

УДК624.9

А. С. Величкович

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2685-8753>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019

А. В. Андрусяк*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019

Ю. В. Олевич

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5919-9945>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019

*автор-кореспондент, e-mail: andrii.andrusiak@nung.edu.ua

Експрес-оцінка вибухостійкості шаруватих пластин для захисних екранів і облицювань

Цитувати як:

Величкович А. С., Андрусяк А. В., Олевич Ю. В. (2026). Експрес-оцінка вибухостійкості шаруватих пластин для захисних екранів і облицювань. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 18-34. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-02)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У будівництві та суміжних інженерних галузях зростає потреба в захисних екранах і облицюваннях, здатних ефективно працювати під дією вибухових навантажень. У статті представлено експрес-методику оцінки вибухостійкості захисних шаруватих пластин для проєктування таких конструктивних елементів. Методика орієнтована на етап ескізного вибору, коли необхідно швидко зіставити варіанти шарування за обмежень поверхневої маси та габаритів і обґрунтувати стартове конструктивне рішення. Розрахункову модель побудовано на основі лінійної теорії пластин Кірхгофа–Лява, а вибуховий вплив подано еквівалентним короткоімпульсним навантаженням, узагальнювальною характеристикою якого є інтегральна міра імпульсу. Первинну працездатність оцінюють за двома критеріями. Максимальний прогин характеризує глобальну деформативність і безпосередньо пов'язаний із функціональними вимогами, зокрема з допустимим зазором до об'єкта захисту. Мінімальний коефіцієнт запасу за допустимими напруженнями визначає критичний шар і задає напрям коригування компоновки. Методику подано як послідовний розрахунковий алгоритм, що дозволяє варіювати товщини, матеріали та порядок шарів і отримувати конструктивне рішення в інженерно

інтерпретованій формі. Основні тестові результати подано як серію порівняльних і параметричних розрахунків для трьох конструкцій захисних пластин, в тому числі для легкого композитного сендвіча як прикладу альтернативного класу рішень із малою поверхневою масою. Для двох поширених компоновок, металополімерної та кераміко-еластомерної, отримано співвідношення “поверхнева маса–прогин” і “поверхнева маса–запас міцності”. Показано, що товщина середнього демпферного прошарку переважно визначає деформативність за помірною приросту маси, тоді як потовщення лицьової обшивки швидко збільшує запас міцності. Отримані результати підтверджують доцільність експрес-оцінки як інструмента для прийняття первинного конструктивного рішення і підготовки обґрунтованої базової моделі для подальшого уточнення у скінченно-елементній постановці.

Ключові слова: вибухостійкість, шаруваті пластини, захисні облицювання, імпульсне навантаження, теорія Кірхгофа–Лява, прогин, напруження, коефіцієнт запasu, поверхнева маса.

Вступ

Захисні шаруваті пластини застосовують там, де потрібне надійне та економне за масою рішення проти короткочасних екстремальних впливів. Типовими прикладами є захисні днища та екрани техніки, протиуламкові і протиударні панелі, локальні захисні вставки в огорожувальних конструкціях, підсилені перегородки та бар’єрні елементи тощо. У таких задачах визначальною є стійкість захисного елемента до дії надмірного тиску повітряної ударної хвилі.

На етапі концепції та попереднього проектування інженеру потрібна швидка відповідь на низку практичних запитань: яка компоновка шарів (матеріали, послідовність, товщини) дає менші прогини та напруження за однакової питомої маси, та в якому напрямку змінювати параметри, щоб досягти прийняттого рівня пошкоджуваності без надмірного збільшення маси чи габаритів. Така експрес-оцінка допомагає прийняти первинне конструктивне рішення, яке надалі можна детально перевірити в розрахункових програмних пакетах методом скінченних елементів.

Під вибухостійкістю надалі розумітимемо здатність елемента зберігати несучу та захисну функції під дією вибухового навантаження та обмежувати деформації і пошкодження до прийняттого рівня. Саме для первинної, параметричної та швидкої оцінки і пропонується підхід, орієнтований на інженерну практику вибору конструктивної схеми захисних облицювань і екранів.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Сучасні дослідження вибухостійкості тонкостінних і шаруватих елементів розвиваються переважно у двох напрямках: експериментально-числове вивчення конкретних конфігурацій панелей; пошук ефективних архітектур

шарів, які підвищують енергоємність і зменшують пікові деформації [1–3]. Зокрема, для сендвіч-пластин із пінометалевими осерддями показано характерні моди деформування та руйнування під дією повітряного вибуху, а також чутливість прогину до імпульсу навантаження [1]. Як окремий шлях підвищення вибухостійкості конструкцій активно вивчаються та оптимізуються ауксетичні стільникові осерддя [4, 5].

Серія оригінальних робіт присвячена динаміці пластин за умов коротких і надкоротких імпульсів, зокрема ефектам «насичення імпульсу» для металевих пластин у замкненому вибуховому середовищі [6]. Також розглядається поведінка сендвіч-панелей зі спеціально спроектованими або градієнтними осерддями та застосуванням адитивних технологій виготовлення [7, 8]. До цього ж напрямку слід віднести роботи, присвячені згину пластин із тріщинами та системами розрізів з урахуванням контактної взаємодії берегів [9–11]. У роботі [12] для вибухостійких конструкцій реалізовано комплексний підхід, у якому метод скінченних елементів використано для формування динамічної відповіді сендвіч-панелей, а моделі машинного навчання – для багатокритеріальної оптимізації геометрії осерддя.

Водночас у будівельній та суміжній інженерії значний інтерес викликають рішення типу захисне облицювання чи екран, які приймають на себе частину енергії вибуху та знижують пошкодження основної несучої конструкції [13, 14]. Для залізобетонних елементів додатково розглядають композитні системи з полімерними покриттями як механізм підвищення енергодисипації та тріщиностійкості при тривалих імпульсах [15]. Для спеціальних високоміцних матеріалів, зокрема ультрависокоміцного фібробетону, наведено робочі діапазони міцності та деформативності за вибухових впливів [16]. На рівні прийняття конструктивних рішень (перекриття, балки чи ферми, відкриті решітчасті елементи) зростає кількість робіт із детальним моделюванням близьких вибухів і складних випадків взаємодії "повітря–конструкція" [17].

Попри суттєвий прогрес, у практичному проєктуванні залишається прогалина, що пов'язана з первинним конструктивним рішенням. Інженеру-практику потрібна швидка методика вибору шаруватої пластини (матеріалів, товщин, послідовності шарів) з оцінкою максимального прогину та напружень у кожному шарі. Це дає змогу ще до трудомісткого налаштування нелінійної скінченно-елементної моделі отримати надійні орієнтири для подальшого детального аналізу. Для будівельного контексту також важливо, щоб первинна експрес-оцінка узгоджувалась із розрахунками на аварійні (випадкові) дії та концепцією надійності і конструктивної безпеки за чинними нормами [18, 19]. Аналіз показує, що більшість сучасних публікацій або зосереджується на високоточному

розрахунку конкретної конструкції для заданого сценарію, або розв'язує оптимізаційні задачі для окремих класів осердь чи метаструктур. Водночас такі результати малоприменні для ескізного проектування захисних облицювань і екранів, де потрібна коротка інженерна процедура для швидкого порівняння варіантів. Це підводить до постановки проблеми: потрібно розробити уніфікований та відтворюваний аналітичний модуль для первинних оцінок деформативності і міцності шаруватої пластини за впливу вибухової хвилі.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження – розробити та обґрунтувати інженерний підхід до експрес-оцінки вибухостійкості шаруватих пластин як елементів захисних облицювань і екранів на основі простої аналітичної схеми (із орієнтацією на швидкий параметричний аналіз та порівняння варіантів).

Для досягнення мети потрібно виконати аналітичне моделювання шаруватої прямокутної пластини за дії еквівалентного імпульсного вибухового тиску, розробити узагальнену процедуру оцінювання максимального прогину та напружень у шарах, реалізувати параметричний аналіз матеріалів, товщин і послідовності шарів з урахуванням заданих геометричних обмежень і допустимої маси шаруватої пластини.

Матеріали та методи

Розрахункова модель та прийняті припущення. Об'єктом моделювання є прямокутна шарувата пластинка з розмірами $a \times b$ (завжди прийматимемо $a \geq b$), шарнірно обіперта по всьому контуру (рис. 1). Для опису деформування використано модель пластини Кірхгофа–Лява.

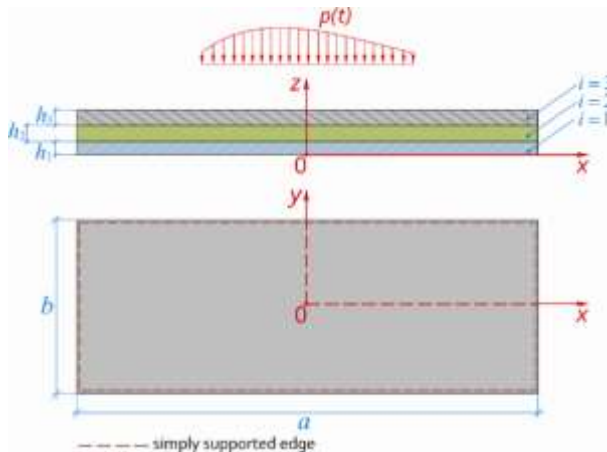


Рис. 1. Розрахункова схема захисної шаруватої пластини

Вводимо декартову систему координат: вісь (x) уздовж розміру (a), вісь (y) уздовж розміру (b), вісь (z) – по товщині шаруватої пластини вгору. Початок координат розташовуємо в центрі нижньої поверхні пластини, тобто $x \in [-a/2, a/2]$, $y \in [-b/2, b/2]$, $z \in [0, H]$, де (H) – сумарна товщина.

Пластина може містити n ізотропних шарів (у базовій моделі прийемо від 1 до 3 шарів). Геометрія та механічні характеристики кожного шару задаються товщиною h_i , модулем Юнга E_i , коефіцієнтом Пуассона ν_i , густиною ρ_i та допустимим напруженням $[\sigma]_i$. Шари вважаються такими, що працюють сумісно (без відриву та ковзання по межі шарів). Це відповідає типовому виконанню композитних захисних панелей коли шари стягуються по контуру в рамі, з'єднуються болтами чи заклепками, точковими фіксаторами або компаундним шаром.

Модель вибухового впливу та короткоімпульсний режим. Зовнішній вплив моделюється як короткоімпульсний вибуховий тиск, що діє рівномірно по площі пластини:

$$p(t) = p_{\max}, t \in [0, \Delta t], \quad (1)$$

де p_{\max} – піковий тиск, Δt – ефективна тривалість імпульсу.

Інтегральну міру “поштовху”, спричинену вибухом, задаємо прямокутним імпульсом тиску:

$$i_p = \int_0^{\Delta t} p(t) dt = p_{\max} \Delta t. \quad (2)$$

У межах експрес-моделі розглядається короткоімпульсний режим, коли реакція конструкції визначається імпульсом навантаження та першою формою коливань. Такий режим є типовим для більшості задач повітряної ударної хвилі. У випадках коли короткоімпульсність не виконується, експрес-методика дає верхню (консервативну) оцінку вибухостійкості, оскільки прямокутний імпульс перевищує реальний імпульс спадної вибухової хвилі. Для інженерної оцінки p_{\max} та Δt можна визначати за тротиловим еквівалентом і відстанню до центра вибуху, використовуючи методика Kingery–Bulmash, або спрощені методики [20].

Еквівалентні згинальні характеристики шаруватої пластини. Щоб розглянути згин “пакета шарів”, визначимо положення нейтральної осі для неоднорідного по товщині перерізу в межах лінійної теорії ламінатів. Нейтральна вісь (нейтральна поверхня) обирається так, щоб при чистому згині сумарна мембранна складова напружень по товщині дорівнювала нулю:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{E_i}{1 - \nu_i^2} \right) h_i z_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{E_i}{1 - \nu_i^2} \right) h_i}, \quad (3)$$

де z_i – координата центра ваги i -го шару.

Тоді, еквівалентна згинальна жорсткість

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{1 - \nu_i^2} \left(\frac{h_i^3}{12} + h_i (z_i - z_0)^2 \right), \quad (4)$$

тут $h_i^3 / 12$ – власний погонний момент інерції i -го шару відносно його центру (характеризує власну жорсткість шару),

$h_i (z_i - z_0)^2$ – доданок, визначений за теоремою Гюйгенса-Штейнера (характеризує підсилення за рахунок винесення жорстких шарів відносно нейтральної осі),

$E_i / (1 - \nu_i^2)$ – “плитний” модуль для i -го шару (враховує ефект Пуассона у зв’язку між кривинами та згинальними моментами).

Інерційна складова описується масою, що припадає на одиницю площі:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i. \quad (5)$$

По суті пара параметрів D та μ є визначальною у поставленій задачі: D – керує пружністю системи, а μ – її інерційним опором.

Визначення максимального прогину шаруватої пластини.

Динамічну реакцію пластини оцінено через модальний підхід, де поле прогинів представляється суперпозицією власних форм. Для моделі (рис. 1) власні форми φ_{mn} та власні частоти записуються як:

$$\varphi_{mn}(x, y) = \sin\left(\frac{m\pi}{a}\left(x + \frac{a}{2}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}\left(y + \frac{b}{2}\right)\right), \quad (6)$$

$$\omega_{mn} = \pi^2 \left(\frac{m}{a^2} + \frac{n}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\mu}}. \quad (7)$$

У межах експрес-оцінки свідомо використовується одномодове наближення (перша форма, $m = n = 1$), оскільки в короткоімпульсному

режимі саме перша форма визначає амплітуду глобального згину захисної панелі та пов'язану з ним працездатність за прогином.

У короткоімпульсному режимі тиск задає шаруватій пластині “поштовх”, тобто формує початкову швидкість вільних коливань. При цьому амплітуда – максимальний прогин пластини визначається як $w_{\max} = \dot{w}(0+)/\omega_{11}$, де початкова швидкість $\dot{w}(0+) = \zeta i_p / \mu$, а

модальний коефіцієнт $\zeta = 16/\pi^2$. Остаточо, максимальний прогин:

$$w_{\max} = \frac{16 p_{\max} \Delta t}{\pi^2 \mu \omega_{11}}. \quad (8)$$

Цей вираз одразу вказує напрями параметричного проектування: прогин зростає з імпульсом $p_{\max} \Delta t$, зменшується з ростом μ та ω_{11} . У свою чергу власна частота ω_{11} зростає зі збільшенням жорсткості D і зі зменшенням прогонів a та b .

Оцінка міцності шаруватої пластини. Для переходу від прогинів до напружень використовується зв'язок через кривини серединної поверхні. Оскільки $a \geq b$, то $k_y \geq k_x$, тому достатньо обчислити одну домінуючу кривину:

$$k_y = \frac{\pi^2}{b^2} w_{\max}. \quad (9)$$

Далі напруження в кожному шарі оцінюються в крайніх волокнах, оскільки саме вони визначають небезпечні рівні при згині. Спочатку задаються координати меж шарів (координати нижніх $z_{l,i}$ і верхніх $z_{u,i}$ волокон кожного шару).

Тоді нормальні напруження в напрямку осі y в крайніх волокнах i -го шару (в нижніх волокнах $\sigma_{l,i}$; у верхніх волокнах $\sigma_{u,i}$):

$$\sigma_{l,i} = E_i k_y (z_{l,i} - z_0); \quad \sigma_{u,i} = E_i k_y (z_{u,i} - z_0). \quad (10)$$

Для перевірки міцності використовується максимальне за модулем напруження в шарі:

$$\max \sigma_i = \max (|\sigma_{l,i}|, |\sigma_{u,i}|), \quad (11)$$

а запас за допустимим напруженням визначається як

$$k_{ms,i} = [\sigma]_i / \max \sigma_i. \quad (12)$$

Узагальнена оцінка працездатності шаруватої пластини в експрес-постановці приймається за найменшим запасом серед шарів.

Результати та обговорення

Для демонстрації роботи запропонованої експрес-методики та порівняння інженерних рішень розглянуто три тришарові компоновки, характерні для захисних облицювань і екранів. Попередні оцінки на етапі підбору архітектури показали, що раціональним напрямом є схема типу "жорстка та міцна лицьова обшивка – відносно податливий прошарок – несуча підкладка", тому всі варіанти сформовано в подібній послідовності. Нижче наведено три конструкції К1–К3 шаруватих пластин, порядок шарів подано починаючи з боку дії вибухового навантаження у бік захищеної конструкції.

Варіант К1. Це металополімерна панель із жорсткою сталеву лицьову обшивку та легшою тильною підкладкою: високоміцна сталь (Армох 500Т), 6 мм – полікарбонат, 30 мм – алюмінієвий сплав 7075-Т6, 8 мм (характеристики матеріалів подано в табл. 1).

Варіант К2. Це компоновка з керамічною лицьову обшивку, еластомерним буфером і сталеву підкладкою: оксидна кераміка Al_2O_3 , 8 мм – еластомер TPU, 16 мм – високоміцна сталь, 6 мм.

Варіант К3. Це легка сендвіч-панель з композитними обшивками та пінним ядром: склопластик GFRP, 8 мм – полімерне пінне ядро, 60 мм – склопластик GFRP, 8 мм (зауважимо, що у межах експрес-оцінки використано еквівалентно-ізотропні властивості GFRP і ядра).

Геометрія в плані для всіх варіантів конструкцій К1–К3 є фіксованою: $a = 1.5\text{ м}$, $b = 1.5\text{ м}$; на першому етапі дослідження імпульс навантаження змінювався у діапазоні $i_p = 800\dots2000\text{ Па}\cdot\text{с}$.

Таблиця 1. Характеристики матеріалів для конструювання шаруватих пластин

Матеріал (Позначення)	$E, ГПа$	ν	$\rho, кг/м^3$	$[\sigma], МПа$
Високоміцна сталь Армох 500Т (Steel)	210	0.30	7850	820
Алюмінієвий сплав 7075-Т6 (Al)	71	0.33	2810	420
Полікарбонат (PC)	2.3	0.37	1200	60
Оксидна кераміка Al_2O_3 (Ceramic)	300	0.22	3900	1500
Еластомер TPU (Elastomer)	0.02	0.49	1150	10
Склопластик (GFRP)	25	0.25	1900	360
Полімерне пінне ядро (Core)	0.12	0.30	120	5

На рис. 2 показано залежність максимального прогину шаруватої пластини від величини імпульсу. Для всіх трьох варіантів залежність є лінійною, що узгоджується з прийнятою короткоімпульсною схемою. Порівняння конструкцій у всьому діапазоні 800–2000 Па·с показує стабільний розподіл за жорсткістю чи інерційністю:

- K1 дає найменші прогини (приблизно від 11 мм при 800 Па·с до 28 мм при 2000 Па·с),
- K2 має проміжний рівень деформативності (13...33 мм),
- K3 демонструє найбільші прогини (21...53 мм), що є прогнозованим результатом для легкого сендвіча з малою поверхневою масою та піддатливим ядром.

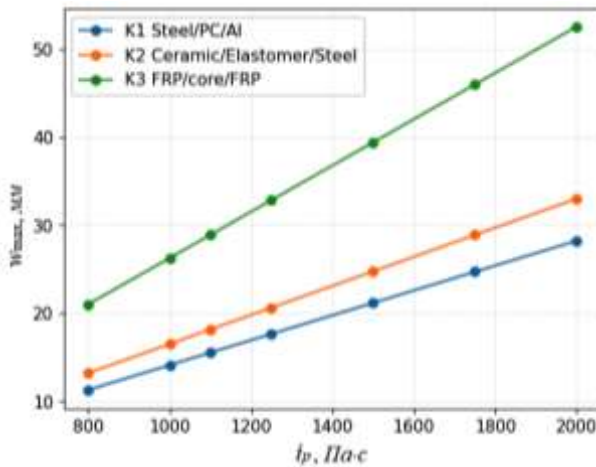


Рис. 2. Залежність максимального прогину шаруватої пластини від імпульсу вибухового навантаження

Рис. 3 демонструє залежність мінімального коефіцієнта запасу шаруватої пластини k_{ms} від імпульсу i_p . Зі зростанням i_p коефіцієнт запасу закономірно зменшується, а горизонтальна пунктирна лінія $k_{ms} = 1$ інтерпретується як поріг працездатності в експрес-оцінці. За графіком видно, що перетин із порогом відбувається в області імпульсу тиску $(1.1...1.3) \times 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$. При цьому:

- K2 досягає порогу трохи раніше за інших (найменший запас у заданій серії),
- K1 близький до порогу в тій самій зоні,

– К3 зберігає запас дещо довше (перетин ближче до верхньої межі цього інтервалу), хоча за прогинами цей варіант конструкції лишається найподатливішим.

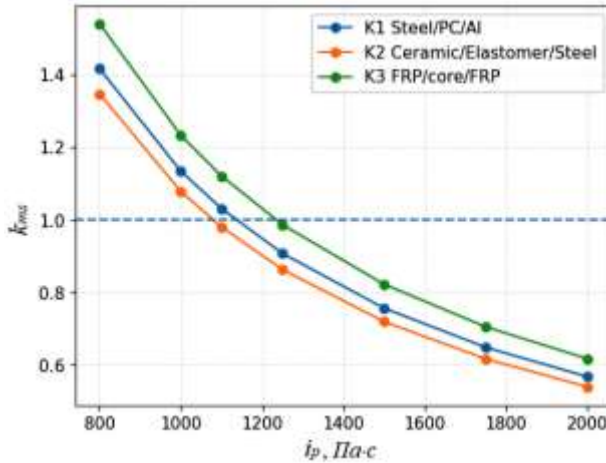


Рис. 3. Залежність мінімального коефіцієнта запасу шаруватої пластини від імпульсу вибухового навантаження

Таким чином, пара графіків рис. 2 та рис. 3 дає інженерно зручну оцінку, а саме жорсткість і деформативність (за w_{max}) та міцність і запас (за k_{ms}) у функції імпульсу, що є метою експрес-оцінки на ранній стадії проектування.

На рис. 4–5 подано результати параметричного аналізу для двох конструкцій захисних панелей К1 і К2 за фіксованих розмірів плити в плані та фіксованого (представницького) рівня імпульсного впливу. Як представницький прийнято імпульс тиску $1100 Pa \cdot s$, який лежить у середині робочого діапазону і робить порівняння максимально виразним.

Третю конструкцію К3 ми залишили лише на рис. 2–3 як репрезентативний приклад “легкого сендвіча”, щоб показати, як експрес-методика працює для іншого класу рішень із малою поверхневою масою та принципово іншою деформативністю. На рис. 4–5 варіант К3 не відображено, оскільки його масовий діапазон суттєво нижчий за К1–К2 і у спільному масштабі це призводить до поганої читабельності графіків.

У побудованих залежностях як керований параметр обрано товщину середнього, податливого шару – він є технологічно найпростішим регулятором на стадії ескізного підбору. Для конструкції К1 послідовно

збільшували товщину полікарбонатного ядра, при цьому поверхнева маса плити зростала від 91 до 120 кг/м². На цьому фоні максимальний прогин зменшувався більш ніж удвічі. Одночасно мінімальний коефіцієнт запасу за допустимими напруженнями зростає від значень трохи нижчих за одиницю до помітно більших за одиницю. Поріг запасу, рівний одиниці, досягається в околі поверхневої маси 100 кг/м².

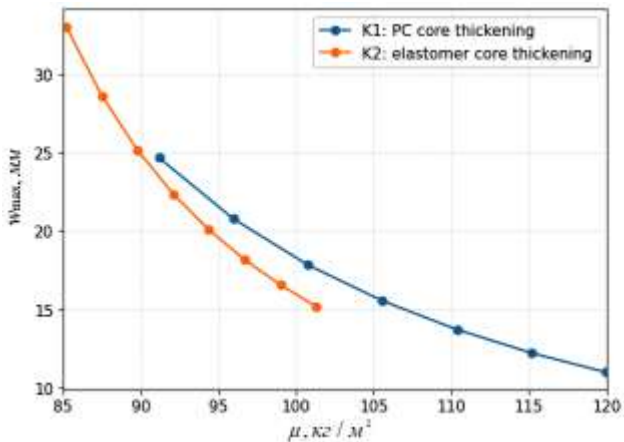


Рис. 4. Співвідношення поверхнева маса – максимальний прогин при збільшенні товщини середнього прошарку

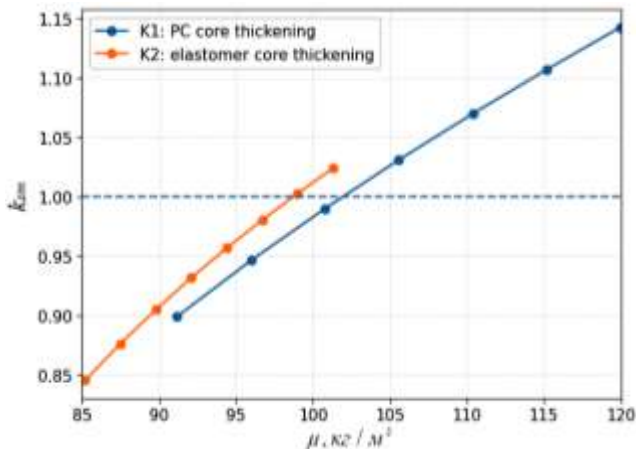


Рис. 5. Співвідношення поверхнева маса – мінімальний коефіцієнт запасу міцності при збільшенні товщини середнього прошарку

Аналогічну серію виконано для конструкції K2, де змінювали товщину еластомерного прошарку. У цьому випадку маса збільшувалася помірно, від 85 до 101 кг/м², однак ефект для деформативності також був виражений (максимальний прогин зменшувався від 33 до 15 мм). Коефіцієнт запасу при цьому зростає, а вихід у зону первинної працездатності досягається практично в тому самому інтервалі поверхневої маси – близько 100 кг/м².

Залежності на рис. 4–5 демонструють узгоджену тенденцію для обох конструкцій. Збільшення товщини середнього шару за відносно помірного приросту маси одночасно зменшує прогин і підвищує запас міцності.

На рис. 6 показано, як змінюється максимальний прогин плити залежно від поверхневої маси за умови потовщення саме лицьового шару, тоді як решта шарів у кожній конструкції залишаються незмінними. Для K1 збільшували товщину сталевий лицьовий обшивки від 4 до 11 мм, при цьому поверхнева маса зростає приблизно від 90 до 145 кг/м², а максимальний прогин зменшується з близько 19 до близько 11 мм. Для K2 товщину керамічної лицьовий обшивки змінювали в ширшому діапазоні – від 4 до 14 міліметрів, маса при цьому збільшується приблизно від 81 до 120 кг/м², а прогин знижується майже вдвічі – від 25 до близько 13 мм. Отже, потовщення лицьового шару є дієвим конструктивним прийомом зменшення деформативності, причому для керамічної обшивки ефект “жорсткість на одиницю приросту маси” проявляється особливо помітно в нижній частині масового діапазону.

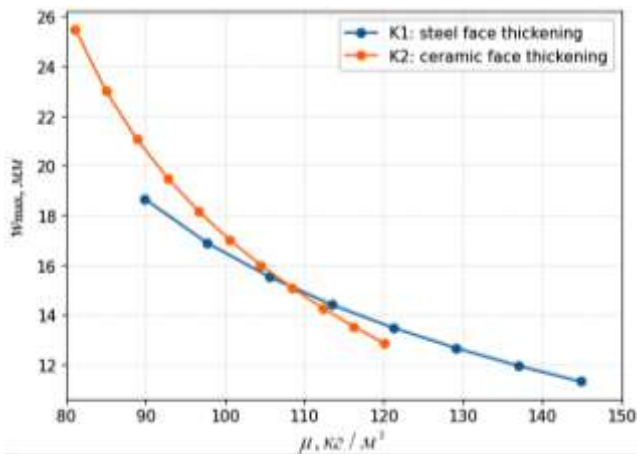


Рис. 6. Співвідношення “поверхнева маса – максимальний прогин” при збільшенні товщини лицьовий обшивки

Рис. 7 доповнює цей висновок, показуючи зміну мінімального коефіцієнта запасу міцності за допустимими напруженнями залежно від поверхневої маси при тому самому імпульсному навантаженні. Для K1 збільшення товщини сталевішої лицьовішої обшивки піднімає мінімальний запас від значень, близьких до одиниці, до впевнено більших за одиницю. Для K2 аналогічна тенденція спостерігається при потовщенні кераміки. У верхній частині діапазону, коли товщина керамічної обшивки досягає 11–14 міліметрів, криві K1 і K2 зближуються та перетинаються, що відображає близький рівень “первинної працездатності” за критерієм допустимих напружень за порівнянних значень поверхневої маси.

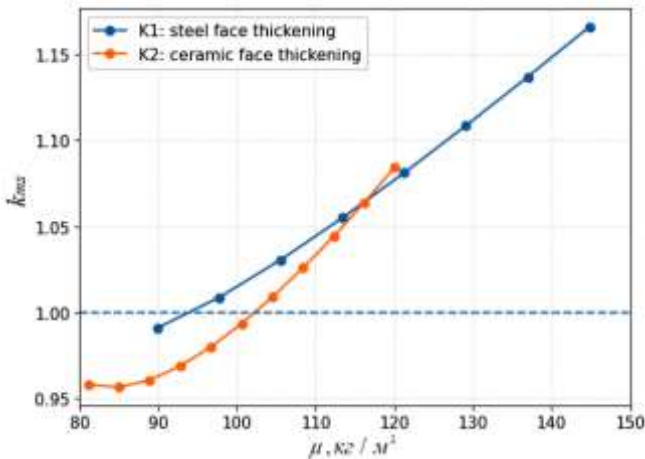


Рис. 7. Співвідношення “поверхнева маса – мінімальний коефіцієнт запасу міцності” при збільшенні товщини лицьовішої обшивки

У підсумку рис. 6–7 демонструють узгоджену картину: збільшення товщини лицьового шару одночасно зменшує прогини і підвищує запас міцності, а відносна ефективність такого підсилення визначається матеріалом лицьовішої обшивки та допустимим приростом маси конструкції.

Висновки

1. Запропоновано та апробовано інженерну експрес-методику первинної оцінки вибухостійкості шаруватих пластин для захисних облицювань і екранів, орієнтовану на ранню стадію проєктування. Методика забезпечує аналітичну оцінку динамічної відповіді на короткоімпульсний вплив і надає конструктору інструмент для первинного

підбору та швидкого порівняння варіантів без трудомісткого налаштування нелінійної скінченно-елементної моделі.

2. Показано, що максимальний прогин слід трактувати як інтегральний показник глобальної жорсткості та деформативності захисної системи при короткоімпульсному навантаженні. У практиці вибухозахисту придатність за прогином часто пов'язана з функціональною вимогою – наявним зазором до об'єкта захисту або допустимим рівнем переміщень. Надмірний прогин сигналізує про необхідність коригування архітектури шарів (товщин, матеріалів обшивок і їх розташування по товщині).

3. Для оцінки міцності в межах експрес-постановки використано максимальні нормальні напруження у шарах як характеристику небезпечного стану при згині. Порівняння цих напружень із допустимими значеннями для кожного матеріалу дає однозначний інженерний критерій первинної працездатності.

4. Запас міцності за допустимим напруженням більше одиниці означає прийнятний режим роботи шару, а значення, що дорівнює або менше одиниці, вказує на шар, який визначає потребу змінювати конструкцію. Узагальнену оцінку вибухостійкості шаруватої пластини доцільно приймати за мінімальним запасом серед шарів.

5. Практична цінність експрес-методики полягає у можливості швидкого параметричного аналізу, варіюючи товщини, матеріали, порядок шарів, геометрію плити та параметри імпульсу, інженер одразу отримує прогини, напруження, поверхневу масу та коефіцієнти запасу. Це дозволяє за короткий час відсіяти невдалі варіанти, сформувати раціональну компоновку шарів і підготувати обґрунтоване первинне конструктивне рішення.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Li Y., Ren X., Zhang X., Chen Y., Zhao T., Fang D. Deformation and failure modes of aluminum foam-cored sandwich plates under air-blast loading. *Composite Structures*. 2021. Vol. 258. P. 113317. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113317>
2. Ye N., Sun Z., Guo Q., Ma C., Shi Z. Experimental Investigation Concerning the Influence of Face Sheet Thickness on the Blast Resistance of Aluminum Foam Sandwich Structures Subjected to Localized Impulsive Loading. *Metals*. 2025. Vol. 15. P. 1122. <https://doi.org/10.3390/met15101122>
3. Tarlochan F. Sandwich Structures for Energy Absorption Applications: A Review. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 16. P. 4731. <https://doi.org/10.3390/ma14164731>
4. Jiang F. Blast response and multi-objective optimization of graded re-entrant circular auxetic cored sandwich panels. *Composite Structures*. 2023. Vol. 305. P. 116494. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116494>
5. Optimal design of composite sandwich panel with auxetic reentrant honeycomb using asymptotic equivalent model and PSO algorithm / P. Xiao et al. *Composite Structures*. 2024. Vol. 328. P. 117761. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117761>
6. Impulse saturation in metal plates under confined blasts / Y. Yuan et al. *International Journal of Impact Engineering*. 2022. P. 104308. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104308>
7. Chuanqing Chen, Yulong He, Rui Xu et al. Dynamic behaviors of sandwich panels with 3D-printed gradient auxetic cores subjected to blast load. *International Journal of Impact Engineering*. 2024. P. 104943. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104943>
8. Blast Resistance of Confined Multilayer Graded Corrugated-Core Sandwich Cylindrical Shells / P. Su et al. *Materials*. 2025. Vol. 19, no. 1. P. 101. <https://doi.org/10.3390/ma19010101>
9. Shats'kyi I. P. Limiting Equilibrium of a Plate with Partially Healed Crack. *Materials Science*. 2015. Vol. 51, no. 3. P. 322–330. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9845-5>
10. Perepichka V. V., Shats'kyi I. P. *Journal of Mathematical Sciences*. 2002. Vol. 109, no. 1. P. 1290–1294. <https://doi.org/10.1023/a:1013713215277>
11. Shats'kyi I. P., Makoviichuk M. V. Contact Interaction of the Crack Edges in the Case of Bending of a Plate with Elastic Support. *Materials Science*. 2003. 39. P. 371–376. <https://doi.org/10.1023/b:masc.0000010742.15838.44>
12. Andika S. P., Widagdo D., Pratomo A. N. Design and Multi-Objective Optimization of Auxetic Sandwich Panels for Blastworthy Structures Using Machine Learning Method. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 23. P. 10831. <https://doi.org/10.3390/app142310831>

13. Lam L., Chen W., Hao H., Li Z. Blast mitigation performance of sacrificial cladding with shear thickening fluid-filled origami metastructure core. *Engineering Structures*. 2025. Vol. 344. P. 121415. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121415>

14. Kostopoulos V., Kalimeris G. D., Giannaros E. Blast protection of steel reinforced concrete structures using composite foam-core sacrificial cladding. *Composites Science and Technology*. 2022. P. 109330. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109330>

15. Study on blast resistance and energy dissipation mechanism of reinforced concrete-polyurea composite slabs under long duration blast loading of thermobaric explosives / J. Liu et al. *Engineering Structures*. 2025. Vol. 345. P. 121440. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121440>

16. Rizwanullah M., Sharma H. K. Blast loading effects on UHPFRC structural elements: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2022. Vol. 7, no. 6. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00937-2>

17. Hongxiang Yang, Kaicong Kuang, Yaqin Lu et al. Research on the dynamic response of open-web girders in new floor structures under near-blast load based on the CEL method. *Structures*. 2024. Vol. 65. P. 106692. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106692>

18. EN 1990:2023. *Eurocode – Basis of structural and geotechnical design*.

19. EN 1991-1-7. *Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-7: Accidental actions*.

20. DooJin Jeon, KiTae Kim, Han S. Modified Equation of Shock Wave Parameters. *Computation*. 2017. Vol. 5, no. 3. 5030041. <https://doi.org/10.3390/computation5030041>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 09.03.2026	Received 09.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 09.03.2026	Received in revised form 09.03.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

A. S. Velychkovych

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2685-8753>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

A. V. Andrusiak*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

Y. V. Olevych

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5919-9945>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

*corresponding author, e-mail: andrii.andrusiak@nung.edu.ua

Rapid Assessment of the Blast Resistance of Laminated Plates for Protective Screens and Claddings

How to Cite:

Velychkovych A. S., Andrusiak A. V., Olevych Y. V. (2026). Rapid assessment of the blast resistance of laminated plates for protective screens and claddings. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 18-34. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-02)

Abstract. In construction and related engineering fields, there is a growing demand for protective screens and claddings capable of performing effectively under blast loading. This paper presents a rapid assessment method for evaluating the blast resistance of protective laminated plates intended for the design of such elements. The method targets the preliminary concept-selection stage, where alternative layouts must be compared quickly under constraints on areal mass and overall dimensions, and an initial design decision must be substantiated. The computational model is formulated within the linear Kirchhoff-Love plate theory, while the blast action is represented by an equivalent short-duration impulsive load whose generalized descriptor is an integral impulse measure. Preliminary structural performance is assessed using two indicators. The maximum deflection characterizes global compliance and is directly linked to functional requirements, in particular the allowable clearance to the protected object. The minimum safety factor with respect to allowable stresses identifies the critical layer and defines the direction for layout refinement. The method is presented as a step-by-step computational algorithm that enables variation of layer thicknesses, materials, and stacking sequence, producing results in an engineering-interpretable form. Key validation results are reported as a set of comparative and parametric calculations for three protective plate configurations, including a lightweight composite sandwich as an example of an alternative low-areal-mass solution class. For two widely used configurations—metal–polymer and ceramic–elastomer—relationships between “areal mass–deflection” and “areal mass–strength reserve” are obtained. It is shown that the thickness of the intermediate damping layer primarily governs deformability with a moderate mass increase, whereas increasing the face-sheet thickness rapidly enhances the strength reserve. The results confirm the suitability of rapid assessment as a tool for initial design decision-making and for preparing a justified baseline model for subsequent refinement in a finite-element framework.

Keywords: blast resistance, laminated plates, protective claddings, impulsive loading, Kirchhoff-Love theory, deflection, stresses, safety factor, areal mass.