного поля цьому закону щоразу потребує перевірки за експериментальними даними.

Тип Б — конструктивно задане дроблення оболонки. Характер поділу корпусу тут визначається його конструктивними особливостями, проте фактичні форма, маса та кількість фрагментів усе одно встановлюються експериментально. Цю групу важливо не плутати з готовими уражальними елементами, які існують як окремі тіла ще до вибуху.

Тип В — власне готові уражальні елементи. Задана геометрія помітно зменшує невизначеність форми й маси окремого елемента, але не усуває розкиду

швидкостей, напрямків та кількості влучень, тож для розрахунку захисної конструкції все одно потрібні характеристики фактичного поля в місці її розташування.

Змішане поле поєднує уламки оболонки з готовими елементами або іншими фрагментами джерела. Якщо пошкодження скління, рами та кріплень визначаються різними групами ударників, описати загрозу одним «характерним» ударником навряд чи вдасться. Звернімо увагу й на те, що функціональний тип бойової частини за п. 3.1.6 та механізм формування уламків — ознаки різні, і фіксувати їх слід окремо.

Для саморобних пристроїв та предметів навколо джерела спектр матеріалів і геометрії уламків особливо широкий. Це збільшує невизначеність, але не робить задачу недослідною. Варто лише пам'ятати, що стандартизоване хвильове випробування характеризує задане навантаження й результат для зразка, а не всі наслідки застосування конкретного пристрою [34, 49].

3.2.2 Аналітичні моделі формування поля первинних уламків

Розподіл мас уламків — модель Мотта (1947).

Одне з поширених подань моделі Мотта задає очікувану кількість уламків, маса яких перевищує m :

$$N(m) = N_0 e^{-\sqrt{\frac{m}{m_A}}}$$

де N_0 — загальна кількість уламків у прийнятій моделі; m_A — параметр масштабу. Функція $N(m)$ спадна; нормована щільність розподілу за кількістю має вигляд

$$f(m) = -\frac{1}{N_0} \frac{dN}{dm} = \frac{1}{2\sqrt{mm_A}} e^{-\sqrt{\frac{m}{m_A}}}$$

Додатна щільність кількості дорівнює $-dN/dm$, а для переходу до щільності ймовірності її ділять на N_0 . Важливо не змішувати розподіл за кількістю уламків і масово зважений розподіл. Параметр m_A визначають за даними або каліброваною моделлю; для емпіричних коефіцієнтів обов'язково зазначають одиниці та область застосування [43].

$$m_{50} = m_A (\ln 2)^2 \approx 0,48045 m_A$$

Тут m_{50} — медіана за кількістю, обчислена саме для наведеного подання розподілу; середньою масою вона не є і верхню частину спектра уламків не характеризує. Наприклад, суто математична підстановка $m_A = 2\text{--}4$ г дає $m_{50} \approx 0,96\text{--}1,92$ г — цей приклад лише ілюструє властивості формули й не приписує такі параметри жодному конкретному засобу ураження. Для оцінювання СОК доводиться враховувати весь обґрунтований діапазон ударників.

Оцінювання початкової швидкості.

Підхід Гарні будується на енергетичному балансі вибухової речовини та оболонки [44, 45]. Для ідеалізованої циліндричної схеми одна з класичних залежностей має вигляд

$$v_0 = \sqrt{2E_G} \sqrt{\frac{C/M}{1 + \frac{C}{2M}}}$$

де C — маса вибухової речовини; M — маса оболонки; E_G — питомий енергетичний параметр моделі, причому $\sqrt{(2E_G)}$ має розмірність швидкості. Числові коефіцієнти та геометричну схему слід брати з відповідного джерела, а не переносити між різними конфігураціями. Наголосимо: це наближення не дає ані повного просторового поля, ані розподілу мас, ані кінцевої швидкості удару по склінню, а його застосування до складної конструкції, неоднорідного корпусу чи готових елементів потребує підтвердження. У проєктній оцінці перевагу завжди мають виміряні характеристики загрози в заданій точці.

Сповільнення уламка на траєкторії.

Вплив опору повітря зручно проілюструвати одновимірною моделлю зі сталими m , A та C_D . Рівняння руху має вигляд

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_{air} C_D A v^2$$

За цих припущень $k = \rho_{air} C_D A / (2m)$, а розв'язки для часу та відстані слід розрізняти:

$$v(t) = \frac{v_0}{1 + kv_0 t}, \quad v(R) = v_0 e^{-kR}$$

Здатність уламка зберігати швидкість у межах цієї моделі характеризується відношенням $m/(C_D A)$. Якщо ж C_D , площа або орієнтація змінюються, рівняння руху доводиться інтегрувати з відповідними залежностями; параметри нерегулярних уламків при цьому задають як діапазони або розподіли, а чутливість результату оцінюють окремо.

Насамкінець підкреслимо: швидкість та енергія в місці влучення — лише частина опису удару. Висновок про пробиття вимагає ще й даних щодо форми та матеріалу ударника, кута, стану й закріплення скління, тому перевищення умовного енергетичного порога само по собі доказом не є.

3.2.3 Вихідні дані для оцінювання сучасної уламкової загрози

В умовах збройного конфлікту характеристики загроз швидко змінюються. Для СОК важлива ідентифікація конкретного сценарію, а не перенесення властивостей одного дослідженого зразка на всі вироби зі схожою назвою. Технічні повідомлення про ударні БпЛА, зокрема сімейств Shahed і «Герань», можуть слугувати відправною точкою для пошуку джерел, однак потребують простежуваності та перевірки.

Яким має бути джерело даних? Воно мусить містити дату, походження зразка або випробування, метод вимірювання та межі достовірності. Спостереження за знайденими уламками підтверджує їхню наявність і геометрію — але не початкову швидкість, кутовий розподіл чи щільність влучень у фасад. Опис зразка, рекомендована розрахункова модель і виміряне уламкове поле мають різний доказовий зміст; так само різними величинами є маса бойової частини, маса вибухової речовини й тротиловий еквівалент. Для еквівалента зазначають критерій і спосіб визначення — відновити з нього уламкове поле чи тепловий вплив неможливо. Кожну наведену швидкість слід пов'язувати з місцем та моментом її визначення.

Опис природних уламків потребує розподілу мас, характерної геометрії та даних щодо швидкості в обраному перерізі. Пошкодження конкретного вікна зіставляють із його фактичною комплектацією та станом; висновки на кшталт

«гарантованого пробиття будь-якого скління» чи «безпечної дистанції» з самої лише назви джерела загрози не впливають.

Для всіх сімейств ударників варто перевіряти узгодженість маси, розмірів і матеріалу. Габаритний об'єм нерегулярного фрагмента може помітно відрізнятися від фактичного об'єму матеріалу, та й порожнистість слід брати до уваги, — тож перевірка за густиною є простим і дієвим засобом виявлення неузгоджених вихідних даних. Якщо уточнити дані неможливо, невизначеність зберігають у сценарії, а не заміняють наведену масу довільно обчисленою.

У змішаному полі окремо враховують ті групи ударників, які можуть визначати локальне пробиття скління, пошкодження профілів або відмову монтажного вузла; об'єднання їх в один «середній уламок» щонайменше потребує перевірки репрезентативності.

Однозначними мають бути й позначення скла та склопакета. Для ламінованого скла з PVB-прошарком запис 44.2 означає два листи скла завтовшки по 4 мм із сумарною номінальною товщиною прошарку 0,76 мм — це ще не повний опис ізоляційного склопакета. Додатково зазначають обробку скла, тип прошарку, розміри та схему встановлення, адже захисні властивості встановлюються для випробуваної конфігурації [31].

3.2.4 Просторовий і кутовий розподіл поля уламків: значення для СОК

Поле уламків, як правило, просторово неоднорідне. Його напрямленість залежить від джерела, положення в момент вибуху, поверхні та навколишніх перешкод, тому для фасаду потрібно визначати локальну щільність влучень і розподіл напрямків; ізотропний розподіл припустимий хіба що як явно застережене наближення.

Кут удару відлічують від нормалі до поверхні скління. Зі зміною кута змінюються умови контакту, траєкторія в шарах і ймовірність рикошету. Загального правила — що похилий удар завжди підвищує чи, навпаки, знижує стійкість для всіх форм ударника — не існує: потрібні відповідні випробування або валідована модель. Екранування сусідніми спорудами, рикошети та утворення вторинних уламків також здатні змінювати загрозу для різних ділянок

фасаду, і ці ефекти розглядають окремо від питання про обґрунтованість спрощеної моделі прямого польоту.

3.2.5 Параметри загрози та межі нормативного підтвердження

Таблиця 3.2 — Параметри уламкової загрози для оцінювання СОК

Параметр	Потрібні відомості	Значення для оцінювання
Маса і геометрія	Розподіл мас; розміри; форма; матеріал	Вибір репрезентативних сімейств ударників
Швидкість	Значення біля конструкції; розкид; метод вимірювання	Енергія й імпульс контакту; невизначеність сценарію
Напрямок	Кут до нормалі; орієнтація; можливий рикошет	Умови контакту та перелік додаткових випробувань
Множинність	Кількість влучень на площу; відстань між ними	Повторна дія по вже пошкодженому матеріалу
Час	Момент удару щодо хвилі та руху панелі	Вибір сценарію C1, C2 або C3
Походження даних	Джерело; дата; конфігурація; похибка	Межі застосування результатів і потреба в перевірці

Примітка. Таблиця визначає склад вихідних даних, а не нормативні рівні загрози. Відсутнє значення не можна замінювати типовим числом без зазначення його походження та перевірки чутливості результату.

Класифікаційне випробування СОК підтверджує результат за цілком визначеного навантаження, тому перенесення його на інший сценарій вимагає обґрунтування сумісності параметрів. Сам факт появи іншого засобу ураження не знецінює хвильового випробування — він лише може зумовити додаткову перевірку зовнішнього уламкового впливу [26–34].

Підсумуємо. Параметри уламкового поля необхідно встановлювати в місці взаємодії з конструкцією; спрощені моделі придатні для попереднього аналізу за явно заданих припущень, але ані універсальних порогів пробиття, ані дистанцій безпеки з них не випливає. Основою проєктного сценарію мають бути простежувані дані, оцінка невизначеності та перевірка того, що обраний ударник справді відповідає фактичній загрозі.

3.3 Вторинні уламки та небезпека руйнування СОК

Вторинні уламки походять із навколишніх об'єктів, і для світлопрозорої конструкції вони можуть виступати у двох ролях — зовнішніх ударників або продуктів її власного руйнування. До першої групи належать фрагменти сусідніх елементів будівлі, ґрунту й предметів, до другої — уламки скла, частини рами, штапиків та інших деталей.

Скляні уламки становлять особливу небезпеку через можливу гостроту, швидкість і кількість. Водночас рівень ризику визначається конкретною конфігурацією та способом руйнування: не кожна СОК руйнується раніше за інші елементи будівлі, і не кожен уламок травмує за одним і тим самим механізмом [35, 37]. У цьому підрозділі систематизовано механізми утворення вторинних уламків, кінематику та енергетику скляних фрагментів, а також нормативний інструментарій оцінювання їхньої небезпечності.

3.3.1 Класифікація вторинних уламків при вибуховому навантаженні на будівлю

Аналізуючи джерела й механізми утворення вторинних уламків, доцільно розрізняти п'ять груп. Одразу застережемо: цей поділ описовий і нормативних класів небезпеки не запроваджує.

До першої групи належать фрагменти огорожувальних конструкцій — кладки, штукатурки, облицювання. Їхні розміри й характер руху залежать від способу кріплення та механізму відокремлення; для СОК вони є можливим зовнішнім ударним навантаженням. Другу групу складають фрагменти несучих конструкцій, поява яких пов'язана з локальним або загальним пошкодженням будівлі, — їхня дія виходить за межі задачі захисту одним світлопрозорим елементом і потребує аналізу конструктивної системи в цілому. Третя група — фрагменти ґрунту та покриття; їх появу визначають положення джерела, матеріал поверхні й умови викиду, а характеристики встановлюють для конкретного сценарію.

Четверта група — уламки скління й деталей самої СОК. При оцінюванні враховують переміщення окремих частинок, фрагментів ламінованого скла та

цілого заповнення після втрати кріплення; зауважимо, що мала маса частинки ще не є критерієм безпеки. Нарешті, п'ята група — незакріплені предмети, переміщення яких залежить від потоку, опорних умов і можливого контакту з іншими елементами. Їх виявляють під час обстеження прилеглого простору та приміщення [35, 37].

3.3.2 Механіка руйнування скла і утворення вторинних уламків

Звичайним будівельним стеклам за розглянутих умов притаманне крихке руйнування, однак обробка скла, будова ламінованого пакета й умови утримання істотно змінюють характер фрагментації та післяруйнівний відгук.

Відпалене скло руйнується з утворенням фрагментів найрізноманітніших розмірів, зокрема з гострими крайками. Його міцність визначається поверхневими дефектами, обробкою крайок, масштабом зразка та режимом навантаження. Доречно нагадати, що термін «флоат» позначає лише спосіб виробництва листового скла: флоат-скло може бути надалі термічно оброблене або увійти до складу ламінованого пакета.

За хвильової дії руйнування може розвиватися через згин, мембранні зусилля, контакт із деталями рами або дефекти крайок. Швидкість уламків при цьому залежить від руху скла до моменту розділення та подальшої взаємодії з газовим потоком, тому визначати її слід вимірюванням або моделлю, валідованою для відповідної конфігурації [48].

Термозагартоване скло (ESG) завдяки залишковим напруженням має інший опір початку руйнування та інший характер фрагментації. Дрібніші уламки в певних умовах менш небезпечні, проте за вибухового навантаження ризику не знімають. Слід також пам'ятати, що монолітний загартований лист після руйнування не утримує заповнення, тож його застосування як шару ламінованого скла оцінюють у складі всієї конструкції [35, 37].

Ламіноване скло складається з двох або більше листів, з'єднаних полімерними прошарками. Його будову визначають кількість, товщина, обробка та послідовність листів, а також тип і товщина прошарків. Саме адгезія та власна робота прошарку здатні утримувати уламки після руйнування скляних шарів,

причому здатність зберігати цілісність залежить від властивостей полімеру, температури, швидкості деформування, розриву, деламінації та крайового закріплення. Для багатошарового безпечного скла вживають також позначення VSG (нім. Verbundsicherheitsglas) — саме по собі воно, втім, жодного класу вибухо- чи кулетривкості не засвідчує [31, 37, 47].

В ізоляційному склопакеті (DGU/TGU) навантаження розподіляється між листами скла або панелями з ламінованого скла через газ у камерах та крайові з'єднання, тож руйнування одного елемента змінює подальший відгук інших. Склопакет, ламіноване скло та повний віконний блок — це різні об'єкти, які слід описувати окремими термінами й оцінювати кожен на своєму рівні системи [47].

3.3.3 Кількісні характеристики скляних уламків і критерії небезпечності

Кількісний аналіз небезпечності вторинних скляних уламків спирається на характеристики, що дозволяють оцінити ризик поранення. У стандартах і науковій літературі використовуються такі показники.

а) Маса, розміри і форма уламків.

ISO 16933:2007 обліковує фрагменти за критерієм суми трьох габаритних розмірів не менш ніж 25 мм [28]. Наголосимо: це правило обліку результатів випробування, а не медичний поріг серйозного поранення — небезпечними можуть бути й менші частинки. Таблиця 3.3 містить власні геометричні приклади, які ілюструють цей критерій.

Таблиця 3.3 — Розрахункові приклади розмірів і маси скляних частинок

Розміри, мм	Сума, мм	Об'єм, мм ³	Маса, г	Критерій ≥ 25 мм
10 × 12 × 3	25	360	0,90	Виконано
10 × 11 × 4	25	440	1,10	Виконано
10 × 9 × 6	25	540	1,35	Виконано
8 × 8 × 8	24	512	1,28	Не виконано
8 × 8 × 9	25	576	1,44	Виконано

Примітка. Власний розрахунок для умовних прямокутних частинок за густини скла 2500 кг/м³. Приклади не відтворюють таблицю додатка D стандарту та не задають травматологічних порогів.

б) Швидкість і кінетична енергія скляних уламків.

Швидкість скляної частинки не визначається самим лише класом вибухового навантаження — на неї впливають геометрія, закріплення, момент руйнування, стан прошарку та рух газу. Для кількісної оцінки потрібне безпосереднє вимірювання або перевірена модель, а результат має супроводжуватися похибкою та вказівкою, яку саме групу частинок відстежували [48].

Кінетична енергія визначається як $W = mv^2/2$: частинка масою 2 г за швидкості 40 м/с має енергію 1,6 Дж, а за 100 м/с — уже 10 Дж. Це, зрозуміло, розрахункові приклади — без урахування геометрії, орієнтації та умов контакту енергія універсального порога травмування не встановлює. Для відчуття масштабів: номінальні параметри ударника класу BR1 за EN 1063 — 2,6 г і 360 м/с — відповідають приблизно 168 Дж, або 0,168 кДж [31]. Таке зіставлення, втім, не робить кулю та скляний уламок еквівалентними: механізми контакту, форма й критерії оцінювання в них різні.

в) Статистика поранень від скляних уламків.

Бюлетень UNDSS підкреслює значну частку скляних уламків серед причин поранень при великих вибухових атаках [37]. Статистику такого роду потрібно наводити з визначенням вибірки й знаменника: вона добре обґрунтовує увагу до утримання скла, але оцінювання конкретного об'єкта не замінює. Порівнюючи наслідки різних інцидентів, необхідно розділяти постраждалих усередині та поза будівлею, види травм і внесок обвалення — без узгодженої методики обліку відсотки з різних джерел просто не можна об'єднувати.

3.3.4 Система оцінювання небезпечності — hazard rating

Категорія небезпеки (hazard rating) характеризує наслідки випробування за визначеною процедурою: враховуються стан скління, утримання уламків, їхнє розташування та пошкодження контрольних поверхонь. В ISO 16933 для цього застосовується, зокрема, контрольна панель на відстані 3 м за зразком [28]; геометрію обладнання і критерії слід брати з конкретної редакції стандарту.

Таблиця 3.4 — Зміст категорій небезпеки ISO 16933 [28]

Категорія	Загальна характеристика	Зміст оцінювання
A	Руйнування відсутнє	Стан скла відповідає критерію відсутності руйнування.
B	Небезпека відсутня	Пошкоджене скління утримується; вихід частинок обмежений критеріями стандарту.
C	Мінімальна небезпека	Перевіряють залишкове утримання, фрагменти та допустимі пошкодження контрольної панелі.
D	Дуже низька небезпека	Перевіряють розташування фрагментів і обмеження щодо контрольної панелі.
E	Низька небезпека	Результат оцінюють за кількістю, висотою та глибиною пошкоджень контрольної панелі.
F	Висока небезпека	Перевищено встановлені межі кількості або глибини пошкоджень для нижчої категорії.

Примітка. Узагальнення за ISO 16933:2007 [28]. Таблиця пояснює відмінності категорій і не замінює повного набору критеріїв стандарту. Автоматичну відповідність категоріям ASTM, GSA або EN не встановлено.

Коректна інтерпретація результату вимагає зазначення стандарту, редакції, заданого навантаження та категорії небезпеки: однакова літера чи словесна назва в різних документах ще не свідчить про однаковість вимог. У системі ASTM, скажімо, метод випробування F1642 застосовується разом зі специфікацією F2912, яка й визначає категорію небезпеки [29, 30].

Слід розуміти й межі самого показника: категорія небезпеки не є повним описом кінематики уламків, тож дослідження швидкостей, траєкторій і джерел окремих частинок потребують додаткових вимірювань. Так само висновок про стійкість до зовнішнього ударника з категорії, отриманої за хвильового випробування, не впливає [28–30, 46].

3.3.5 Роль прошарку і плівки в утриманні вторинних уламків

Ключовим засобом зниження небезпечності вторинних скляних уламків залишаються конструктивні рішення, які утримують фрагменти після руйнування скла.

PVB-прошарок у ламінованому склі утримує фрагменти завдяки адгезії та власній роботі при деформуванні. Значущими тут є товщина, температура, тривалість і швидкість навантаження, стан з'єднання зі склом та утримання країв, тому вибір прошарку завжди пов'язують із результатом для всієї системи [37, 47]. Іонопластовий прошарок, зокрема SentryGlas, має інші механічні та температурно-часові характеристики, і його застосування може змінити жорсткість та залишковий відгук ламінованого скла; проте виводити із самої назви полімеру загальну перевагу за всіх ударних сценаріїв чи тим більше клас захисту не можна [50].

Плівки утримання уламків придатні для модернізації наявного скління. Результат визначається поєднанням скла, плівки, адгезії, способу крайового закріплення та рами; оскільки після руйнування можливе переміщення всього з'єданого плівкою заповнення, випробувана система кріплення є невіддільною частиною рішення [35, 37].

Насамкінець розмежуємо дві функції: утримання власних уламків і зупинення зовнішнього ударника. Позитивний результат щодо першої не підтверджує другої, хоча ламіноване скло цілком може забезпечувати обидві — якщо це встановлено відповідними випробуваннями.

Підсумовуючи: щоб зменшити небезпеку вторинних уламків, потрібно оцінювати характер руйнування, утримання заповнення та стан усієї СОК. Ламінування і захисні плівки справді знижують ризик — але лише за належного системного виконання. Категорію небезпеки при цьому необхідно чітко відокремлювати від класу навантаження, кулетривкості та опору зовнішньому уламку.

3.4 Уламкостійкість матеріалів та елементів СОК

У попередніх підрозділах ішлося про зовнішні ударники та власні уламки СОК; тепер розглянемо локальну взаємодію ударника зі склінням та її зв'язок із загальним відгуком конструкції. Принципова відмінність тут така: ударна хвиля навантажує значну площу конструкції, тоді як контакт уламка локалізований. Проте локальне пошкодження здатне змінити загальну роботу панелі, а

попередній згин — умови контакту, тож для комбінованого сценарію взаємний вплив цих процесів набуває першорядного значення.

3.4.1 Фізичні механізми взаємодії уламка зі склінням

Результат удару визначається масою, швидкістю, формою, орієнтацією та матеріалом ударника, товщиною й обробкою скла, геометрією панелі та умовами її закріплення. Розглянемо можливі механізми, пам'ятаючи, що їх послідовність і переважання від конфігурації до конфігурації різняться.

Контакт і тріщиноутворення. Для гладкого округлого ударника на початковій пружній стадії контакт задовільно описується герцівською моделлю: поблизу зони контакту виникають кільцеві та конусні тріщини, а загальний згин породжує інші системи тріщин. Для гострого нерегулярного тіла, подрібнення чи великих деформацій таке контактне наближення, звісно, працює гірше.

Тильний відкол і наскрізне пробиття. Відокремлення частинок із захищеного боку створює небезпеку навіть тоді, коли сам ударник крізь скління не проходить. Тому пробиття, відкол і перенесення фрагментів у захищений простір слід фіксувати окремо; у EN 1063 це розмежування відображене додатковими позначеннями S і NS, які застосовують за відсутності пробиття кулею або її частинами [31].

Загальний згин. За певних співвідношень тривалості контакту, маси ударника та розмірів панелі суттєвим стає згин усього елемента, і руйнування може починатися на розтягнутій поверхні або біля крайових дефектів. Якоїсь універсальної швидкості переходу між локальним і загальним механізмами, поза прив'язкою до конкретної конструкції, назвати неможливо.

Удар по ламінованому склу. Після тріщиноутворення подальший опір визначають взаємодія фрагментів, робота полімерного прошарку, адгезія, деламінація та крайове утримання. Якщо в аналіз вводиться балістична межа, необхідно вказати конкретний ударник, умови випробування та спосіб її визначення: показник V_{50} у відповідній методиці має статистичний зміст і швидкістю гарантованого захисту не є [39].

Додамо, що форма й матеріал ударника змінюють площу контакту, характер деформації та розподіл напружень, тому однакова кінетична енергія різних ударників зовсім не гарантує однакового пошкодження. Перевагу одного ударника за здатністю пробивати конкретне ламіноване скло встановлюють експериментально або валідованою моделлю.

3.4.2 Механічні характеристики матеріалів СОК при ударному навантаженні

Динамічні характеристики матеріалів слід задавати з урахуванням температури, швидкості й тривалості навантаження — довідкові статичні величини універсальними параметрами ударного руйнування не є [47].

Монолітне відпалене скло. Ініціювання тріщин залежить від дефектів і напруженого стану, а руйнування може давати великі гострі фрагменти. Без окремого утримувального елемента пошкоджене заповнення бар'єра не зберігає. Водночас відпалене скло цілком може бути компонентом захисного ламінованого пакета — оцінювати слід конкретну багатошарову конструкцію.

Термозагартоване скло. Залишкові напруження змінюють початок і характер руйнування, однак утримання заповнення після фрагментації не забезпечують. Загартовані листи можуть входити до складу ламінованого скла та інших захисних конструкцій, і доцільність такого застосування визначається випробуванням усієї конфігурації, а не загальною заборонаю матеріалу [35, 37].

Ламіноване скло з PVB. Прошарок підтримує післяруйнівну роботу панелі та обмежує розліт скла. Для локального удару визначальними стають розрив полімеру, відшарування, стан скляних фрагментів і повторні влучення. Універсальної швидкості уламка, який зупиняє «будь-яке» ламіноване скло з PVB-прошарком, установити неможливо [38, 47].

Ламіноване скло з іонопластом. Жорсткість, міцність і деформативність прошарку залежать від умов випробування. Технічні дані виробника корисні для вибору початкових параметрів, але автоматичної переваги над PVB у кожному ударному сценарії не доводять: коректне порівняння вимагає зіставної будови пакета, однакових розмірів, температури, закріплення й критеріїв відмови [50].

Склополімерні конструкції. Полікарбонат і спеціалізовані полімерні з'єднувальні шари застосовуються в багатошарових захисних виробках, причому функцію кожного шару, орієнтацію виробу й допустимі умови експлуатації визначає документація конкретної системи. Клас за EN 1063 установлюється випробуванням — єдиного складу чи товщини для кожного класу стандарт не задає [31].

3.4.3 Балістичні стандарти для скління: EN 1063 і EN 1522/1523

Аналізуючи відповідність, необхідно відокремлювати випробування самого захисного скління від випробування вікна чи іншого виробу: клас скляного заповнення автоматично не поширюється на раму, фурнітуру та монтажний вузол.

EN 1063:1999 установлює класи BR1–BR7 для визначених куль і SG1/SG2 для випробувань зі встановленим гладкоствольним боєприпасом [31]. Основні номінальні параметри BR зведено в таблиці 3.5; таблиця має оглядовий характер — тип осердя, оболонки, допуски та повна процедура визначаються стандартом.

Таблиця 3.5 — Номінальні параметри випробування BR за EN 1063 [31]

Клас	Калібр і визначальна ознака	Маса кулі, г	Швидкість удару, м/с
BR1	.22 LR	2,6	360 ± 10
BR2	9 mm Luger	8,0	400 ± 10
BR3	.357 Magnum	10,2	430 ± 10
BR4	.44 Remington Magnum	15,6	440 ± 10
BR5	5,56 × 45	4,0	950 ± 10
BR6	7,62 × 51, м'яке осердя	9,5	830 ± 10
BR7	7,62 × 51, тверде осердя	9,8	820 ± 10

Для BR1 відстань випробування становить 10 м, для BR2–BR4 — 5 м, для BR5–BR7 — 10 м. Швидкість у таблиці характеризує удар за процедурою стандарту, а не довільно обрану початкову швидкість біля зброї. Позначення NS означає відсутність пробиття контрольної фольги тильними скляними уламками, S — його наявність; в обох випадках проходження кулі або її частин крізь скління не допускається [31].

EN 1522:1998 установлює вимоги та класи FB1–FB7 і FSG для відповідних вікон, дверей, віконниць та жалюзі, а EN 1523 задає метод випробування [32, 33]. Оцінюються складові й уразливі ділянки випробуваного виробу; перенесення результату на інші розміри, кріплення або будівельну основу потребує обґрунтування в межах застосованої процедури.

Чи можна поширити кульове випробування на інший ударник? Відповідь визначається сукупністю відмінностей, які варто розглянути по черзі.

Перша з них — форма та будова ударника. Стандартна куля має визначені геометрію й матеріали, тоді як природний уламок або готовий елемент можуть контактувати зі склом і деформуватися зовсім інакше, тож подібність за одним параметром еквівалентності загроз не встановлює. Друга — маса і швидкість: класи BR не є шкалою самої лише швидкості, і зіставляти треба повний опис ударника та умови контакту. Твердження, що певний уламок «відповідає BR5» через саму швидкість, методично некоректне.

Третя відмінність — напрям удару. Реальне поле характеризується розподілом кутів та орієнтацій, а вплив косого удару залежить від геометрії ударника і будови заповнення. Нормативні кути та схему влучень розглядають у межах конкретної процедури, додаткові кути — як окремі дослідні умови. Четверта — множинність влучень: відстань між ударами й часовий інтервал змінюють стан матеріалу в наступній точці контакту, причому параметри багатократного впливу визначаються не загальною кількістю уламків біля джерела, а оцінкою влучень саме в площу СОК.

Нарешті, п'ята відмінність — попереднє навантаження. Клас кулетривкості інтактного виробу не гарантує того самого результату після пошкодження хвилею, і навпаки — результат вибухового випробування нічого не каже про залишкову стійкість після локального удару. Для поєднаного сценарію необхідно задавати порядок і часовий інтервал впливів [38].

Балістичні стандарти, безперечно, цінні як джерело принципів відтворюваного випробування та критеріїв пробиття. Але для оцінювання іншого ударника потрібна окрема методика або додаткова програма дослідів, а суміжні

методи MIL-STD-662 та STANAG 2920 / AEP-2920 слід аналізувати з урахуванням їхніх об'єктів випробування й меж застосування [39–42].

3.4.4 FEBR та підтвердження кількох захисних властивостей

Позначення FEBR у сфері захисних виробів означає Forced Entry and Ballistic Resistance — стійкість до силового проникнення та обстрілу; розшифровувати його як Fragment/Explosion/Ballistic Resistance помилково. У документації виробників трапляється й близька назва Forced Entry Bullet Resistant [51].

Один виріб може мати окремі результати щодо кулетривкості, опору силовому проникненню та вибухостійкості, і для кожного показника потрібні посилання на метод, випробувану конфігурацію та критерії. «Хвилинні» показники опору проникненню, зокрема, не означають здатності витримувати поєднане вибухово-уламкове навантаження впродовж такого самого часу.

Енергопоглинальні або деформівні вузли справді можуть змінювати передавання зусиль на опори, однак величину поглиненої енергії та допустиму будівельну основу слід підтверджувати для конкретної системи: загальний «відсоток ефективності» без протоколу й визначеного енергетичного балансу розрахунковою характеристикою не є.

Документоване підтвердження кількох властивостей має охоплювати однакову або належно зіставлену комплектацію — скління, раму, фурнітуру, кріплення й опору, адже заміна навіть окремого шару чи вузла здатна змінити результат. Відомості про один варіант виробу не варто поширювати на всю комерційну серію без зазначених меж застосування.

Отже, FEBR стосується задач захисту від проникнення та обстрілу. Оцінювання уламкової або комбінованої вибухової дії потребує окремого підтвердження, і наявність кількох незалежних протоколів не доводить проходження одного поєднаного випробування.

3.4.5 Вимоги до репрезентативного ударника

Випробувальний ударник має репрезентувати визначену групу загроз за всіма суттєвими для конструкції характеристиками — не лише масою й

швидкістю, а й матеріалом, твердістю, геометрією, орієнтацією та повторюваністю контакту. Поділ ударників на категорії за самою швидкістю явно недостатній.

Для первинних уламків може знадобитися кілька сімейств ударників, і вибір кожного має спиратися на вихідні дані та мету випробування; аналогія зі стандартною кулею — це початкове порівняння, а не автоматичне перенесення класу EN 1063. Для зовнішніх вторинних уламків окремо враховують фрагменти будівельних матеріалів і великі предмети, руйнування та деформація яких при контакті суттєво впливають на відгук СОК. Власні ж уламки скління оцінюються як наслідок випробування, якщо дослідною програмою прямо не передбачено інше.

Як відтворюваний ударник доцільно розглянути імітатори уламків, описані в АЕР-2920: FSP (fragment-simulating projectile) та прямі кругові циліндри RCC, категорії яких пов'язують геометрію з визначеною масою та вимогами до виготовлення [41, 42]. Такий підхід створює основу для порівняльних випробувань різних варіантів будови скління. У додатку С АЕР-2920, Edition A, Version 2, позначення F і G розрізняють FSP зі скошеною головною частиною, які випробовують відповідно з відокремлюваним піддоном (sabot) та без нього, а R позначає прямі кругові циліндри RCC; числовий індекс визначає масову категорію в межах сімейства. Тому опис «FSP заданої маси» без геометрії та повного позначення для ідентифікації випробувальної загрози недостатній [41, п. 3.5.3, додаток С]. Підкреслимо: ці категорії характеризують імітатори, а не походження реальних уламків, тож поділ на первинні та вторинні уламки зберігає окремий зміст.

Вибір стандартного імітатора має спиратися на параметри загрози в місці розташування СОК — вважати його універсальним заміном усіх первинних уламків чи фрагментів будівельних матеріалів не слід. Недостатнім є й порівняння за однаковою кінетичною енергією: узгодженими мають бути форма, матеріал, орієнтація ударника й умови контакту.

Для кількісного порівняння можна використовувати оцінку балістичної межі V50. У ймовірнісній моделі це швидкість, якій відповідає 50 % імовірності події, визначеної прийнятим критерієм повного пробиття. Операційне визначення оцінки V50 залежить від методики: в АЕР-2920 це середнє арифметичне швидкостей спеціально відібраних залікових влучень із результатами СР і РР, що не тотожне ані довільному усередненню всіх пострілів, ані автоматично оцінці параметра регресійної моделі [41, пп. 3.5.2, 5.4.1, додаток Н; 52]. Порівняння вимагає однакового критерію результату та зіставних розмірів, закріплення, температури й стану пошкодження зразків.

І ще раз наголосимо: V_{50} не є гарантовано безпечною швидкістю чи самостійним критерієм прийнятності вікна для захисту людей. Поряд із пробиттям окремо оцінюють тильні уламки, утримання заповнення, раму й монтажні вузли. Перенесення результатів зі зразка матеріалу на повну СОК потребує перевірки, а пряме переведення V_{50} у клас BR або FB без відповідного випробування не обґрунтоване.

3.4.6 Чисельне моделювання уламкостійкості СОК

Для дослідження механіки взаємодії уламків зі скляними конструкціями останніми роками активно застосовується метод скінченних елементів (MCE), реалізований у кодах LS-DYNA, ABAQUS та AUTODYN.

Моделі руйнування скла використовують розділення елементів, когезійні зони, розширений метод скінченних елементів або частинкові підходи. Слід усвідомлювати, що видалення елементів після досягнення критерію — чисельний прийом, а не самостійна фізична модель, тому необхідно контролювати залежність від сітки, втрату маси й енергії та відтворення контактів між фрагментами [47, 48]. Для скла важливо враховувати крихке руйнування, дефекти та відмінність між ініціюванням тріщин і подальшою фрагментацією; для PVB та іонопласту потрібні моделі, придатні для відповідних температур, швидкостей і великих деформацій. Лінійна пружність із довільно прийнятою малою граничною деформацією загальною моделлю SGP не є, а розрив прошарку й деламінацію описують і калібрують окремо [47, 50].

Розрізнятимемо також верифікацію та валідацію: перша перевіряє коректність чисельного розв’язання прийнятої моделі, друга — її відповідність експериментальному відгуку. Для оцінювання уламкостійкості доцільно зіставляти пробиття, залишкову швидкість, прогин, характер руйнування та стан кріплень, причому дані для калібрування й перевірки бажано розділяти — інакше прогноз оцінюється лише за дослідями, на яких його й налаштовано.

Підсумовуючи: локальний удар може спричиняти тріщини, тильний відкол, наскрізне пробиття або втрату загальної цілісності, і результат щоразу визначається поєднанням ударника та конструкції. Класи BR/FB, позначення S/NS, категорії небезпеки й FEBR описують різні властивості, тож для уламкового та комбінованого впливу потрібні явно визначені умови випробування й перевірена модель усієї СОК.

3.5 Сумісна дія ударної хвилі та уламків на СОК

У реальному сценарії хвиля й уламки діють послідовно або з перекриттям у часі, і пошкодження від першого впливу змінює умови другого. Результати окремих випробувань, безумовно, важливі для характеристики виробу — але поведінки конструкції за довільного поєднання навантажень вони не описують.

Методи випробування й моделювання вибухостійкого скління систематизовано у звітах JRC [34, 46, 47, 53]; подальші дослідження, насамперед робота Osnes та співавторів [38], додали експериментальні дані щодо послідовності «удар — хвиля». Відтак сучасну постановку задачі слід прив’язувати до конкретних недостатньо вивчених конфігурацій і сценаріїв. Нижче систематизовано фізичні механізми комбінованого навантаження, проаналізовано відомі сценарії взаємодії, окреслено підходи до їх оцінювання та нинішній стан досліджень.

3.5.1 Хронологія і просторова структура комбінованого навантаження

Кожен сценарій вимагає задання часової залежності тиску, моменту удару та стану конструкції. У підрозділі 3.1.2 вже введено сценарії C1–C3; нагадаємо, що універсальних меж у метрах вони не мають.

C1 — удар до хвильового навантаження. Початковими умовами для наступного етапу тут можуть бути отвір, система тріщин, пошкодження прошарку або рами. Дослід із попереднім кульовим пошкодженням підтвердив можливість зниження вибухостійкості ламінованого скла, хоча результат, звісно, залежить від конфігурації та характеру пошкодження [38].

C2 — удар після завершення прийнятого інтервалу суттєвої хвильової дії. У момент контакту конструкція може бути інтактною, деформованою, потрісканою або такою, що частково втратила кріплення, — і саме цей стан, включно з можливим продовженням руху панелі, визначає залишковий опір. Якщо заповнення вже вийшло з рами, бар'єр порушено на рівні системи, хоч би яким був локальний опір скла.

C3 — перекриття локального удару та суттєвого хвильового навантаження. Для опису цього сценарію модель має зберігати поточні переміщення, швидкості, напруження й пошкодження конструкції; визначити його самими лише словами «одночасний вибух», без часових параметрів, неможливо.

Окремо, якщо це обґрунтовано оцінкою загрози, може розглядатися хвильове навантаження без значущого зовнішнього удару. Проте навіть тоді залишається небезпека власних уламків СОК — віддаленість від джерела сама по собі їх не виключає.

3.5.2 Механізми погіршення властивостей конструкції при комбінованому навантаженні

Попереднє локальне пошкодження змінює жорсткість і шляхи передавання зусиль, створює концентратори напружень і може порушувати неперервність прошарку; у склопакеті додатково змінюється взаємодія між панелями через газову камеру. Величину залишкової вибухостійкості слід визначати для конкретного типу пошкодження — отвір, тріщини та ударний дефект аж ніяк не еквівалентні [38].

Попередня хвильова дія, своєю чергою, може ослабити здатність зупиняти ударник — через руйнування скляних шарів, розтягування або розрив полімеру, втрату адгезії та крайового утримання. Універсального числового коефіцієнта

така зміна опору не має. Не забуваймо й про те, що відмова рами, штапика або анкера здатна визначити результат незалежно від локальної міцності ламінованого скла.

Загалом комбінований відгук нелінійний: після тріщиноутворення чи втрати контакту змінюються жорсткість, граничні умови та передавання навантаження. Просте додавання результатів двох незалежних лінійних розрахунків тому не є достатнім описом, а ступінь відмінності перевіряють для обраної моделі та сценарію.

3.5.3 Типові сценарії руйнування СОК при комбінованому навантаженні

Наведені нижче механізми — це сценарії для перевірки; їх перелік не означає, що кожен реалізується в усіх типах СОК або завжди однаковою мірою посилює пошкодження.

А — попереднє локальне пошкодження скління. Удар створює дефект перед хвилею; далі оцінюють розвиток тріщин, роботу прошарку та утримання заповнення, а для приміщення — ще й зміну відкритої площі та проходження хвилі.

Б — удар по пошкодженому заповненню. Після хвильового впливу зовнішній ударник взаємодіє із залишками ламінованого скла або з іншим шаром склопакета; ключовими параметрами тут є ступінь пошкодження та часовий інтервал між впливами.

В — вторинна взаємодія між елементами будівлі. Фрагменти сусідніх конструкцій можуть завдавати додаткових ударів по склінню. Імовірність такого сценарію визначають геометрія забудови, траєкторії та наявність перешкод, тож автоматично поширювати його на весь фасад не варто.

Г — відмова опорного контуру. Пошкодження профілю, штапика, з'єднання або будівельної основи призводить до переміщення заповнення чи його частини — і тоді поліпшення самої лише локальної стійкості скла причини відмови не усуває.

3.5.4 Підходи до аналітичного і чисельного опису комбінованого навантаження

Комбіноване навантаження описують послідовним або пов'язаним розрахунком; вибір диктується часовою взаємодією, рівнем пошкодження та потрібною точністю, і кожен підхід має бути перевірений на релевантних дослідах.

Послідовний аналіз передає стан конструкції після одного впливу як початковий стан другого. Важливо зберігати пошкодження, деформації, швидкості, контакти та стан кріплень, якщо вони значущі для наступного етапу. Застережемо: такий розрахунок не є автоматично консервативним і нижньої межі стійкості не гарантує.

Пов'язаний аналіз описує хвильове навантаження, рух конструкції та контакт ударника у спільній часовій постановці — із заданою історією тиску або з моделюванням середовища та його взаємодії з конструкцією. Точність тут визначається не назвою методу, а обґрунтуванням дискретизації, матеріальних моделей і контактних алгоритмів [47]. Для ламінованого скла чисельні моделі мають відтворювати як початок руйнування, так і поведінку після утворення тріщин, причому перехід від хвильового випробування до локального удару може вимагати іншої просторової роздільності й окремої валідації [48].

Основні труднощі пов'язані з різними масштабами контактної та загальної задач, статистичним характером дефектів, великими деформаціями прошарку, деламінацією та невизначеністю зовнішнього поля. Для кожної моделі доводиться визначати область застосовності та параметри, до яких результат найчутливіший. Спрощені залежності й метамоделі можуть слугувати для серійного аналізу — але тільки після побудови перевіреної бази розрахунків і дослідів, з явними межами інтерполяції; екстраполяція на іншу будову ламінованого скла, інший ударник або спосіб кріплення потребує додаткової перевірки.

3.5.5 Взаємодія ударної хвилі і вторинних уламків (уламки скла + хвиля)

Власні уламки скління продовжують взаємодіяти з газовим потоком і після руйнування, що позначається на траєкторіях, розкиді швидкостей та просторовому розподілі небезпеки. Оцінювання за контрольними поверхнями фіксує наслідки; щоб відновити сам рух, потрібні додаткові вимірювання [28–30, 48].

Напрямок аеродинамічного впливу визначається відносною швидкістю уламка й газу: частинка може як прискорюватися, так і гальмуватися. Тому модель польоту в нерухомому повітрі не можна без перевірки застосовувати всередині інтенсивного нестационарного потоку; особливо важливі момент відокремлення фрагмента та початкова швидкість, набута від руху панелі.

Тиск у приміщенні залежить від проходження хвилі крізь отвори, відбиття, вентиляції та зміни геометрії прорізів у часі. Самого лише відношення площі отвору до об'єму для висновку про підсилення чи послаблення замало — задача потребує окремої моделі з визначеними граничними умовами.

Утримання ламінованого скла після руйнування забезпечується сукупністю властивостей прошарку, крайового з'єднання, деталей рами та опор; сухий чи клейовий спосіб установлення сам по собі результату не визначає. Оцінювати слід випробувану конфігурацію, а для плівок — ще й передавання зусиль від їхнього краю до рами [35, 37].

3.5.6 Стан досліджень: що відомо і що залишається відкритим

Проведений огляд дозволяє відокремити наявні результати від задач, які потребують розширення експериментальної бази. Ідеться про аналітичне зіставлення, а не про твердження щодо вичерпності всіх публікацій у галузі.

На сьогодні підтверджено можливість дослідження залишкової вибухостійкості ламінованого скла після попереднього удару [38], а також експериментального й чисельного опису руйнування ламінованого скла при хвильовій дії [48]; стандартизовані процедури встановлюють результати за окремих вибухових або кульових навантажень [26–33]. Це і є основою для подальшого дослідження повної СОК.

Подальшого обґрунтування натомість потребують: залишкова уламкостійкість після хвильового навантаження; множинні удари по пошкодженому ламінованому склу; вплив часової затримки та фази руху панелі; відмова профілів, фурнітури й монтажу; перенесення результатів на скління інших розмірів і будови. Для кожної з цих задач наявні публікації слід зіставити з конкретними новими умовами досліду. Перехід до нормативного методу, крім того, вимагатиме відтворюваної процедури, оцінки розкиду та міжлабораторного зіставлення, а висновок про новизну має спиратися на визначений набір параметрів і результатів, не охоплених попередніми роботами.

3.5.7 Практичне значення: уроки для проєктування СОК в умовах збройного конфлікту

Розглянуті механізми дають підстави сформулювати вимоги до процесу проєктування й підтвердження характеристик — не претендуючи, ясна річ, на універсальну будову захисного скління.

Відповідність сценарію. Вимоги слід задавати через конкретний ударник, хвильове навантаження та критерії результату. Підвищення класу BR на одну-дві позиції доведеним способом компенсації попереднього вибухового пошкодження не є.

Оцінювання всієї системи. Скло, прошарок, рама, фурнітура, кріплення й опорна конструкція мають передавати навантаження узгоджено — один вузол із недостатньою здатністю може визначити відмову всієї системи. Обсяг необхідного підсилення встановлюють аналізом, а не припускають за матеріалом рами.

Крайове утримання. Глибина заходження скла в опорний контур, геометрія штапика, властивості клею й механічні обмежувачі повинні відповідати випробуваному або обґрунтованому рішенню; єдиного мінімального значення для всіх комбінованих сценаріїв цей розділ не встановлює.

Пошкоджений стан. Перевірка залишкової стійкості вимагає визначити, які саме пошкодження допускаються перед ударом, як їх вимірюють і як відтворюють. Формулювання «після вибуху» без цих даних недостатнє.

Захищений простір. Оцінювання СОК має враховувати можливе проникнення зовнішніх уламків, розліт скла та переміщення деталей усередину. Захисні властивості вікна не заміняють ані вимог до укриття, ані заходів цивільного захисту будівлі.

Підсумовуючи: комбінований відгук визначається послідовністю, часовими параметрами та станом усієї конструкції. Дослідження впливу удару перед хвилею вже існують — актуальним є їх розширення на визначені сценарії та повні СОК. Обґрунтовані рекомендації мають установлювати процедуру перевірки, а кількісні показники захисту — спиратися на відповідні результати.

3.6 Методи випробувань і нормативне оцінювання уламкостійкості СОК

Оцінюючи нормативну базу, слід чітко розділяти об'єкт випробування, вид навантаження та критерій результату. Наведений огляд охоплює вибухостійкість, кулетривкість, опір проникненню та суміжні методи випробування захисних матеріалів; редакції документів зазначено окремо, і висновки стосуються саме розглянутого набору стандартів.

3.6.1 Карта стандартів у сфері захисту СОК від вибухових і балістичних навантажень

Розглянуті документи зручно згрупувати за основною метою випробування, пам'ятаючи, що наявність нормативних вимог до одного впливу автоматичного охоплення інших загроз не означає.

Група 1: Стандарти на вибухостійкість СОК

Вибухові стандарти задають умови навантаження, організацію випробування та оцінювання відгуку. Клас навантаження при цьому слід відрізняти і від категорії небезпеки уламків, і від висновку про придатність конкретного об'єкта.

EN 13123-2:2025 установлює вимоги й класифікацію для полігонних випробувань з натурним вибухом (arena test), а EN 13124-2:2025 — відповідний метод. Звернімо увагу: редакція 2025 року використовує класи PXR/VXR, тоді як позначення EXR належить попередній редакції 2004 року, тому зіставляти редакції за однаковим номером класу, без перевірки навантаження та критеріїв,

не можна [26, 27]. EN 13123-1:2025 і EN 13124-1:2025 стосуються випробувань в ударній трубі [36]; вибір між ударною трубою та полігонними випробуваннями з натурним вибухом має враховувати умови навантаження й область застосування результатів, і жоден із цих методів сам по собі не підтверджує довільного поєднання хвилі із зовнішнім ударником.

ISO 16933:2007 описує полігонні випробування скління з навантаженням від повітряної ударної хвилі натурального вибуху та класифікацію результатів. Літери A–F характеризують небезпеку наслідків руйнування, і вказувати їх слід разом із параметрами навантаження, а не подавати як самодостатні рівні вибухостійкості [28]. ISO 16934 описує відповідний підхід до ударно-трубного навантаження; метод, задані параметри й оцінка результату мають бути ідентифіковані в протоколі, адже формальна подібність методів ще не гарантує взаємозамінності отриманих класів [54].

GSA-TS01:2003 використовує показники результату 1, 2, 3a, 3b, 4 і 5, де показник 1 відповідає відсутності руйнування, а 5 — високій небезпеці. Варто пам'ятати, що напрям цієї шкали — не зростання захисту від 1 до 5, і для зіставлення з іншими системами доводиться порівнювати повні критерії [37]. ASTM F1642/F1642M-25 визначає метод випробування скління та систем за повітряного вибухового навантаження, а ASTM F2912-25 — специфікацію й оцінювання категорії небезпеки, зокрема для систем модернізації; прийнятний для об'єкта результат визначається попередньою оцінкою загрози й ризику [29, 30].

Що ж до розрахункових методів підбору скління для хвильового навантаження, то вони мають власні припущення та межі: використовувати їх для присвоєння класу уламкостійкості чи заміни випробування з іншим ударником не можна, а допустимість розрахункового підтвердження визначається конкретним нормативним документом.

Група 2: Балістичні стандарти для скління і СОК

EN 1063:1999 задає кулетривкість скління (класи BR1–BR7 і SG1/SG2, позначення S/NS) — це конкретні умови удару, а не класифікація довільного

уламкового поля [31]. EN 1522:1998 та EN 1523:1998 визначають вимоги, класи FB1–FB7/FSG і метод випробування відповідних виробів [32, 33]; клас скла та клас віконного блока — різні результати оцінювання.

ASTM F1233-21 стосується захисного скління й систем та охоплює, поміж іншим, балістичні й інші види нападів у межах установлених процедур, тож характеризувати його як стандарт, що виключає балістичну дію, було б неправильно [55]. UL 752 установлює вимоги до кулетривкого обладнання, причому позначення залежать від редакції: UL описує перехід від рівнів 1–10 одинадцятої редакції до категорій HG, RF і SG дванадцятої, тому посилання лише на «Level 1–8 до .50» цієї системи не відтворює [56].

Група 3: Суміжні методи та підтвердження кількох властивостей

FEBR, нагадаємо, означає поєднання опору силовому проникненню та обстрілу. Вибухостійкість і стійкість до зовнішніх уламків, якщо вони заявляються, підтверджують окремо, і комерційне позначення не заміняє ідентифікації застосованого методу [51].

MIL-STD-662 установлює методи балістичного оцінювання захисних матеріалів; актуальна перевірена редакція — G від 2025 року [39]. Цей досвід вельми цінний для побудови відтворюваних ударних дослідів, хоча готовою процедурою класифікації цивільного вікна за комбінованим вибухово-уламковим навантаженням стандарт, звісно, не є.

У цьому розділі проаналізовано STANAG 2920, Edition 3 від 22.06.2015, «Classification of Personal Armour» та AEP-2920, Edition A, Version 2 від 16.09.2016, «Procedures for the Evaluation and Classification of Personal Armour — Bullet and Fragmentation Threats» [40, 41]. STANAG фіксує угоду щодо застосування AEP, а технічні процедури викладено саме в AEP. Третя редакція STANAG замінила другу, що мала назву «Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing»; AEP, Version 2, замінила Version 1 — тому назву й процедури попередніх редакцій не слід без уточнення приписувати аналізованим документам.

Сфера АЕР охоплює індивідуальний балістичний захист, його компоненти, репрезентативні зразки матеріалів і поєднання елементів, включно із захистом очей та обличчя [41, розділи 1–2]. Наявність прозорих елементів робить документ методично корисним для досліджень скління, хоча стандартом класифікації будівельних вікон він від цього не стає. Методика розрізняє оцінювання V50 і підтвердження заданої перевіркою швидкості V_{proof} ; обидва види оцінювання передбачені як для кульових, так і для уламкових загроз [41, п. 5.4].

Оцінювання V50. За п. 5.4.1 та додатком Н.1 АЕР розрахунок виконують за першою придатною вибіркою з однаковою кількістю СР і РР: початкова вибірка містить три найвищі швидкості РР та три найнижчі швидкості СР в загальному інтервалі 40 м/с. Якщо умову не виконано, процедура передбачає розширення вибірки до п'яти результатів кожного типу в інтервалі 50 м/с, а далі — до семи в інтервалі 60 м/с; коли не виконується й завершальна умова, випробування повторюють. Додаткові влучення після отримання першої придатної вибірки до цієї оцінки V50 не включають, хоча для додаткового статистичного аналізу вони придатні [41, пп. 3.5.2, 5.4.1]. Наведені правила характеризують аналізовану редакцію АЕР і автоматично встановленим планом випробування СОК не є.

Підтвердження V_{proof} — це перевірка за наперед заданою швидкістю з вимогою відсутності СР у встановленій серії та виконанням додаткових критеріїв, коли вони застосовні. АЕР задає мінімум 22 залікові влучення; для багатовлучного оцінювання твердого захисту діє окрема схема з кількістю влучень на виріб за таблицею 7.1. Задекларована статистична мета — імовірність результату РР понад 90 % із довірчим рівнем 90 % [41, розділ 1, п. 5.4.2, розділ 7]. Це, підкреслимо, не гарантія зупинення будь-якого уламка й не доказ захисту від інших дій; критерії прийнятності цивільної СОК потребують окремого обґрунтування.

Критерії СР і РР. У АЕР результат СР (complete penetration) визначається для конкретної категорії захисту та способу контролю, і спричинити його може не лише проходження цілого ударника, а й дія його частини або фрагмента самого захисного матеріалу; зокрема, для перевірки V_{proof} захисту очей та обличчя

застосовано критерій пробиття контрольного листа. PP (partial penetration) охоплює кожне залікове влучення, яке не відповідає критерію CP, — фактичного часткового входження ударника в матеріал ця назва не вимагає [41, п. 5.14]. Для СОК звідси впливає практичний висновок: проходження зовнішнього ударника, небезпечні власні уламки та утримання конструкції слід реєструвати окремо, не підміняючи мовчазно один результат іншим.

Відтворюваність і протокол. Для адаптованої програми СОК доцільно запозичити принципи АЕР щодо ідентифікації зразка й ударника, фіксації кондиціонування, способу закріплення, кута удару, відхилення осі ударника від прямого руху (yaw), координат і послідовності влучень. Швидкість має відповідати моменту удару, а вимірювання на віддалі — супроводжуватися обґрунтованим приведенням до поверхні зразка. У протоколі зберігають усі влучення, їхній статус і причини невключення до розрахунку [41, пп. 4.4, 5.11–5.16, розділ 6]. Для скла особливо важливо контролювати пошкодження від попередніх влучень: повторне навантаження вже потрісканого зразка — це, по суті, випробування іншого стану.

Межі інтерпретації. АЕР прямо застерігає, що зменшений зразок може дати інший результат, ніж більший виріб тієї самої будови; класифікація не враховує ризику рикошету, а довговічність не входить до її обов'язкових складових [41, п. 2.2]. Випробування після короткочасного температурного або вологісного впливу довготривалої експлуатаційної стійкості також не встановлює. Для СОК додатково потрібні репрезентативні опори, крайове утримання, рама, фурнітура й монтаж; критерії деформації підкладки для індивідуального захисту переносити як допустимий прогин вікна не можна.

Статистичне опрацювання. Додаток Н.3 АЕР передбачає PROBIT-підхід для оцінювання розкиду за прийнятої моделі ймовірності пробиття. Стандартне відхилення розподілу не слід ототожнювати з довірчим інтервалом оцінки V50. У дослідженні СОК зазначають використаний набір даних, спосіб оцінювання, модельні припущення та невизначеність; за недостатніх даних робити висновки

про дуже малу ймовірність відмови з самої лише величини V50 не варто [41, додаток Н.3; 52].

Для цивільних СОК ці положення можуть стати основою окремої дослідної методики — за умови обґрунтування масштабу й закріплення зразка, контролю тильних уламків та оцінювання рами й монтажу. Саме по собі застосування імітатора за АЕР-2920 не встановлює відповідності вікна всім вимогам цього документа й комбінованої вибухово-уламкової стійкості не підтверджує. Військові документи щодо захисних споруд та антитерористичні будівельні настанови, своєю чергою, мають власні цілі та сфери застосування: використовувати їх для СОК можна лише через конкретні положення, об'єкт захисту та критерії, і наявність таких документів не тотожна наявності єдиної класифікації цивільного скління.

Група 4: Стандарти на захист від силового зламу

EN 1627 установлює вимоги та класи опору силовому проникненню для відповідних будівельних виробів — це окрема характеристика, яку не можна замінити результатом вибухового чи кульового випробування [57]. EN 356 розрізняє класи P1A–P5A та P6B–P8B за методами випробування захисного скління від ручного нападу; випробувальні дії та критерії тут інші, ніж у EN 1063, і відповідність одному стандарту відповідності іншому не встановлює [58].

Коли заявляється кілька захисних властивостей, перевіряють комплектацію зразків і межі поширення кожного результату. Якщо ж ідеться саме про комбіновану стійкість, послідовне або одночасне поєднання впливів має бути прямо передбачене програмою випробувань.

3.6.2 Матриця покриття стандартів

Таблиця 3.6 зіставляє групи документів за об'єктом, основним результатом і межами застосування. Вона не встановлює взаємозамінності класів і не прирівнює кулю до довільного уламка.

Таблиця 3.6 — Сфера оцінювання та межі застосування методів

Документи	Основний об'єкт	Що визначають	Межа висновку
EN 13123/13124; ISO 16933/16934 [26–28, 36, 54]	Скління або виріб за процедурою	Реакція на хвильове навантаження й наслідки руйнування	Не підтверджують довільний зовнішній уламковий потік
ASTM F1642 та F2912 [29, 30]	Скління, системи й модернізація	Випробування хвилею та категорія небезпеки	Потрібне окреме обґрунтування локального удару
EN 1063 [31]	Захисне скління	Кулетривкість; позначення S/NS	Не встановлює клас усієї встановленої СОК
EN 1522/1523 [32, 33]	Вікна, двері та інші визначені вироби	Кулетривкість виробу за заданою процедурою	Не доводить залишкової стійкості після хвилі
ASTM F1233; EN 356; EN 1627 [55, 57, 58]	Скління або вироби відповідно до стандарту	Визначені види нападу; для F1233 також балістичні	Різні процедури та критерії не взаємозамінні
MIL-STD-662 [39]	Захисні матеріали й конструкції в межах методу	Балістичні характеристики за встановленою процедурою	Потрібна адаптація до повної цивільної СОК
STANAG 2920 / AEP-2920 [40, 41]	Індивідуальний захист, його матеріали й компоненти	Опір заданим балістичним загрозам; V_{50} або V_{proof} за процедурою	Для цивільної СОК та поєднання з хвилею потрібна окрема методика
FEBR у документації виробу [51]	Конкретна випробувана система	Опір проникненню та обстрілу за заявленими методами	Не означає автоматично вибухо- чи уламкостійкість

Примітка. Оцінювання власних уламків зразка потрібно відрізняти від стійкості до зовнішнього уламка. Відсутність окремого критерію в наведеній процедурі не означає відсутності таких методів у всіх суміжних галузях.

3.6.3 Методичні перешкоди для комбінованого оцінювання

Проведений огляд дозволяє назвати методичні перешкоди, які стоять на шляху відтворюваного оцінювання комбінованої стійкості. Наведені положення — аналітичне узагальнення, а не реконструкція історичних причин розроблення стандартів.

Перша перешкода — різні об'єкти й критерії: вибухове випробування, кулетривкість скла та опір проникненню описують різні властивості, тож для комбінованої задачі доводиться погоджувати оцінювання навантажень, пробиття, утримання системи та небезпеки в захищеному просторі. Друга — відтворюваність удару: реальний уламковий потік має розкид параметрів, і стандартизована процедура повинна поєднати керованість ударника з доведеною репрезентативністю для заданої групи загроз, що потребує експериментального зіставлення.

Третя перешкода — простежуваність даних. Частина відомостей про реальні загрози неповна, обмежено доступна або отримана без відомої похибки, тому публічну методику слід будувати на даних із визначеним походженням, допускаючи хіба що чітко описані консервативні припущення. Нарешті, четверта — перенесення результатів на будівельну систему: лабораторний зразок скла не відтворює автоматично роботи великого вікна, монтажу й будівельної основи, а отже, потрібні правила масштабування, оцінка невизначеності та міжлабораторне підтвердження.

3.6.4 Стан нормативної бази України

Українську базу доцільно розглядати на двох рівнях: вимоги до будівлі та захисних споруд — і методи підтвердження характеристик скління й виробів. Наявність спеціальної прогалини щодо комбінованого випробування не означає відсутності нормативних вимог до захисту загалом.

- ДСТУ EN 13123-2:2006 і ДСТУ EN 13124-2:2006 є національними прийняттями відповідних EN редакції 2004 року [59, 60]. Їх потрібно відрізнити від європейських редакцій 2025 року; для застосування у конкретному проєкті перевіряють чинність національної редакції та наявність її заміни за офіційним каталогом.
- ДСТУ EN 1063:2022 (EN 1063:1999, IDT) має назву «Скло в будівництві. Захисне скління. Випробування та класифікація за кулетривкістю» [61]. Цей документ стосується встановлених кульових загроз і автоматичної еквівалентності з довільним уламком не створює.

- У розглянутому наборі національних документів окремий узгоджений метод класифікації цивільної СОК за зовнішнім уламковим ударом у поєднанні з хвилею не визначений. Цей висновок стосується меж проведеного огляду й потребує актуалізації під час розроблення нормативної пропозиції.

ДБН В.1.2-4:2019 «Інженерно-технічні заходи цивільного захисту» і ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» формують нормативний контекст захисту будівель і споруд [62, 63]. Їхні вимоги застосовують відповідно до призначення об'єкта й чинних змін — класом захисного скла вони не підміняються.

Для української практики, отже, потрібне узгодження вимог до об'єкта, випробуваної СОК і монтажу. А от робити порівняльний висновок про нібито виняткову відсутність регулювання саме в Україні, без окремого дослідження інших країн, підстав немає.

3.6.5 Можливі підходи до розробки нормативного методу

Можливі напрями розроблення методу сформулюємо як дослідницькі пропозиції: їх нормативне запровадження вимагатиме експериментальної перевірки, оцінювання відтворюваності та встановленої процедури стандартизації.

Підхід А — контрольований удар репрезентативним елементом. Окремо визначаються сімейство ударників, стан зразка та критерії пробиття й тильної небезпеки. Методичними орієнтирами тут можуть слугувати EN 1063, MIL-STD-662 і STANAG 2920 / AEP-2920, однак схему, кількість влучень та умови закріплення переносити на СОК без обґрунтування не слід [31, 39–42].

Підхід Б — дослідження поєднаних впливів у спеціалізованій лабораторії. Програма має контролювати параметри хвильового навантаження, момент локального удару та стан зразка. Головна вимога — відокремити внесок факторів і забезпечити відтворюваність, а не просто отримати одноразове руйнування.

Підхід В — послідовні випробування з контрольованим пошкодженням: порівнюються інтактні зразки та зразки після визначеного попереднього впливу.

Такий шлях дозволяє досліджувати залишкову стійкість, хоча його відповідність одночасному сценарію потребує окремої перевірки [38].

Підхід Г — розрахункове супроводження. Валідовані моделі використовуються для планування дослідів, аналізу чутливості та обґрунтованої інтерполяції; самостійне ж присвоєння нормативного класу за розрахунком можливе лише тоді, коли це прямо допускає відповідна процедура.

Доцільною послідовністю вбачається окреме дослідження хвильового й локального впливів, далі — контрольоване поєднання та перевірка повної СОК. Обраний шлях має відповідати сформульованому проєктному сценарію й наявній експериментальній базі.

Підсумовуючи: розглянуті стандарти дають інструменти оцінювання хвильової дії, власних уламків і визначених кульових та уламкових загроз. Перенесення цих методів на комбіноване оцінювання цивільної СОК потребує узгоджених ударників, часових умов, критеріїв відмови та меж поширення результату, а національні пропозиції мають враховувати чинні будівельні норми й міжнародний досвід.

3.7 Напрями досліджень і рекомендації щодо підтвердження захисту

Дослідницька програма має пов'язати воедино опис загрози, відгук повної СОК та критерії захисту людей. Нижче сформульовано пропозиції щодо досліджень і вимоги до підтвердження проєктних рішень; числові класи й мінімальні конструктивні параметри зможуть з'явитися лише після відповідної перевірки.

3.7.1 Пріоритетні напрями фундаментальних і прикладних досліджень

Напрямок 1. Опис загроз і систематизація вихідних даних

Насамперед необхідно сформувати простежувану базу характеристик удару на поверхні конструкції та матеріалів обстеження пошкоджених будівель, яка розділяла б виміряні параметри, розрахункові оцінки й припущення. Під час обстежень фіксують склад СОК, стан кріплень, геометрію пошкоджень і контекст події — сам лише вигляд пробоїни однозначного відновлення всіх параметрів ударника не дає.

Опис загрози доцільно вести за ознаками п. 3.1.6: функціональна група, склад впливів, положення джерела та стан огороження. Для кожної групи визначають, які результати хвильових, уламкових і, за потреби, теплових досліджень потрібні. Порівнювати варіанти слід за узгоджених граничних умов, не переносячи характеристик одного зразка на всю платформу.

Напрямок 2. Вибір репрезентативних ударників і процедури оцінювання

Потрібно зіставити EN 1063, MIL-STD-662 та STANAG 2920 / AEP-2920 і визначити сімейства ударників, які відтворюють суттєві для СОК механізми [31, 39–42]. Масу, геометрію та матеріал узгоджують із заданою загрозою, а вибір стандартного FSP або RCC перевіряють експериментально для досліджуваного скління. Окремо задаються критерії наскрізного пробиття, тильної небезпеки та збереження заповнення; зауважимо, що відсутність тильних уламків за наскрізного проходження ударника ще не означає виконання вимоги його зупинення.

Напрямок 3. Експериментальне дослідження залишкової стійкості

Доцільно порівнювати інтактні зразки з відповідними пошкодженими за сценаріями С1–С3, контролюючи параметри першого впливу, стан перед другим і часовий інтервал. Відомі результати послідовності «удар — хвиля» правлять за основу зіставлення, а нові серії варто спрямовувати на конкретні відмінності — склад склопакета, раму, монтаж, множинність або іншу хронологію [38].

Для сценарію С2 пропонується порівнювати дві незалежні зіставні серії: початково неушкоджені зразки та зразки після заданого хвильового навантаження. В обох серіях зберігають склад і геометрію конструкції, монтаж, температуру та тип імітатора; для другої додатково фіксують навантаження, тріщини, розшарування, пошкодження утримання та часовий інтервал до удару. Наголосимо: результат руйнівного випробування одного зразка порівняння серій не замінює.

За достатньої кількості даних у кожній серії оцінюють V50 та невизначеність, а за сумісною статистичною моделлю — залежність імовірності пробиття від швидкості [41, додаток Н.3; 52]. У програмі заздалегідь

розмежують нормативний алгоритм АЕР та авторську адаптацію для СОК, задають подію СР, правила відбору залікових влучень і спосіб урахування попередніх пошкоджень. Висновок про зміну опору має враховувати розкид результатів і відмінності стану зразків; додатково реєструють тильні уламки, утримання заповнення й відмови вузлів, адже порівняльна оцінка V50 критеріїв прийнятності повної СОК не заміняє.

Запропонована програма потребує валідації для будівельного скління. Для сценарію С1 визначальним є хвильовий відгук після локального пошкодження, для С3 — взаємодія удару з поточним хвильовим навантаженням, тож результати серії С2 на ці сценарії автоматично не поширюються. Науковий результат має полягати в установленні залежностей для визначеної конструкції та умов впливу.

Напрямок 4. Верифікація та валідація чисельних моделей

Модель повинна відтворювати релевантні механізми: тріщиноутворення, роботу прошарку, деламінацію, контакт фрагментів і відмову опорного контуру. Для її перевірки потрібні незалежні експериментальні результати, аналіз чутливості до сітки й параметрів та контроль енергетичного балансу; спрощені інженерні залежності можна будувати лише в межах перевіреного діапазону [47, 48].

Напрямок 5. Обґрунтування майбутньої класифікації

Позначення FR може правити за робочу назву дослідницької системи оцінювання уламкоцтійкості. До підтвердження рівнів випробуваннями воно не є нормативним класом і не повинно супроводжуватися неперевіреною відповідністю BR/FB. Таблиця 3.7 визначає інформацію, потрібну для побудови такої системи.

Таблиця 3.7 — Склад даних для обґрунтування класифікації уламкоцтійкості

Складова	Що потрібно зафіксувати	Умова для майбутньої класифікації
Ударник	Сімейство, матеріал, маса, геометрія, орієнтація	Перевірена репрезентативність та відтворюваність
Режим удару	Швидкість, кут, кількість і розташування влучень	Однозначний рівень усередині визначеного сімейства

Складова	Що потрібно зафіксувати	Умова для майбутньої класифікації
Зразок	Будова, розміри, температура, стан і закріплення	Визначена область поширення результату
Попередня дія	Хвильове навантаження або інше контрольоване пошкодження	Вимірюваний і відтворюваний початковий стан
Поєднання	Порядок впливів, часовий інтервал, фаза руху	Окреме підтвердження комбінованого сценарію
Результат	Пробиття, тильні уламки, утримання, відмова вузлів	Роздільні критерії та статистично обґрунтоване прийняття

Ієрархію рівнів слід перевіряти в межах визначеного сімейства ударників; для різних форм і матеріалів можуть знадобитися окремі категорії, без припущення взаємного перекриття. Комбінований результат повинен містити обидва навантаження, їх порядок і часовий зв'язок — формальний запис двох незалежних класів через знак «+» проходження поєднаного випробування не доводить.

3.7.2 Практичні рекомендації для проєктування і оцінювання СОК

На основі проведеного огляду сформулюємо вимоги до вибору й перевірки рішень. Вони не замінюють розрахунку чи випробування і не встановлюють універсальних товщин скла, полімеру чи деталей кріплення.

Рекомендація 1. Визначення проєктного сценарію

Для об'єкта задають значущі види впливу, положення СОК, параметри хвилі й зовнішнього удару та прийнятний результат. Відстань — лише одна з вихідних величин, тому застосовувати фіксовані межі 10 або 40 м як універсальні зони захисту, без сценарного обґрунтування, недоцільно.

У технічному завданні окремо визначають охоплення теплової дії, пожежі, прямого удару й локальної проникної загрози. Якщо ці дії істотні, результати самого лише хвильового чи балістичного випробування доповнюють відповідним обґрунтуванням, а межі захисної функції СОК узгоджують із захистом стіни, монтажного вузла та будівлі в цілому.

Рекомендація 2. Вибір конструкції за підтвердженими характеристиками

Будову ламінованого скла, склад склопакета та конструкцію рами обирають за протоколами випробувань або за дозволеним і перевіреним розрахунковим підходом, зіставляючи розміри, комплектацію та спосіб монтажу з умовами підтвердження. Предмет перевірки для різних сценаріїв визначає таблиця 3.8.

Таблиця 3.8 — Підтвердження захисту залежно від сценарію

Сценарій	Предмет перевірки	Потрібне підтвердження
Хвиля без заданого зовнішнього удару	Скління, рама, монтаж і небезпека власних уламків	Результат за визначеним вибуховим методом та навантаженням
C1 Удар перед хвилею	Вибуховий відгук після локального пошкодження	Послідовне випробування або валідований аналіз відповідного дефекту
C2 Удар після хвильової дії	Залишковий опір пошкодженої системи	Визначений стан у момент удару та результат для заданого ударника
C3 Перекриття впливів	Взаємодія локального контакту та поточного хвильового навантаження	Програма з контрольованими часовими параметрами

Рекомендація 3. Перевірка крайового утримання

Заходження скла в опору, штапики, клейові з'єднання та механічні утримувачі оцінюють як частину випробуваної системи, адже їхні параметри залежать від геометрії, деформацій і властивостей матеріалів. Ані універсальної переваги сухого чи клейового монтажу, ані єдиної мінімальної глибини утримання без відповідного підтвердження не встановлюють.

Рекомендація 4. Узгодження рами, монтажу та будівельної основи

Потрібно перевіряти передавання зусиль від заповнення через раму й анкери до опорної конструкції, зважаючи також на крихкі локальні механізми відмови основи та можливість утворення її уламків. Просте збільшення розміру анкера чи жорсткості профілю ефективності підсилення ще не підтверджує.

Рекомендація 5. Оцінювання систем із захисною плівкою

Плівка може зменшувати небезпеку власних уламків — за належного підбору й крайового закріплення [35, 37]. Результат підтверджують для

конкретних скла, плівки, рами та навантаження; без окремого випробування не слід заявляти ані зупинення зовнішнього уламка, ані кількісного відсотка зниження ризику.

Рекомендація 6. Обстеження після пошкодження

Після вибухового впливу оцінюють скло, крайові зони, прошарок, раму, фурнітуру, анкери та основу. Відсутність видимих тріщин на одному листі ще не доводить збереження всіх характеристик. Тимчасове закриття прорізу чи наклеювання плівки заявленого класу автоматично не відновлює — рішення про ремонт і подальшу експлуатацію має ґрунтуватися на обстеженні та відповідній документації.

3.7.3 Пропозиції щодо включення уламкостійкості до нормативної бази України

Нормативну роботу доцільно вести послідовно, пов'язуючи кожен етап із готовністю доказової бази. Наведені кроки є пропозицією автора, а не затвердженим планом стандартизації.

Крок 1 — методичні рекомендації. Ідеться про документ щодо опису загрози, збору вихідних даних, вибору підтверджених характеристик і перевірки монтажу. До отримання експериментальних результатів він не повинен містити неперевіраних мінімальних товщин або «гарантованих» дистанцій захисту; назву «технічний регламент» для добровільних інформаційних рекомендацій не вживають.

Крок 2 — актуалізація національних прийнятих EN і підготовка окремої дослідної методики. Слід перевірити статус ДСТУ та доцільність прийняття EN 13123-2:2025 і EN 13124-2:2025. За ідентичного прийняття зберігається технічний зміст EN, а додаткові сценарії й вимоги оформлюються так, щоб не створювати хибного враження їх ідентичності європейському стандарту [26, 27].

Крок 3 — міжлабораторне підтвердження й міжнародне обговорення. Після накопичення результатів доцільно сформулювати пропозиції для профільних національних комітетів та налагодити взаємодію з CEN/TC 33 щодо виробів і CEN/TC 129 щодо скла. Нагадаємо, що український ТК 300 і європейський

CEN/TC 33 — різні комітети, а рішення про нову нормативну роботу ухвалюється за встановленою процедурою та з погодженням предметом стандартизації [26, 31].

Підсумовуючи: запропонована програма поєднує простежувані дані про загрозу, репрезентативні ударники, дослідження залишкової стійкості, валідовані моделі та міжлабораторну перевірку. Практичні положення визначають процес підтвердження захисту, а кількісні рівні майбутньої класифікації й конструктивні мінімальні вимоги мають стати результатом досліджень.

Висновки до розділу 3

У розділі розглянуто зовнішню уламкову дію на світлопрозорі огорожувальні конструкції та небезпеку їхніх власних уламків. Аналіз охопив фізичні механізми, можливості наявних випробувань і вимоги до обґрунтування комбінованої стійкості; його результати можна звести до такого.

1. Первинні й вторинні уламки слід розрізняти за походженням, а зовнішній ударник — за функцією у випробуванні. Оцінювання власних уламків після хвильового навантаження не підтверджує опору зовнішньому уламковому потоку. Тип носія, функціональну групу загрози та механізм формування уламків описують окремо, а поєднання хвильової, уламкової, теплової та локальної проникної дій визначає склад необхідних перевірок захисту.

2. Хронологія комбінованого впливу визначається часом прибуття навантажень і станом конструкції. Сценарії С1–С3 описують удар до хвилі, удар після прийнятого інтервалу хвильової дії та перекриття впливів. Універсальні дистанційні межі, як і висновок про відсутність уламкової загрози за самою лише відстанню, обґрунтування не мають.

3. Спрощені статистичні та кінематичні моделі придатні за явно заданих припущень. Вихідні дані повинні мати визначене походження, оцінки — межі невизначеності, а енергія ударника сама по собі універсального порога пробиття чи травмування не встановлює.

4. Ламінування та системи утримання здатні зменшувати небезпеку після руйнування скла, проте результат залежить від прошарку, розмірів, температури,

рами, крайових з'єднань і монтажу. Властивості окремого матеріалу оцінювання всієї СОК не замінюють.

5. Дослідження залишкової вибухостійкості після попереднього удару вже існують. Подальшу наукову задачу доцільно конкретизувати через післявибуховий стан, множинність, часові параметри та роботу повної конструкції. Розділ формулює програму такого дослідження — нових експериментально встановлених класів захисту він не повідомляє.

6. Нормативний огляд вимагає розмежування класу навантаження, категорії небезпеки, кулетривкості та опору проникненню. EN 13123/13124, ISO 16933, ASTM F1642/F2912, EN 1063 і EN 1522/1523 мають різні об'єкти та критерії; MIL-STD-662 і STANAG 2920 / AEP-2920 доповнюють методичну базу балістичного оцінювання, а FEBR стосується силового проникнення й обстрілу. Сукупність окремих результатів комбінованої дії автоматично не підтверджує.

7. Майбутній метод уламкового оцінювання потребує обґрунтованих сімейств ударників, однозначних критеріїв пробиття й тильної небезпеки, контрольованого стану зразка, повторюваності та меж поширення результату. Порівняння V_{50} неушкоджених і попередньо навантажених зразків може бути складовою дослідження залишкової стійкості — за умови оцінювання невизначеності. Національні пропозиції слід узгоджувати з будівельними нормами, актуальними прийняттями EN та компетенцією профільних технічних комітетів.

Практичне значення проведеного аналізу полягає у визначенні вимог до достовірного підтвердження захисних властивостей СОК. Перехід від якісної рекомендації до заявленого рівня захисту потребує простежуваного зв'язку між сценарієм загрози, випробуваною конфігурацією та критерієм прийнятності результату.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Матеріали монографії дають підстави розглядати проєктування та монтаж світлопрозорих конструкцій як взаємопов'язані складові забезпечення якості й безпеки будівлі. Властивості встановленого огородження визначаються спільною роботою скління, рами, кріплень і вузлів примикання до стіни. Вибір кожного елемента має відповідати умовам об'єкта та очікуваним навантаженням. Для пам'яток архітектури визначальною умовою є збереження автентичності, а заявлені захисні властивості потребують підтвердження за обґрунтованим сценарієм загрози.

Розгляд нормативних передумов, міжнародного досвіду та експертних оцінок показав, що використання сучасних віконних систем у пам'ятках архітектури потребує індивідуального обґрунтування. Застосування вікон із полівінілхлориду може розглядатися там, де відповідне рішення узгоджується зі збереженням автентичності й вимогами охорони спадщини. Узагальнені фактори та типові рішення слугують основою такого аналізу, проте їх придатність необхідно перевіряти для конкретної пам'ятки. Поліпшення енергоефективності має поєднуватися зі збереженням цінних елементів і характеру віконних заповнень.

Систематизація монтажних рішень підтверджує необхідність розглядати вікно, монтажний шов і стіну як єдину систему. Передачу навантажень забезпечують опорні та кріпильні елементи, підібрані з урахуванням матеріалу основи, геометрії виробу й умов установа. Теплоізоляційне заповнення шва не підміняє механічного закріплення конструкції. Герметичність з боку приміщення, захист від атмосферних впливів ззовні та відведення вологи мають забезпечувати сухий стан функціональної зони й збереження її властивостей.

Організаційна підготовка монтажу повинна поєднувати обстеження прорізів, узгодження робочих вузлів, вибір матеріалів і послідовності операцій із контролем виконання. Відповідальність за якість примикань необхідно визначати на межі проєктування, виготовлення виробу та його встановлення. Підготовка робіт має також охоплювати демонтаж наявних конструкцій і поводження з

матеріалами та відходами. Це створює умови для відтворення проєктного рішення й належного утримання конструкції під час експлуатації.

Аналіз уламкової дії засвідчив необхідність розмежування зовнішніх первинних уламків і вторинних уламків, що утворюються внаслідок руйнування огороження. Оцінювання небезпеки власних уламків після дії ударної хвилі не підтверджує опору зовнішньому уламковому впливу. Такий висновок потребує даних про ударники, умови взаємодії та критерії пошкодження. Походження вихідних даних і невизначеність оцінок мають бути визначені; сама відстань до джерела вибуху або енергія ударника не встановлюють універсальної межі безпеки.

За комбінованої дії важливими є послідовність навантажень, часовий інтервал між ними та стан конструкції перед наступним впливом. Попереднє пошкодження скла, прошарку, рами або кріплень може змінювати механізм подальшого руйнування. Тому сукупність окремих результатів випробувань на вибухостійкість і балістичний опір автоматично не підтверджує стійкості до сумісної дії хвилі й уламків. Для цього потрібна спеціально обґрунтована програма оцінювання.

Ламіноване скло та системи утримання можуть зменшувати небезпеку вторинних уламків за умови належного добору й спільної роботи елементів. Результат залежить від будови скління, властивостей прошарку, температури, розмірів заповнення та його закріплення. Оцінювання повної конструкції має охоплювати утримання заповнення в рамі, тильну уламкову небезпеку, стан кріплень і опор. Межі застосування виробу повинні відповідати випробуваній конфігурації та обґрунтованим межам поширення результатів.

Нормативний аналіз виявив потребу відокремлювати вид навантаження, критерій руйнування та категорію небезпеки. Показники різних методів випробувань не є взаємозамінними. Адаптація методик балістичного оцінювання до будівельного скління потребує перевірки, а статистичні характеристики опору пробиттю необхідно подавати разом з умовами випробувань і невизначеністю. Їм не слід надавати значення гарантованого рівня захисту.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на залишкову стійкість після пошкодження, множинні влучення та взаємодію навантажень у часі. Запропонована програма передбачає обґрунтування репрезентативних ударників, контроль стану зразків, дослідження повних конструкцій і перевірку чисельних моделей за експериментальними даними. Відтворюваність результатів та міжлабораторне зіставлення мають стати підставою для розвитку методів оцінювання й узгодження їх із національною нормативною базою.

Практичне значення монографії полягає в обґрунтуванні послідовності рішень, що пов'язує вимоги до будівлі з вибором світлопрозорої конструкції, технологією монтажу та перевіркою властивостей. Визначені вихідні дані, урахування особливостей об'єкта й контроль фактично виконаних вузлів створюють основу для узгодження збереження архітектурної спадщини, належних умов експлуатації та заходів зменшення уламкової небезпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Конституція України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>
- [2] Закон України Про охорону культурної спадщини. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1805-14>
- [3] Закон України про архітектурну діяльність. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/687-14>
- [4] Закон України Про регулювання містобудівної діяльності. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/3038-17>
- [5] Закон України Про ліцензування видів господарської діяльності. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/222-19>
- [6] Постанова КМУ від 5 серпня 2015 р. № 609 Про затвердження переліку органів ліцензування та визнання такими, що втратили чинність, деяких постанов Кабінету Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/609-2015-%D0%BF>
- [7] ДБН А.2.2-14:2016 "Склад та зміст науково-проектної документації на реставрацію пам'яток архітектури та містобудування" із Зміною № 1. URL: <https://e-construction.gov.ua/files-token/6f89106983fef1d54b577ac3bd-9b36e2>.
- [8] Кабінет Міністрів України. Про затвердження кваліфікаційних вимог до науково-проектних, науково-дослідних організацій, що є розробниками науково-проектної документації у сфері охорони культурної спадщини: постанова від 22 червня 2026 р. № 795. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/795-2026-%D0%BF>
- [9] DNK (Німецький національний комітет з охорони пам'яток). URL: <https://www.dnk.de>
- [10] Закон про охорону пам'яток Північного Рейну-Вестфалії (Закон про охорону пам'яток – DSchG NRW). URL: <https://recht.nrw.de/lrgv/gesetz/01062022-nordrhein-westfaelisches-denkmalschutzgesetz-denkmalschutzgesetz-dschg-nrw/>
- [11] Justiz NRW, Verwaltungsgericht Minden, 9 K 3865/21 URL: https://nrwe.justiz.nrw.de/ovgs/vg_minden/j2024/9_K_3865_21_Urteil_-20240814.html
- [12] Федеральне управління пам'яток Австрійської республіки. URL: <https://www.bda.gv.at>
- [13] Федеральний закон про охорону пам'яток через їхнє історичне, художнє чи інше культурне значення (Закон про охорону пам'яток – DMSG) StF: BGBl. № 533/1923. URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10009184>

- [14] Свідоме успадкування. Експерт іС consulenten Клаудіу Сільвестру про традиційні підходи та інновації в реконструкції історичних будівель. PRAGMATIKA.MEDIA. Оксана Гришина / Архітектура / 22 Травня 2025. URL: <https://pragmatika.media/svidome-uspadkuvannia-ekspert-ic-consulenten-klaudiu-silvestru-pro-tradytsijni-pidkhody-ta-innovatsii-v-rekonstruktsii-istorychnykh-budivel/>
- [15] Осипов С. А. Исследование и обоснование рациональных методов реставрации арочных конструкций и сводов памятников архитектуры. Метод-образующие признаки / С. А. Осипов // Наук. вісн. будівництва. – Х. : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2012. – Вип. 70. – С. 42–47.
- [16] Покрышкин П. П. Краткие советы по вопросам ремонта памятников старины и искусства / П. П. Покрышкин. – Псков : Псковское губернское Правление, 1916. – 34 с.
- [17] Посібник з проєктування та виконання монтажу вікон та входних дверей для новобудов і реконструкцій. Видання 01/2025. Ift Rosenheim.
- [18] Прибега Л., Архітектурна спадщина України: пам'ятко охоронний аспект: Монографія. Інститут культурології НАМ України, Київ, 2016 р.
- [19] Hans Menk und Erich Zeifert: Neue Fenster für alte Fassaden. Köln, 1986.
- [20] Жовтяк Г.А., Богданов Р., Жовтяк А., Проблеми та перспективи розвитку будівельної галузі України в умовах війни, Економіка та суспільство, Випуск # 62 / 2024, DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-62-128>
- [21] O. Romanenko, L. Alaverdian, R. Dymenko, SUSTAINABLE DEVELOPMENT STRATEGIES FOR THE CONSTRUCTION INDUSTRY OF UKRAINE: PROBLEMS AND PROSPECTS, Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2025, № 5, ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362, DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-5/153>
- [22] Abasova A., Mamedov E., ANALYSIS OF MODERN DEVELOPMENT TRENDS IN THE CONSTRUCTION SECTOR, Економіка транспортного комплексу, вип. 45, 2025, DOI: 10.30977/ETK.2225-2304.2025.45.184
- [23] RAL-Gütegemeinschaft Fenster und Haustüren; ift Rosenheim. Leitfaden zur Planung und Ausführung der Montage von Fenstern und Haustüren für Neubau und Renovierung. Frankfurt am Main: RAL-Gütegemeinschaft, 2014. ISBN 978-3-00-045381-6.
- [24] ДСТУ EN 14351-1:2020 (EN 14351-1:2006 + A2:2016, IDT). Вікна та двері. Вимоги. Частина 1. Вікна та зовнішні двері. Київ, 2020.
- [25] ДСТУ Б В.2.6-79:2009. Конструкції будинків і споруд. Шви з'єднувальні місць примикань віконних блоків до конструкцій стін. Загальні технічні умови. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009.

- [26] EN 13123-2:2025. Windows, doors, shutters and curtain walling — Explosion resistance — Requirements and classification — Part 2: Arena test. CEN, 2025. URL: <https://www.evs.ee/en/evs-en-13123-2-2025>
- [27] EN 13124-2:2025. Windows, doors, shutters and curtain walling — Explosion resistance — Test method — Part 2: Arena test. CEN, 2025. URL: <https://www.evs.ee/en/evs-en-13124-2-2025>
- [28] ISO 16933:2007. Glass in building — Explosion-resistant security glazing — Test and classification for arena air-blast loading. ISO, 2007. URL: <https://www.solargard.com/wp-content/uploads/2017/12/iso-standard-16933-2007.pdf>
- [29] ASTM F1642/F1642M-25. Standard Test Method for Glazing and Glazing Systems Subject to Airblast Loadings. ASTM International, 2025. URL: https://store.astm.org/fl642_fl642m-25.html
- [30] ASTM F2912-25. Standard Specification for Glazing and Glazing Systems Subject to Airblast Loadings. ASTM International, 2025. URL: <https://store.astm.org/f2912-25.html>
- [31] EN 1063:1999. Glass in building — Security glazing — Testing and classification of resistance against bullet attack. CEN, 1999. URL: <https://www.hephaestusconsulting.com/security-consulting-engineers-reading-img/EN-1063.pdf>
- [32] EN 1522:1998. Windows, doors, shutters and blinds — Bullet resistance — Requirements and classification. CEN, 1998.
- [33] EN 1523:1998. Windows, doors, shutters and blinds — Bullet resistance — Test method. CEN, 1998.
- [34] Stolz A., van Doormaal A., Haberacker C. et al. Resistance of structures to explosion effects: Review report of testing methods. EUR 26449 EN, JRC87202. Publications Office of the European Union, 2014. DOI: 10.2788/57271. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC87202>
- [35] FEMA 426. Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings. Federal Emergency Management Agency, 2003.
- [36] EN 13123-1:2025. Windows, doors, shutters and curtain walling — Explosion resistance — Requirements and classification — Part 1: Shock tube; EN 13124-1:2025. Windows, doors, shutters and curtain walling — Explosion resistance — Test method — Part 1: Shock tube. CEN, 2025. URL: <https://www.evs.ee/en/evs-en-13123-1-2025> URL: <https://www.evs.ee/en/evs-en-13124-1-2025>

- [37] United Nations Department of Safety and Security, Physical Security Unit. Blast Protection for Windows. PSU Information Bulletin. Електронний примірник, оприлюднений UNICEF. Дата звернення: 16.09.2026. URL: https://www.unicef.org/jordan/media/5951/file/LRFP-2021-9166373-Annex_4-Blast_Protection_for_Windows.pdf
- [38] Osnes K., Dey S., Hopperstad O. S., Børvik T. On the Dynamic Response of Laminated Glass Exposed to Impact Before Blast Loading. *Experimental Mechanics*. 2019. Vol. 59. P. 1033–1046. DOI: 10.1007/s11340-019-00496-1. URL: <https://doi.org/10.1007/s11340-019-00496-1>
- [39] MIL-STD-662G. V50 Ballistic Test for Armor. Department of Defense, 23 July 2025. Офіційний каталог ASSIST QuickSearch. URL: https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=35877
- [40] NATO. STANAG 2920. Classification of Personal Armour. Edition 3. NATO Standardization Office, 22 June 2015.
- [41] NATO. AEP-2920. Procedures for the Evaluation and Classification of Personal Armour — Bullet and Fragmentation Threats. Edition A, Version 2. NATO Standardization Office, 16 September 2016.
- [42] Bolduc M., Jager H. Summary of Newly Ratified NATO Standard AEP 2920, Ed. A, V1. Defence Research and Development Canada, 2016. DRDC-RDDC-2016-P065. URL: <https://www.scribd.com/document/420022403/p804202-A1b-pdf>
- [43] Mott N. F. Fragmentation of shell cases. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. 1947. Vol. 189, No. 1018. P. 300–308. DOI: 10.1098/rspa.1947.0042. URL: <https://doi.org/10.1098/rspa.1947.0042>
- [44] Cooper P. W. *Explosives Engineering*. Wiley-VCH, 1996. ISBN 978-0-471-18636-6.
- [45] Gurney R. W. The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells, and Grenades. Report BRL-405. Ballistic Research Laboratory, 1943.
- [46] Van Doormaal A., Haberacker C., Hüsken G. et al. A comparison of existing standards for testing blast resistant glazing and windows. EUR 27133 EN, JRC94930. Publications Office of the European Union, 2015. DOI: 10.2788/361383. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC94930>
- [47] Van Doormaal A., Haberacker C., Hüsken G. et al. Numerical simulations for classification of blast loaded laminated glass: possibilities, limitations and recommendations. EUR 27137 EN, JRC94928. Publications Office of the European Union, 2015. DOI: 10.2788/083832. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC94928>

- [48] Osnes K., Holmen J. K., Hopperstad O. S., Børvik T. Fracture and fragmentation of blast-loaded laminated glass: An experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering*. 2019. Vol. 132. Article 103334. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103334. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103334>
- [49] FEMA 452. Risk Assessment: A How-To Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings. Federal Emergency Management Agency, 2005.
- [50] DuPont. SentryGlas Plus. Технічна брошура з характеристиками іонопластового прошарку. Електронний примірник. Дата звернення: 16.09.2026. URL: <https://www.newglasstech.com/downloads/SentryGlasPlus%20brochure.pdf>
- [51] ASSA ABLOY. Forced Entry Bullet Resistant Openings. Технічна інформація про FEBR. Дата звернення: 16.09.2026. URL: https://www.assaabloydss.com/en/products/doors-and-frames/specialty-doors/product-details.aehpdp-forced-entry-bullet-resistant-openings-dss_assa_abloy_dss_227320
- [52] Mauchant D., Rice K. D., Riley M. A., Leber D., Samarov D., Forster A. L. Analysis of Three Different Regression Models to Estimate the Ballistic Performance of New and Environmentally Conditioned Body Armor. NISTIR 7760. National Institute of Standards and Technology, February 2011. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir7760.pdf>
- [53] Stolz A., Millon O. (eds.). Recommendations for the improvement of existing European norms for testing the resistance of windows and glazed façades to explosive effects. EUR 27554 EN, JRC98372. Publications Office of the European Union, 2016. DOI: 10.2788/319252. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC98372>
- [54] ISO 16934:2007. Glass in building — Explosion-resistant security glazing — Test and classification by shock tube loading. ISO, 2007.
- [55] ASTM F1233-21. Standard Test Method for Security Glazing Materials and Systems. ASTM International, 2021. URL: <https://store.astm.org/f1233-21.html>
- [56] UL Solutions. What Does It Take to Stop a Speeding Bullet? Опис класифікацій UL 752. Дата звернення: 16.09.2026. URL: <https://www.ul.com/news/what-does-it-take-stop-speeding-bullet>
- [57] EN 1627:2021. Pedestrian doorsets, windows, curtain walling, grilles and shutters — Burglar resistance — Requirements and classification. CEN, 2021.
- [58] EN 356:1999. Glass in building — Security glazing — Testing and classification of resistance against manual attack. CEN, 1999. URL: <https://www.evs.ee/en/evs-en-356-2000>

- [59] ДСТУ EN 13123-2:2006. Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Класифікація та технічні вимоги. Частина 2. Діапазон випробування (EN 13123-2:2004, IDT). Київ: Держспоживстандарт України, 2008. URL: https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTU3/dstu_en_13123-2-2006.pdf
- [60] ДСТУ EN 13124-2:2006. Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Метод випробування. Частина 2. Діапазон випробування (EN 13124-2:2004, IDT).
- [61] ДСТУ EN 1063:2022 (EN 1063:1999, IDT). Скло в будівництві. Захисне скління. Випробування та класифікація за кулетривкістю. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. URL: <https://ukrmts.com/docsdb/38500.html>
- [62] ДБН В.1.2-4:2019. Інженерно-технічні заходи цивільного захисту. Київ, 2019. Застосовується з чинними змінами. URL: <https://mininfra.gov.ua/news/35830-ogolosennia-pro-opriliudnennia-projektu-zmini-no-1-dbn-v12-42019>
- [63] ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ, 2023. Застосовується з чинними змінами. Реєстр ЄДЕССБ. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3875987194791331287