

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

Кваліфікаційна магістерська робота

на тему: **ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ОГОРОДЖЕНЬ З
ПРОФІЛЬОВАНОГО ЛИСТА ПРИ ДІЇ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

Допустити до захисту

Завідувач кафедри БДМБ, к.т.н., професор

Владислав НАСТОЯЩИЙ

" ____ " _____ 2024 р.

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи, к.т.н., доцент

Микола ПАШИНСЬКИЙ

" ____ " _____ 2024 р.

Виконав студент спеціальності

192 – Будівництво та цивільна інженерія

Артем КОРЖЕНКО

" ____ " _____ 2024 р.

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Примітки
				Документація загальна		
				Знову розроблена		
				Анотація	1	
				Summary	1	
A4			KMP 2319218 ПЗ	Пояснювальна записка		
				Зміст	2	
				Вступ	3	
				Розділ 1 Методи урахування динамічних дій на конструкції	21	
				Розділ 2 Попередні дослідження роботи тонкого гофрованого металевого листа на динамічні навантаження	11	
				Розділ 3 Динамічний аналіз гофрованого металевого листа	13	
				Розділ 4 Вплив швидкості прикладення навантаження на роботу металевих пластин	11	
				Висновки за результатами досліджень	2	
				Conclusions results of research	2	
				Список використаних джерел	2	
				Додаток А Заходи з охорони праці при монтажі металевих конструкцій	11	
A4			KMP 2319218 ПР	Додаток Б Ілюстраційні матеріали (мультимедійна презентація)	21	
</						

АНОТАЦІЯ

Для ущільнення міської забудови огорожувальні конструкції будівель повинні відповідати підвищеним вимогам щодо сприйняття можливих аварійних навантажень, зокрема вибухів. З цією метою проведено дослідження динамічного опору вигину плоскої сталеві пластини, яка піддається осьовому стиску, за допомогою нелінійної моделі методу скінченних елементів у середовищі програми Abaqus CAE та порівняння отриманих результатів з наявними експериментальними даними з відкритих джерел.

У проведеному числовому аналізі врахована фізична та геометрична нелінійність роботи конструкції. Динамічна структурна реакція (навантаження, пластична деформація, остаточні деформації) сталеві пластини при різних швидкостях навантаження вивчалася на основі властивостей матеріалу із сталі з урахуванням та без урахування ефекту швидкості деформації. Використано модуль Abaqus implicit/explicit, у якому динамічне навантаження задається у вигляді примусового переміщення з дуже малими величинами приросту порівняно зі стандартним Abaqus. Встановлено, що динамічні ефекти найбільш точно моделюються при прикладенні навантаження з багатолінійним наростанням швидкості деформування. Порівняння отриманих результатів з даними експериментальних досліджень пластин під динамічним навантаженням підтвердило хорошу збіжність і показало, що при збільшенні швидкості прикладення навантаження несуча здатність пластин зростає приблизно на 20% при швидкості прикладення навантаження 1 мм/с і до 50% при 100 мм/с.

Характер розподілу зон текучості по поверхні пластини залежить від швидкості прикладення навантаження. З ростом швидкості прикладення навантаження змінюється форма та збільшується величина зон, у яких матеріал пластини переходить в пластичну стадію, зростає гранична несуча здатність пластини, а початок проявів динамічного зміцнення пластини зміщується у бік більших деформацій.

SUMMARY

To compact urban development, building envelopes must meet increased requirements for the perception of possible emergency loads, in particular explosions. For this purpose, a study of the dynamic bending resistance of a flat steel plate subjected to axial compression was carried out using a nonlinear finite element model in the Abaqus CAE program environment and the results were compared with available experimental data from open sources.

The numerical analysis took into account the physical and geometric nonlinearity of the structure. The dynamic structural response (load, plastic deformation, final deformations) of the steel plate at different loading rates was studied based on the material properties of steel with and without the effect of the strain rate. The Abaqus implicit/explicit module was used, in which the dynamic load is specified in the form of a forced displacement with very small increments compared to standard Abaqus. It was found that dynamic effects are most accurately modeled when applying a load with a multilinear increase in the deformation rate. Comparison of the obtained results with the data of experimental studies of plates under dynamic loading confirmed good convergence and showed that with an increase in the rate of load application, the bearing capacity of the plates increases by approximately 20% at a load application rate of 1 mm/s and up to 50% at 100 mm/s.

The nature of the distribution of yield zones on the surface of the plate depends on the rate of load application. With an increase in the rate of load application, the shape changes and the size of the zones in which the plate material passes into the plastic stage increases, the ultimate bearing capacity of the plate increases, and the beginning of the manifestations of dynamic strengthening of the plate shifts towards larger deformations.

З М І С Т

В С Т У П	3
Розділ 1	6
МЕТОДИ УРАХУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ДІЙ НА КОНСТРУКЦІЇ	6
1.1 Функції, типи та галузі застосування огорожувальних конструкцій	6
1.2 Вибухи та їх дія на конструкцію.....	7
1.3 Імпульсне навантаження, особливості його дії та подання.....	10
1.4 Енергетичний баланс ударного навантаження	13
1.5 Фактори, що впливають на реакцію конструкції при ударному навантаженні.....	17
1.6 Урахування впливу динамічних навантажень на конструкції	20
1.7 Висновки з огляду літератури та завдання досліджень.....	26
Розділ 2	27
ПОПЕРЕДНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТОНКОГО ГОФРОВАНОГО МЕТАЛЕВОГО ЛИСТА НА ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ	27
2.1 Орієнтація будівель та їх елементів.....	27
2.2 Відоме експериментальне дослідження сталевих пластини	27
2.3 Відомі чисельні дослідження сталевих пластин	30
2.4 Вихідні дані для аналітичного та чисельного аналізу	31
2.5 Створення моделі пластини в середовищі Abaqus CAE.....	34
2.6 Висновки з розділу.....	37

					<i>КМР 2319218 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Дослідження роботи огорожень з профільованого листа при дії ударних навантажень</i>	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розробив</i>		<i>Корженко А.О.</i>						
<i>Перевірів</i>		<i>Пащинський М.В.</i>					<i>1</i>	<i>69</i>
						<i>ЦНТУ гр. БІ-23М-1</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Дарієнко В.В</i>						
<i>Затвердив</i>		<i>Настоящий В.А</i>						

Розділ 3.....	38
ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ГОФРОВАНОГО МЕТАЛЕВОГО	
ЛИСТА.....	38
3.1 Динамічне моделювання.....	38
3.2 Порівняння зі статичним моделюванням.....	40
3.3 Динамічні дослідження роботи пластин.....	41
3.4 Висновки з розділу.....	50
Розділ 4.....	51
ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПРИКЛАДЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА	
РОБОТУ МЕТАЛЕВИХ ПЛАСТИН.....	51
4.1 Вплив швидкості деформації на окрему сталеву пластину.....	51
4.2 Дослідження швидкості деформації плоского пластинчастого елемента	55
4.6 Висновки з розділу.....	61
ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	62
CONCLUSIONS RESULTS OF RESEARCH	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66
Додаток А	68
ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ МОНТАЖІ МЕТАЛЕВИХ	
КОНСТРУКЦІЙ	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток Б. ІЛЮСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	79

ВСТУП

Актуальність теми. Ущільнення міської забудови призводить до зменшення вільної відстані між будівлями та транспортним маршрутом, що може вимагати підвищення вимог до будівельних конструкцій щодо сприйняття виняткових аварійних навантажень типу вибухів.

Динамічне навантаження від вибухів викликає навантажувальні ефекти в конструкціях, які можуть принципово відрізнятися від ефектів при дії статичного навантаження. У таких конструкціях здатність до поглинання енергії часто важливіша, ніж здатність витримувати великі статичні навантаження.

Ефективним і дешевим рішенням для сприйняття статичних навантажень на покрівлі та стіни є використання несучого гофрованого металевого листа, вкладеного на конструкції даху чи стінового фахверка. Слід урахувати, що гофрований металевий лист є міцним і жорстким, але не забезпечує здатність до деформації та поглинання енергії, а тому теоретично має низькі можливості протистояти цьому динамічному навантаженню від вибуху. Хоча сталь є пластичним матеріалом, теоретична несуча здатність профільованого настилу обмежена втратою стійкості його стиснутих полицок, що робить здатність профнастилу до деформації дуже обмеженою. Тому класичний підхід до розрахунку профільованого настилу може виявитися надто консервативним і недостовірним. Для безпечного використовувати даху на основі гофрованого листового металу при час дії вибухів необхідно детально дослідити роботу стиснутих полицок настилу при дії динамічних навантажень.

Мета дослідження: дослідити роботу плоских сталевих пластин, які є полицками профільованого настилу і визначають його несучу здатність при згині, під дією осьового навантаження стиску з різною швидкістю навантаження.

Основні задачі дослідження полягають у наступному:

1. Розробити технологію моделювання плоских сталевих пластин при дії динамічних навантажень стиску в площині пластини у середовищі програмного комплексу Abaqus CAE та шляхом порівняльних експериментів обрати оптимальні параметри моделі.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						3
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

2. Дослідити вплив різних матеріалів, геометричних параметрів та схем прикладення динамічного навантаження на роботу гладкої сталевий пластини при дії динамічного навантаження, прикладеного в формі примусового деформування з заданою швидкістю.
3. Порівняти результати виконаного моделювання з опублікованими даними експериментальних досліджень пластин під динамічним навантаженням.
4. Виявити, проаналізувати та описати якісно й чисельно ефект динамічного зміцнення пластин, а також початок проявів динамічного зміцнення, у вигляді залежності несучої здатності та деформативності досліджених пластин від швидкості прикладення навантаження.
5. Встановити характер розподілу зон текучості по поверхні пластини залежно від швидкості прикладення навантаження; виявити величина зон, у яких матеріал пластини переходить в пластичну стадію.

Об'єкт дослідження: напружено-деформований стан полицок сталевий профільованого настилу при дії динамічних навантажень стиску.

Предмет дослідження: несуча здатність і деформативність плоских сталевих пластин при дії динамічних навантажень з різною швидкістю дії.

Методи дослідження: моделювання сталевих пластин у середовищі програмного комплексу Abaqus CAE при дії динамічних навантажень, прикладених у вигляді примусової деформації із заданою швидкістю; порівняння з опублікованими результатами експериментальних досліджень таких пластин.

Наукова й технічна новизна результатів виконаних досліджень:

- 1) обґрунтована доцільність подання динамічного навантаження у вигляді примусового деформування пластини з багатолінійним наростанням швидкості деформування;
- 2) підтверджена наявність ефекту динамічного зміцнення пластин, який полягає в збільшенні несучої здатності при зростанні швидкості прикладення динамічного навантаження;

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						4
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

- 3) встановлена залежність початку проявів динамічного зміцнення, величини несучої здатності та деформативності досліджених пластин від швидкості прикладення навантаження;
- 4) виявлені розміри та форма зон текучості матеріалу, а також їх розподіл по поверхні пластини залежно від швидкості прикладення навантаження.

Практичне значення одержаних результатів:

- 1) розроблена технологія моделювання плоских сталевих пластин при дії динамічних навантажень стиску в площині пластини у середовищі програмного комплексу Abaqus CAE;
- 2) обрані оптимальні параметри моделі плоскої сталевий пластини, у тому числі характеристики матеріалу, геометричні параметри, крок сітки скінченних елементів та схеми прикладення динамічного навантаження;
- 3) достовірність отриманих результатів моделювання підтверджена збіжністю з відомими результатами експериментальних досліджень подібних пластин.

Апробація та публікація результатів роботи. Основні положення магістерської роботи були представлені на IV Всеукраїнській студентській науково-практичній конференції «Досвід впровадження у навчальний процес сучасних комп'ютерних технологій» (Кропивницький, листопад 2024 року) та опубліковані в тезах доповіді: А.О. Корженко, О.Д. Кочерженко, М.В. Пашинський. Аналіз напружено-деформованого стану профільованого листа при дії ударних навантажень. Кропивницький: ЦНТУ, 2024.

Структура роботи. Робота містить 78 сторінок (вступ, 4 розділи, висновки, один додаток), у тому числі 7 таблиць, 52 малюнки, список літератури з 14 використаних джерел, анотацію українською та англійською мовами, а також мультимедійну презентацію з 21 слайда.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						5
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Розділ 1

МЕТОДИ УРАХУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ДІЙ НА КОНСТРУКЦІЇ

1.1 Функції, типи та галузі застосування огорожувальних конструкцій

Огороджувальні конструкції будівель виконують ізоляційні та несучі функції, зокрема: захист від опадів та інших атмосферних впливів, теплова ізоляція, захист від шуму, сприйняття навантажень від ваги конструкцій, корисних навантажень на перекриття та кліматичних навантажень. В режимі нормальної експлуатації, тобто в стабільній чи перехідній розрахунковій ситуації, огорожувальні конструкції покриттів сприймають постійні навантаження та навантаження від обладнання, снігу та вітру. Огороджувальні конструкції стін можуть бути несучими, сприймаючи увесь комплекс навантажень на будівлю, або самонесучими чи навісними, сприймаючи навантаження від власної ваги та вітрового тиску. Особливим випадком є аварійна розрахункова ситуація, коли виникають навантаження від рідкісних позанормативних природних впливів (наприклад, землетрус), або від техногенних аварій, зокрема від вибухів промислової чи воєнної природи.

Найчастіше використовуються огорожувальні конструкції таких типів:

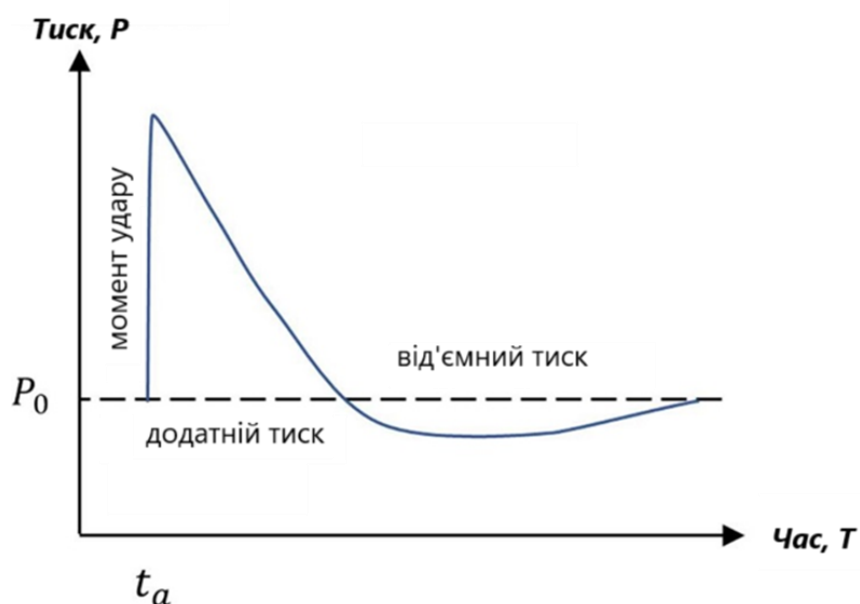
- цегляна чи кам'яна кладка – у стінах житлових і громадських будівель;
- бетонні й залізобетонні блоки чи несучі панелі – у стінах житлових, громадських та виробничих будівель;
- навісні залізобетонні плити й панелі – у стінах і покриттях житлових, громадських та виробничих будівель;
- монолітні залізобетонні плити – у покриттях житлових, громадських та виробничих будівель;
- сталевий профільований настил [1] і сандвіч-панелі різних типів – у стінах і покриттях житлових, громадських та виробничих будівель.

В усіх випадках перелічені огороження працюють як пластини, що сприймають навантаження у своїй площині (перевіряється критерій стійкості) та поперечні навантаження (перевіряються критерії міцності та жорсткості).

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						6
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

1.2 Вибухи та їх дія на конструкцію

Вибух – це раптовий викид енергії з відповідним обсягом розширення, що призводить до виділення світла й температури з дуже високим підвищенням тиску [2]. При вибуху в повітрі тиск поширюється сферично і зменшується зі збільшенням відстані, тому відстань є надзвичайно важливою, коли враховується вибухове навантаження та спосіб його сприйняття конструкцією. Час, за який тиск досягає об'єкта, називається часом прибуття, t_a . Ідеальний вибух складається з двох фаз, позитивної та негативної. Позитивна фаза – це коли тиск перевищує P_0 , який є звичайним атмосферним тиском або тиском навколишнього повітря. Через хвилю тиску повітря витісняється назовні, створюючи вакуум, і ця фаза називається негативною фазою, оскільки тут тиск нижчий, ніж P_0 , що показано на малюнку 1.1.



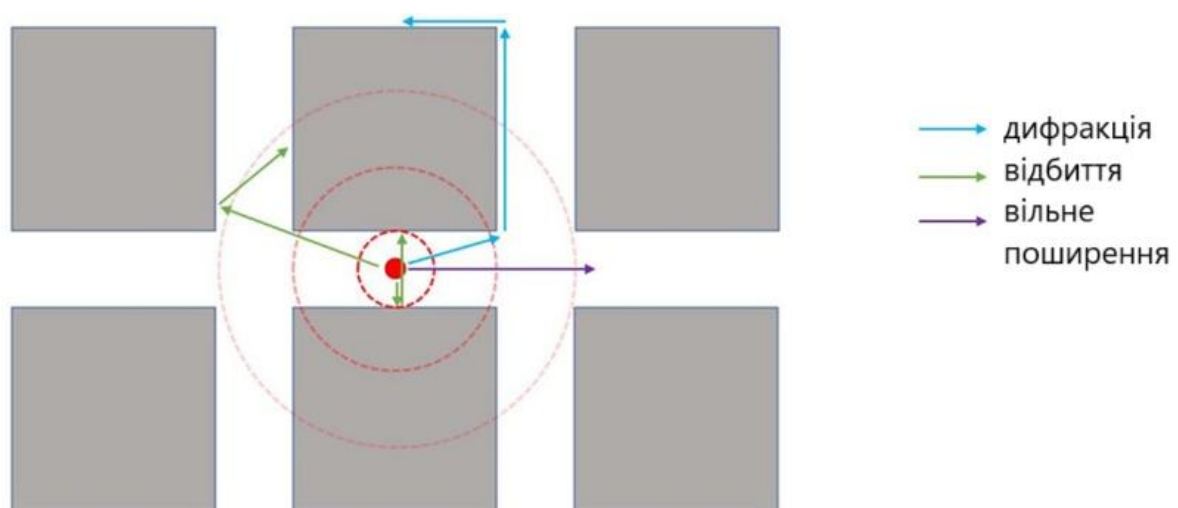
Малюнок 1.1. Схематичне співвідношення між тиском і часом з відображенням фаз позитивного та негативного тиску для ідеалізованої ударної хвилі. Графік на основі [2].

Існує два основні аспекти, які впливають на зовнішню енергію від певного вибуху, що діє на конструкцію: це відстань до джерела та масивність захисної конструкції [3]. Енергія хвилі, спричиненої вибухом, зменшується, коли відстань збільшується, оскільки збільшується об'єм, у якому передається енергія. Таким же чином маса впливає на енергію, необхідну для деформування конструкції. Для

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		7

більшої маси необхідна більша кількість енергії, а для меншої маси потрібна менша кількість енергії, тому ефект від вибуху того ж порядку в основному впливає на немасивні конструкції, а для більшої маси вплив від вибуху зменшується.

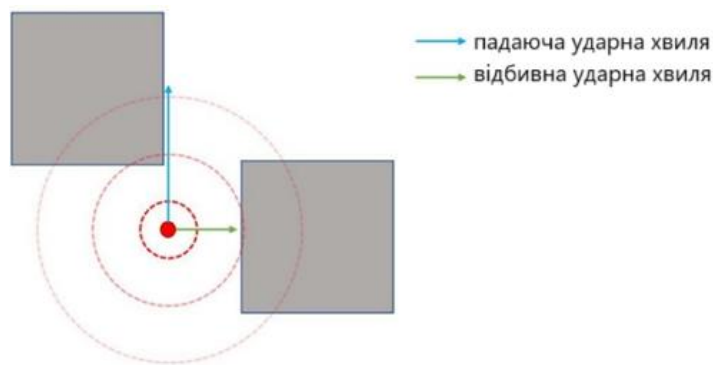
Кількість і тип вибухівки, відстань до цілі та геометричне оточення є важливими параметрами, які впливають на силу й тривалість вибуху [2]. Кількість і тип вибухової речовини визначають виділення енергії під час вибуху, а отриманий тиск є функцією енергії та об'єму. Як правило, тиск зменшується зі збільшенням відстані, а тривалість збільшується зі збільшенням відстані. Якщо хвиля не може вільно поширюватися, тиск не зменшуватиметься зі збільшенням відстані. На малюнках 1.2...1.4 схематично проілюстровано чотири явища, важливі для кінцевих вибухових навантажень: відображення, дзеркальне відображення, дифракція, обмеження.



Малюнок 1.2. Ілюстрація трьох концепцій, що впливають на величину та тривалість ударної хвилі [3].

При вивченні впливу типу несучої конструкції розглядаються два визначення тиску ударної хвилі. Це тиск, що відбивається, і непрямий тиск (або невідбиваючий тиск) [2]. Тиск, що відбивається – це тиск, який впливає на частину конструкції, спрямовану до місця вибуху. Непрямий тиск – це тиск, який впливає на частину конструкції, не звернену до місця вибуху, що наведено на малюнку 1.3.

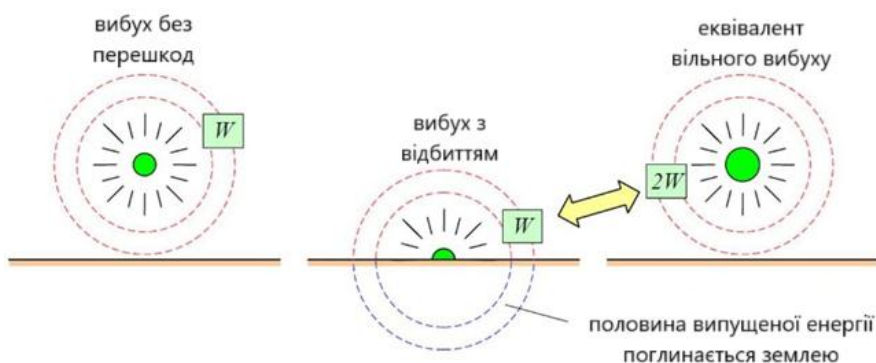
					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						8
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



Малюнок 1.3. Ілюстрація різниці між непрямою ударною хвилею та відбитою ударною хвилею. Малюнок на основі [3].

Концепція відбиття виникає, коли хвиля досягає поверхні, що відбиває її, і це явище має особливе значення, якщо розглядати вибухи в міському середовищі та вибухи поблизу будівель [4].

Друга концепція, тобто віддзеркалення, є типом відбиття, яке відбувається, коли вибух детонує близько до землі [4]. Це більш детально продемонстровано на малюнку 1.4. При досягненні дзеркальної поверхні механічна хвиля відбивається не в повному розмірі, замість цього відбувається деяка втрата енергії на землю чи поверхню конструкції.



Малюнок 1.4. Ілюстрація впливу дзеркального відбиття на силу та тривалість вибуху. Малюнок на основі [2].

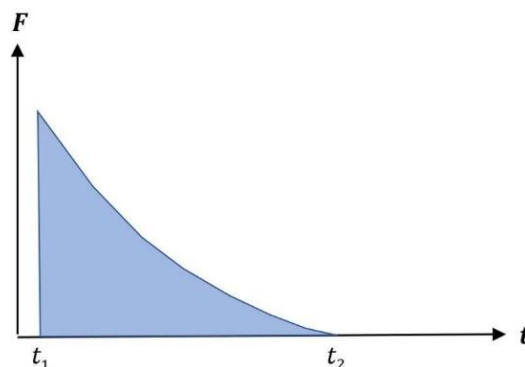
Дифракція описує, як вибухове навантаження рухається навколо кутів, і явище, яке виникає, коли вибухова хвиля блокується проміжним об'єктом. Тому вибух поширюється навколо кутів будівлі, щоб досягти точки з іншого боку [4], що продемонстровано на малюнку 1.2. Завдяки цьому змінюється напрямок поширення хвилі та збільшується відстань, на яку поширюється механічна хвиля.

Утримання вибухової хвилі від вибуху призводить до посилення впливу вибухової хвилі. Причина цього полягає в тому, що через утримання енергія вибухової хвилі не буде розсіюватися, як це буде відбуватися, коли утримання немає. Одним із прикладів цього є вибух на вулиці в міському районі з високими будинками по обидва боки вулиці, що показано на малюнку 1.2.

1.3 Імпульсне навантаження, особливості його дії та подання

Визначення імпульсного навантаження.

Імпульсне навантаження зазвичай є навантаженням із високим тиском і короткою тривалістю [2]. При ньому саме імпульс, а не сила, визначає реакцію ураженої структури. Імпульсне навантаження може бути різного роду: викликане вибухом або силою удару, отриманої при зіткненні двох цілей. Величина імпульсного навантаження дорівнює силі, помноженій на час, як показано на малюнку 1.5 і розраховано згідно рівняння (1.1).



Малюнок 1.5. Розвиток імпульсного навантаження в часі

Величина імпульсу I дорівнює площі під графіком сили-часу, тобто обчислюється за формулою:

$$I = \int_{t_2}^{t_1} F(t) dt, \quad (1.1)$$

де I – величина імпульсного навантаження,

$F(t)$ – сила в заданий момент часу,

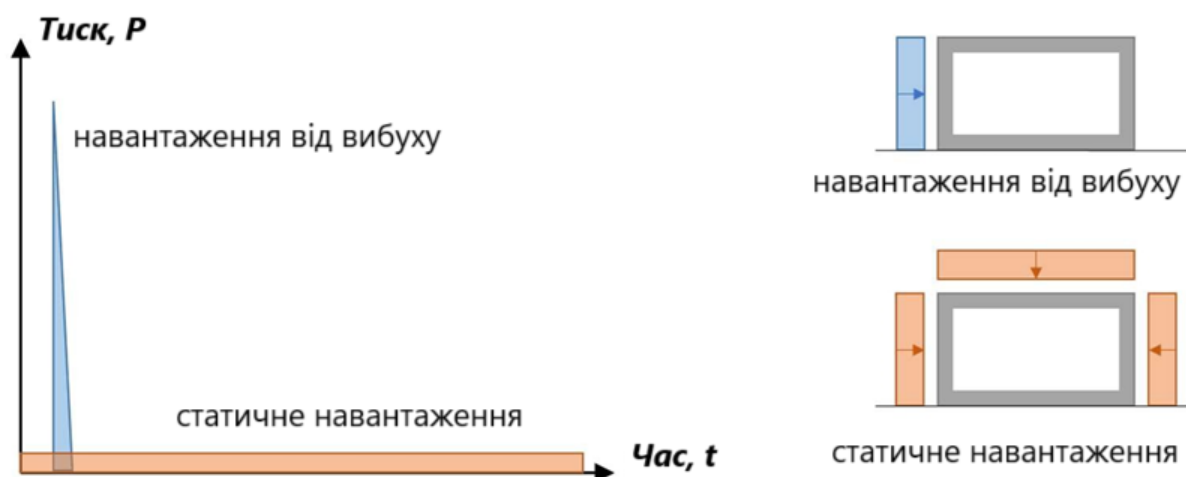
t_1 – час початку навантаження,

t_2 – час закінчення дії навантаження.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Різниця в статичному та імпульсному навантаженні.

Імпульсне навантаження має більшу швидкість, тоді як у статичного навантаження вона порівняно менша [3]. Конструкції зазвичай розраховані на те, щоб витримувати статичні навантаження, що діють протягом тривалого часу, але імпульсне навантаження буде впливати на конструкцію з високим тиском протягом короткого періоду часу. Тиск від імпульсного навантаження може бути значно вищим, ніж тиск від статичного навантаження, яке може витримати конструкція. У випадку статичного навантаження, нормально, коли конструкція витримує дане навантаження з обмеженою деформацією. У цьому випадку жорсткість і міцність важливі для виконання вимог першої і другої групи граничних станів. Для конструкцій з імпульсним навантаженням часто важливіше демонструвати хорошу здатність до деформації з можливістю високого енергоспоживання, ніж високу жорсткість і міцність. Схеми дії та розвитку в часі імпульсного й статичного навантаження показані на малюнку 1.6.



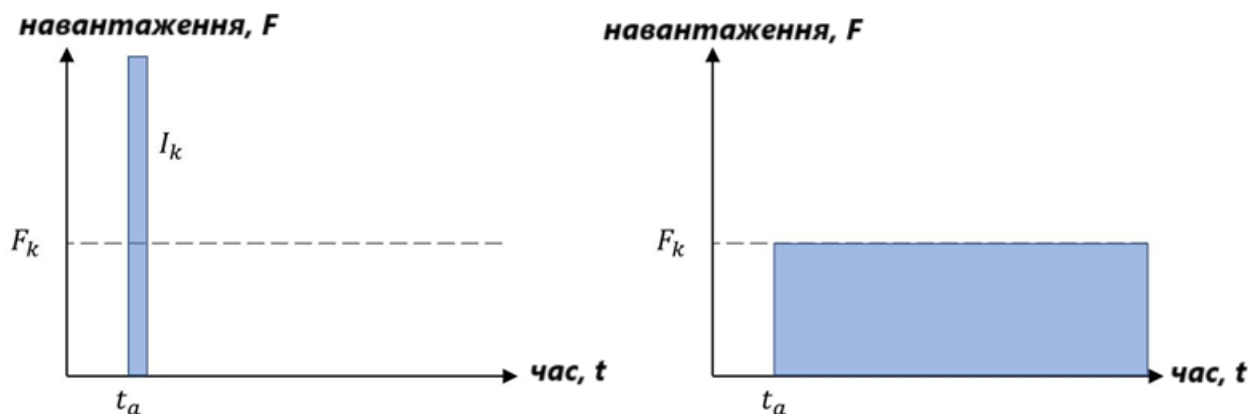
Малюнок 1.6. Вплив навантаження від вибуху та статичного навантаження з точки зору тиску та часу. Малюнок на основі [3].

На додаток до великої різниці величини імпульсного та статичного навантаження, тривалість дії імпульсного навантаження значно коротша, ніж тривалість дії постійного статичного навантаження. Це призводить до значної різниці в структурних реакціях через імпульсне та статичне навантаження, яку слід враховувати при проектуванні конструкцій.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		11

Характеристика імпульсного навантаження й навантаження від тиску

Відповідно до [3], характерне імпульсне навантаження має високу інтенсивність та дуже коротку тривалість (малюнок 1.7). Прикладом такого роду навантажень є навантаження з невеликою відстанню до джерела вибуху, а також слабкі конструкції з великою масою.



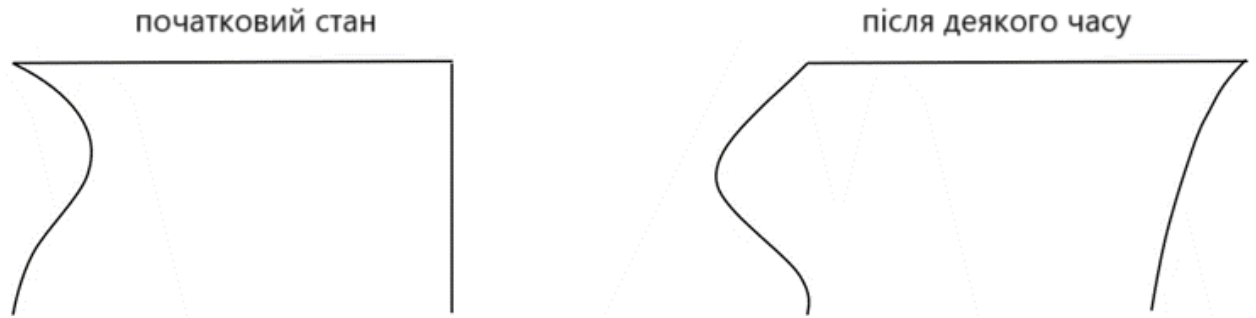
Малюнок 1.7. Співвідношення сила-час для імпульсного навантаження (ліворуч) і характеристичного тиску (праворуч). Малюнок на основі [3].

Відповідно до [3], характерне навантаження від тиску – це навантаження, яке прикладається до конструкції з низькою інтенсивністю та значною тривалістю (малюнок 1.7). Прикладом такого роду навантажень може бути вибух газу з невеликою інтенсивністю тиску. При цьому надлишковий тиск низький і тривалість його дії велика. Щоб виникло таке навантаження, конструкція повинна бути жорсткою і легкою. Прикладом такої конструкції може бути гофрований листовий метал.

Реакція конструкції, викликана ефектом поширення хвилі.

Будь-якій конструкції, на яку впливає зовнішнє навантаження, потрібен певний час, щоб передати це навантаження через матеріал [2]. Це явище називається ефектом розповсюдження хвилі, який може значно відрізнятися від реакції конструкції, отриманої при відповідному статичному навантаженні. Завдяки цьому ефекту граничні умови для конструкції можна розглядати як параметр, що залежить від часу на початковій фазі, і також існує ризик виникнення інших типів відмови протягом цього часу, наприклад, локальної

відмови. Малюнок 1.8 демонструє ефект, викликаний поширенням хвилі, що залежить від швидкості механічних хвиль в конструкції однопролітної рами [4].



Малюнок 1.8. Початкова реакція конструкції під дією імпульсного навантаження та через деякий час

Як показано на малюнку ліворуч, лише найближча область конструкції, що піддається імпульсному навантаженню, зазнає впливу на початковій фазі, тоді як решта конструкції залишається незмінною. Через деякий час решта конструкції також буде відчувати вплив імпульсного навантаження. Залежно від властивостей конструкцій, для впливу на глобальну структуру будівлі потрібен різний час. Ця фаза, показана на малюнку 1.8 праворуч, може реалізуватися приблизно через 50...100 мс. У цей час також можна побачити відскок верхньої частини лівої колони, яка була деформована на початковій фазі дії імпульсного навантаження.

1.4 Енергетичний баланс ударного навантаження

Цей розділ базується на [4], де автори посилаються на те, що зовнішня робота, яка переміщує тіло в просторі, або удар, який перетворює кінетичну енергію в потенційну енергію в тілі та імпульс, який базується на рівняннях (1.2) і (1.3), в результаті дає рівняння (1.4):

$$E_k = \frac{m \times v^2}{2}, \quad (1.2)$$

$$I_z = m \times v, \quad (1.3)$$

$$W_y = E_k = \frac{I_z^2}{2m}, \quad (1.4)$$

де E_k — кінетична енергія,

m — маса,

v — швидкість,

I_z — момент інерції відносно осі z ,

W_y — зовнішня робота.

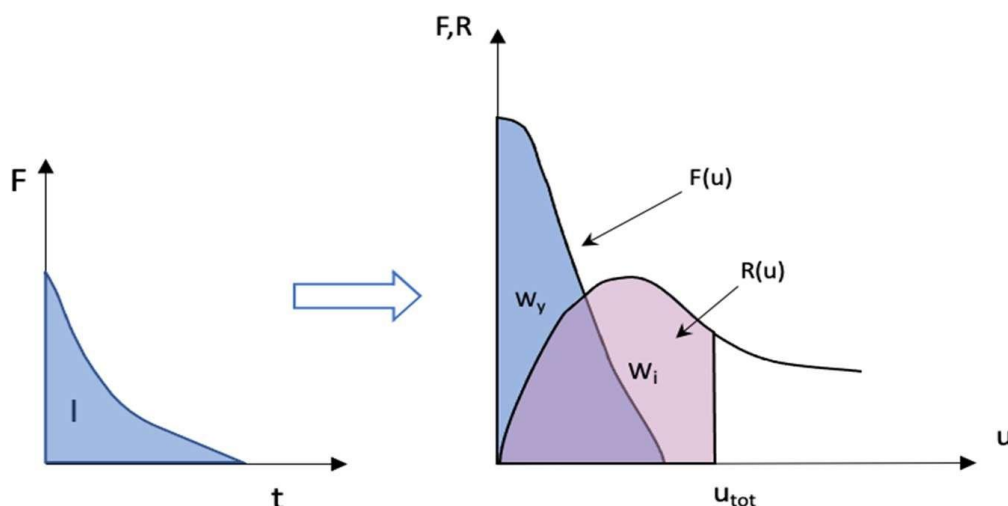
Геометрія конструкції та поведінка матеріалу залежать від внутрішньої роботи, яка виникає у відповідь на навантаження. Внутрішня робота — це енергія, поглинена конструкцією під час деформації, і визначається рівнянням (1.5), де $R(u)$ — сила опору.

$$W_i = \int_0^u R(u) du \quad (1.5)$$

де W_i — внутрішня робота конструкції,

$R(u)$ — енергія, що була поглинена при деформації u .

Щоб мати конструкцію, де існує рівновага, внутрішня і зовнішня робота повинні бути в рівновазі одна з одною. Рівняння балансу енергії між зовнішньою і внутрішньою роботою показано на малюнку 1.9.



Малюнок 1.9. Ілюстрація внутрішньої та зовнішньої роботи. Малюнок на основі [3].

Реакцію навантажених конструкцій та їх поведінку можна спростити, наприклад, подати їх у вигляді лінійно-пружної, ідеально-пластичної чи пружно-пластичної реакції, оскільки вони дають близьке наближення до фактичної реакції в різних структурах. Деформації для пружної та ідеально-пластичної поведінки можна задати рівнянням (1.6) і (1.7).

$$u_{el} = \frac{I_k}{\sqrt{km}} = \frac{I_k}{m\omega} \quad (1.6)$$

$$u_{pl} = \frac{I_k^2}{2m \times R_m}, \quad (1.7)$$

де u_{el} — пружна деформація,

u_{pl} — пластична деформація,

I_k — кінетичне імпульсне навантаження,

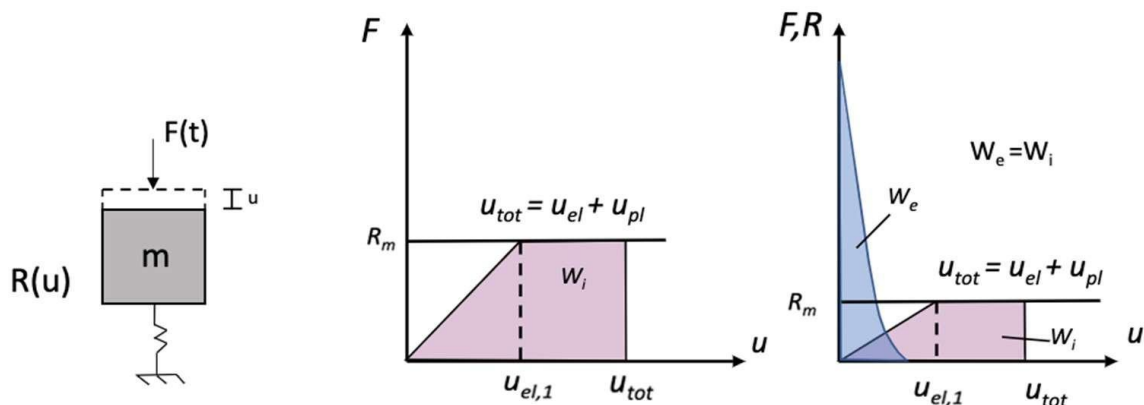
k — стала пружності,

R_m — навантажувальна здатність.

Крім того, ω — це кутова частота, яку можна обчислити за допомогою рівняння (1.8).

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.8)$$

Для пружнопластичної поведінки конструкція спочатку деформується від $u=0$ з пружною поведінкою, доки навантаження не досягне межі R_m . Це відбувається при $u_{el,1}$ і якщо навантаження більше або дорівнює цій межі, деформації будуть пластичними аж до моменту u_{tot} , що показано на малюнку 1.10.



Малюнок 1.10. Система з пружно-пластичною реакцією: зліва – система з одним ступенем свободи, посередині – співвідношення сила-переміщення, справа – співвідношення енергетичної рівноваги між зовнішньою та внутрішньою енергією. Малюнок на основі [3].

Внутрішню роботу для пружно-пластичної поведінки можна записати як:

$$W_i = \frac{R_m}{2} \times (u_{el,1} + 2u_{pl,1}), \quad (1.9)$$

де $u_{el,1}$ — це межа, при якій поведінка матеріалу переходить з пружної у пластичну стадію і визначається як:

$$u_{el,1} = \frac{R_m}{k}, \quad (1.10)$$

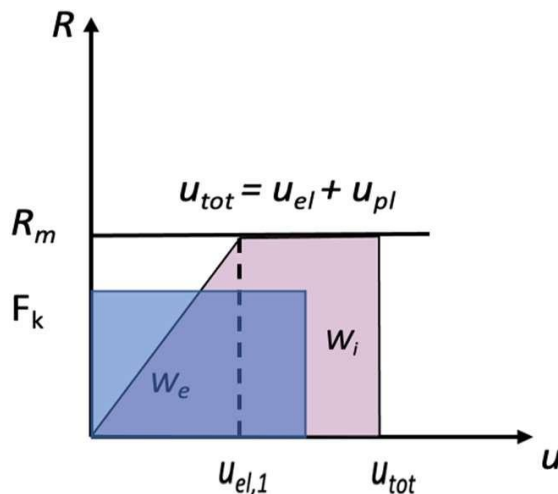
Об'єднавши рівняння (1.4) і (1.9), пластичну деформацію для пружно-пластичної поведінки $u_{pl,1}$ можна виразити у наступній формі:

$$u_{pl,1} = \frac{I_k^2}{2m \times R_m} - \frac{u_{el,1}}{2} = u_{pl} - \frac{u_{el,1}}{2}, \quad (1.11)$$

де u_{pl} — поведінка матеріалу для ідеальної пластичної реакції, загальна деформація визначається наступним рівнянням:

$$u_{tot} = u_{el,1} + u_{pl,1} = u_{pl} + \frac{u_{el,1}}{2}, \quad (1.12)$$

Якщо навантаження (малюнок 1.7) прикладене до конструкції з пружно-пластичними властивостями, пластичні деформації можуть бути досягнуті, навіть якщо величина навантаження нижча за межу відгуку, R_m . Це пов'язано з дотриманням робочої рівноваги та тим фактом, що залежність зовнішньої роботи від навантаження має прямокутну форму, тоді як епюра внутрішньої роботи в період пружних деформацій має трикутну форму, показану на малюнку 1.11.



Малюнок 1.11. Система з пружно-пластичною реакцією. Пластичні деформації утворюються, навіть якщо навантаження нижче межі відгуку через енергетичну рівновагу. Малюнок на основі [4].

1.5 Фактори, що впливають на реакцію конструкції при ударному навантаженні

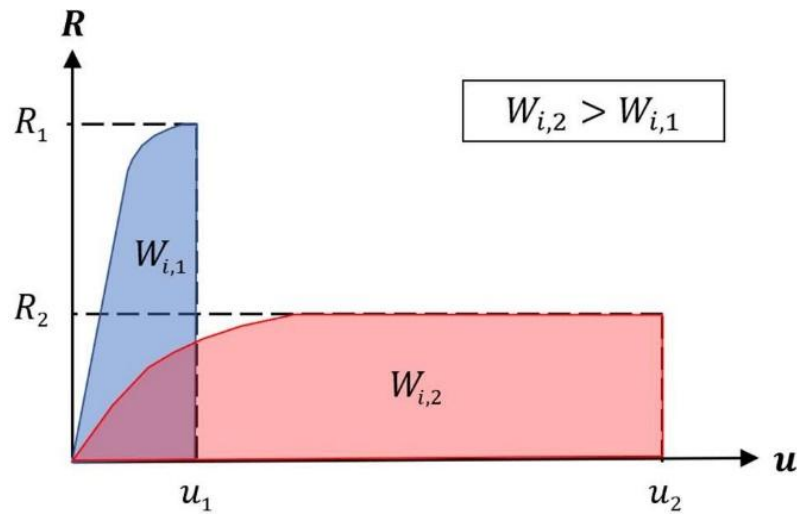
Ефект маси. Відповідно до [3], маса впливає на величину ефекту, що вноситься в структуру вибухом, див. рівняння (1.4). Причина цього полягає в тому, що кількість маси впливає на кількість енергії, необхідної для її руху. Чим більша маса, тим більше енергії потрібно для її руху. Це означає, що вплив вибуху на конструкцію залежить від її маси. Для того самого вибуху вплив на конструкцію буде зменшено, якщо збільшити масу.

Вплив жорсткості. Внутрішня робота конструкції базується на внутрішній силі, яка знаходиться всередині конструкції [3]. Залежно від матеріалу, який використовується, та форми конструкції, розмір і інтенсивність внутрішньої енергії змінюється. Загалом більш жорстка конструкція призводить до менших прогинів із високими зусиллями, а більш міцні конструкції призводять до більших деформацій і малих сил.

Жорсткість конструкції впливає на її здатність поглинати енергію та на те, як енергія накопичується в конструкції [3]. Конструкція, якій дозволено деформуватися більше, може поглинати енергію ефективніше, ніж конструкція, яка допускає лише невеликі деформації. Збільшення дозволеної деформації також означає, що структура має більшу здатність поширювати енергію всередині матеріалу.

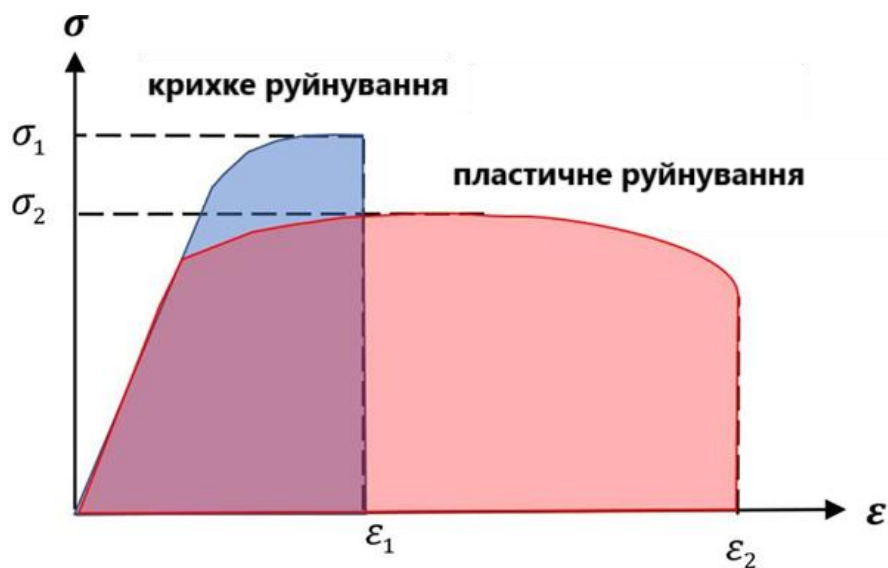
Вплив міцності. Загалом, реакція конструкції з високою жорсткістю визначається меншою деформацією та високою силою опору, тоді як для конструкцій з низькою жорсткістю правильним буде протилежне твердження (Johansson & Laine, 2012b). У випадку статичного навантаження корисно, коли конструкція має більшу жорсткість з більшою несучою здатністю, тоді як у випадку імпульсного навантаження добре мати конструкції з меншою жорсткістю, меншою несучою здатністю та більшою здатністю до деформації. На малюнку 1.12, синя область позначає конструкцію з вищою жорсткістю та міцністю, а червона область позначає більш гнучку конструкцію. Внутрішню роботу W_i можна розрахувати за допомогою рівняння (1.5).

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



Малюнок 1.12. Співвідношення сила-навантаження для двох різних типів конструкцій: синя область вказує на раціональну конструкцію для дії статичного навантаження, червона область є сприятливою для конструкції, що піддається імпульсному навантаженню. Малюнок на основі [3].

Ефект пластичної поведінки. Пластичність матеріалу впливає на поведінку сталевих конструкцій. Для різних матеріалів характерне як крихке, так і пластичне руйнування, що показано на малюнку 1.13. Сталь ідеально руйнується пластичним способом, коли внутрішні напруження перерозподіляються всередині матеріалу, що сповільнює загальне руйнування конструкції, і таким чином можна уникнути повного руйнування системи.



Малюнок 1.13. Співвідношення напруження-деформація для конструкцій з крихким і пластичним руйнуванням.

На реакцію пластини впливають властивості структури. У сталевих конструкціях може виникати вигин, і залежно від ризику локального вигину сталеві пластини вони поділяються на чотири різні класи поперечного перерізу, які умовно називаються класи 1, 2, 3 та 4, де четвертий клас має найвищий ризик відмови [5]. Подібна класифікація перерізів елементів за ступенем розвитку пластичних деформацій наведена в ДБН [6].

Виходячи з класу поперечного перерізу сталевих зразків, це впливає на пластичну поведінку [7]. Пластичність матеріалу впливає на співвідношення навантаження та переміщення сталі після лінійної пружної деформації. Одним з аспектів, що впливає на пластичність матеріалу, є клас поперечного перерізу сталі. Чим нижчий клас перерізу, тим менш пластична сталь. Це означає, що якщо елемент належить до класу поперечного перерізу 3 або 4, пластичність низька, і ці елементи, як правило, не можна проєктувати з використанням пластичної поведінки. Якщо сталь має низьку пластичність, здатність сталевих конструкцій розсіювати енергію знижується.

Ефект інерції. Ефект інерції полягає в тому, що чим більша маса об'єкта, тим більша його схильність чинити опір змінам у рухомому стані. Ефекти інерції можуть мати вплив у разі швидкого прикладення навантаження, наприклад, через удар або під час дії навантаження від вибуху [8]. Через ефекти інерції та явища поширення хвилі напруження в конструкціях під час ударного навантаження розподіл деформації або «картина» деформації в будь-який момент часу будуть неоднорідними. Вважається, що коли швидкість деформації перевищує $0,1 \text{ с}^{-1}$, ефекти інерції виявляють більший вплив.

Еквівалентне статичне навантаження. Використання еквівалентного статичного навантаження – це спосіб замінити в розрахунках дію динамічного навантаження статичною дією, що спрощує проєктування для більшості інженерів. Еквівалентне статичне навантаження зазвичай використовується для динамічних навантажень, таких як вибухи та удари. Використання еквівалентного статичного навантаження дозволяє використати спрощений розрахунок на динамічне навантаження. Відповідно до [3], еквівалентне статичне навантаження

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

можна визначити як «статичне навантаження, яке виконує ту саму роботу, що й динамічне навантаження». Якщо досліджуваний варіант навантаження дає лінійну пружну реакцію, розрахована максимальна деформація при дії еквівалентного статичного навантаження буде такою самою, як від фактичного імпульсного навантаження. При цьому максимальна потенціальна енергія статичного навантаження повинна дорівнювати максимальній потенціальній енергії динамічного навантаження.

Величина еквівалентного статичного навантаження залежить не тільки від характеристик діючого динамічного навантаження, але й від характеристик конструкції, що піддається цьому навантаженню. Характеристики включають тип навантаження, максимальне значення, тривалість навантаження та імпульсний вплив тіла, яке вдаряється в конструкцію. Імпульсний вплив залежить від маси, жорсткості та міцності конструкції та опори. Дуже важливо враховувати, що як правило, неможливо визначити еквівалентне статичне навантаження лише на основі динамічного навантаження без урахування характеристик конструкції, яка це навантаження сприймає.

При визначенні статичних розмірів слід враховувати можливий відскок конструкції, і проєктувальник також повинен мати інформацію про конструкцію, на яку прикладено динамічне навантаження, щоб мати можливість знати, яке еквівалентне статичне навантаження використовувати.

1.6 Урахування впливу динамічних навантажень на конструкції

Способи урахування швидкості деформації в середовищі Abaqus CAE.

Швидкість деформації є одним з аспектів, який суттєво впливає на механічні властивості матеріалу. Тому цей параметр, важливо враховувати з огляду на поведінку сталевих конструкцій, що працюють на згин і на які діють швидкі динамічні навантаження [8]. Швидкість деформації або швидкість навантаження $\dot{\epsilon}$ можна розрахувати на основі початкової швидкості V_0 і середнього переміщення δ , див. рівняння (1.13).

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_0}{\delta} \quad (1.13)$$

Існують різні методи опису ефекту швидкості деформації матеріалу, і одним із них є рівняння Каупера Саймонда. Ефект швидкості деформації можна включити в модель за допомогою трьох методів у Abaqus CAE, де нелінійність матеріалу можна задати за допомогою співвідношення деформації й напруження.

Динамічну межу текучості σ_{yd} матеріалу можна досліджувати за допомогою степеневого закону, також відомого як рівняння Каупера-Саймондса [9]. Рівняння степеневого закону має наступний вигляд:

$$\sigma_{yd} = \sigma_y \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{1/q}}{D} \right) \right), \quad (1.14)$$

де σ_y – межа текучості, а параметри швидкості деформації D і q – це значення, які можна розрахувати за допомогою рівнянь (1.15) і (1.16), які враховують межу текучості f_y матеріалу. Параметри D і q дорівнюють:

$$D = 1000 \left(\frac{f_y}{235} \right)^{3.8} \quad (1.15)$$

$$q = 5 \left(\frac{f_y}{235} \right)^{-0.5} \quad (1.16)$$

Ще одним методом, який можна використовувати в Abaqus CAE для включення в модель ефекту швидкості деформації є коефіцієнт текучості. При використанні цього методу коефіцієнт динамічного збільшення та пластична деформація розраховуються вручну та задаються користувачем безпосередньо для різної швидкості деформації.

Також іноді доцільним є використання метода Джонсона-Кука. Він полягає в тому, що до моделі можна додати ефект швидкості деформації. Цей метод придатний тільки для високошвидкісної деформації металів. Він називається «модель динамічної відмови Джонсона-Кука». Це рекомендований підхід для прогресуючого пошкодження та руйнування матеріалів. Метод базується на значенні еквівалентної пластичної деформації точок інтеграції елементів, і передбачається, що відмова виникає, коли параметр пошкодження досягає 1.

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{EKP} \left(\frac{1}{C} - (R - 1) \right), \quad (1.17)$$

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

де ε_{pl} – пластична деформація, ε – деформація, а параметри R і C – константи матеріалу. Однак цей метод не використовується тут для подальшого вивчення ефекту швидкості деформації, оскільки крива деформації-напруження досить гладка порівняно з фактичною кривою.

Критичне динамічне навантаження. На основі попередніх досліджень видно, що існує певна різниця між вигинанням у динамічному та статичному випадку [10]. Динамічна поведінка того, як на сталеву пластину впливає імпульсне навантаження в площині, залежить від величини інтенсивності імпульсу, амплітуди та тривалості навантаження.

Відповідно до [10], динамічне критичне навантаження - це амплітуда імпульсної сили, яка викликає динамічний вигин сталевієї пластини. На це навантаження впливає ступінь початкових дефектів. Навантаження збільшується, коли початкові дефекти зменшуються. Визначити динамічне критичне навантаження можна на основі одного з існуючих критеріїв. Трьома найпопулярнішими критеріями для використання є критерії Волміра, Будянського та Хатчінсона, а також критерій Петрі-Фальбуша [11]. Як ці три різні критерії визначаються та чим вони відрізняються, описано нижче.

Критерій Волміра заснований на роботі, в якій він розглядав, як поводить ся прямокутна пластина з простою опорою, коли вона піддається різним імпульсним навантаженням [11]. У своїй роботі Вольмір досліджував імпульс нескінченної і кінцевої тривалості. Тип імпульсів, які він взяв до уваги, мав прямокутну та експоненціально спадаючу форму. Метод Бубнова-Гальоркіна використовувався для розв'язання задачі динамічного прогину та розв'язання стану прогину та стану після прогину статично навантажених конструкцій. Волмір створив взаємозв'язок, де він аналізував навантаження та відхилення у часі, завдяки цьому він отримав рівняння руху, які розв'язуються за допомогою чисельного методу. Під час аналізу враховувалися як імпульси навантаження на розтяг, так і тип зсуву. На основі отриманих результатів інший дослідник, Кубайк представив метод розрахунку критичного динамічного навантаження, який простий у використанні, але займає багато часу.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

При використанні цього методу припускається, що виникає режим вигину та розраховується динамічний відгук [11]. Для кожного критичного режиму було визначено коефіцієнт динамічного навантаження (КДН), який визначався як відношення динамічного навантаження на прогинання N_{dyn} , поділеного на критичне статичне навантаження N_{stat} , див. рівняння (1.18).

$$\text{КДН} = \frac{N_{\text{дин}}}{N_{\text{стат}}} \quad (1.18)$$

Ґрунтуючись на результатах, які побачив Волмір, ним було сформульовано критерій динамічної втрати стійкості, де автор припустив, що втрата стійкості пластини при дії імпульсного навантаження реалізується тоді, коли максимальний прогин досягає тієї ж величини, що й певне постійне значення.

Критерій Будянського та Хатчінсона є одним із перших сформульованих критеріїв зміщення, який включає в себе як ефект від геометричних дефектів, так і нестабільну рівновагу після прогину. У роботі науковці досліджували циліндричну оболонку та стрижні, які були навантажені по осі. Тип імпульсного навантаження, який розглядався в дослідженні, мав як кінцеву, так і нескінченну тривалість. Потім вони вивели співвідношення, яке дозволило їм визначити критичне навантаження, яке відповідало точці перегину, дивлячись на зв'язок між навантаженням і прогином (малюнок 1.14). На основі результатів дослідники визначили наступну залежність: втрата стійкості конструкцій, що піддаються імпульсному навантаженню, відбувається, коли відбувається необмежене збільшення прогину при малих приростах навантаження.



Малюнок 1.14. Співвідношення навантаження-прогину, де точку динамічного навантаження на прогин можна побачити як для великих (ліворуч), так і для малих (праворуч) початкових недоліків.

Крім того, Петрі та Фальбуш визначають динамічний критерій руйнування, який дійсний для лінійно-пружних – ідеально пластичних матеріалів [10]. У критерії сказано, що динамічний відгук для ізотропної пластини є динамічно стабільним, якщо наступні умови протягом усього часу виконуються для всіх місць у конструкції. Ефективне напруження σ_{eff} має бути рівним або меншим за граничне напруження σ_L . На основі цього критерію можна розрахувати динамічне навантаження на відмову, використовуючи рівняння (1.19) або (1.20). Якщо розглядати динамічний критерій відмови, то на нього сильно впливають дані стосовно матеріалу та застосованого критерію відмови.

$$КДН_{cr} = \frac{N_{fcr}^{dyn}}{N_{fcr}^{stat}} \quad (1.19)$$

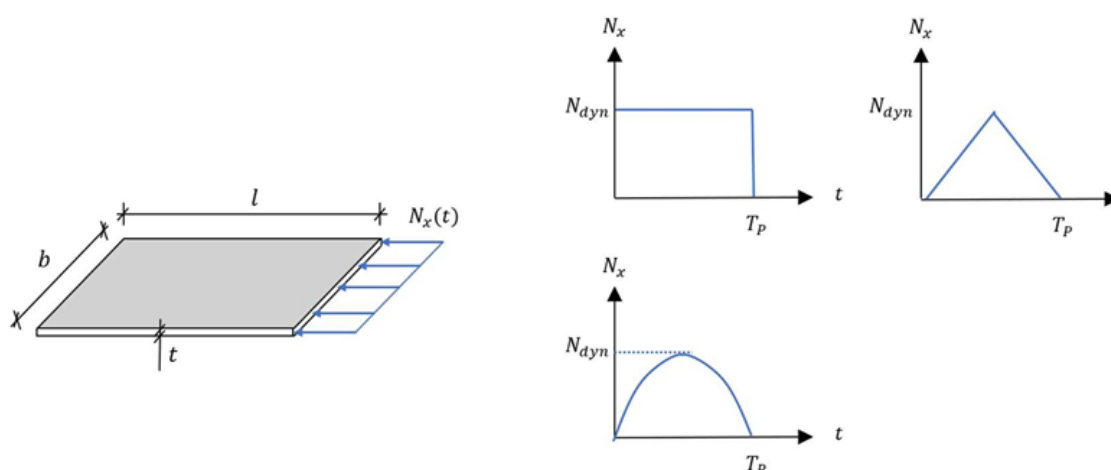
$$КДН_f = \frac{N_{fcr}^{dyn}}{N_{fcr}^{stat}} \quad (1.20)$$

Де N_{fcr}^{dyn} – динамічне навантаження на відмову,

N_{fcr}^{stat} – статичне навантаження на відмову.

Параметри, що впливають на динамічну реакцію сталевих пластин.

Геометричні недосконалості, форма й тривалість імпульсного навантаження є факторами, які сильно впливають на динамічну поведінку сталевих пластин [10]. Результати дослідження пластини, на яку діє осьове імпульсне навантаження, наведені на малюнку 1.15.



Малюнок 1.15. Геометрія пластини та навантаження пластини відповідними формами імпульсного навантаження.

Вплив форми імпульсу досліджували в припущенні про однакову амплітуду за постійного часу тривалості для різних імпульсів, і тоді прямокутний імпульс завжди викликає найбільші відхилення. Якщо дивитися на імпульси короткої тривалості, відхилення, викликані прямокутним навантаженням, зростають швидше, але для часу тривалості, що дорівнює періоду власних коливань, більші відхилення відповідають синусоїдальному імпульсу.

Динамічний вигин. Коли конструкція піддається динамічному навантаженню, може виникнути динамічний вигин [11]. Як і коли відбудеться це явище, залежить від так званої інтенсивності імпульсу, тривалості та амплітуди імпульсного навантаження. Якщо навантаження має дуже коротку тривалість у поєднанні з великою амплітудою, спостерігається явище удару. Якщо натомість розглядати випадок, коли час тривалості відповідає періоду часу природних коливань і де амплітуда навантаження має середню величину, тоді відбувається динамічний згин. Крім того, якщо дивитися на ту саму величину амплітуди навантаження, але тривалість має довгий період, то це квазістатичне навантаження. Якщо порівнювати статичне навантаження на згин з динамічним критичним навантаженням для короткої тривалості імпульсу, то динамічне критичне навантаження може бути вищим за величиною, ніж статичне навантаження на згин.

В роботі [11] автор зазначає, що, дивлячись на динамічне критичне навантаження в пружному діапазоні, ефектом демпфування можна знехтувати через розмір відгуку, який буде меншим за 1%.

Він також підкреслює, що оскільки динамічна втрата стійкості виникає лише для конструкції з початковими дефектами, динамічного біфуркаційного навантаження не існує. Натомість, коли дивитися на конструкцію без геометричних дефектів (ідеальна конструкція), критичне динамічне навантаження на вигин прямує до нескінченності. Це явище можна розглядати в розрізі посилення дефектів у результаті дії динамічних навантажень. Дія динамічного згину збільшує ефект, який спричиняє початковий дефект.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

1.7 Висновки з огляду літератури та завдання досліджень

Викладені результати бібліографічного огляду питань роботи конструкцій при дії ударних динамічних навантажень дозволяють зробити такі **висновки**:

1. Огородження дахів і стін можуть сприймати навантаження від ваги конструкцій та обладнання, снігу та вітру, які діють у площині стіни чи в перпендикулярному напрямку. Одним з небезпечних і непередбачуваних аварійних навантажень може буди дія ударної хвилі від вибуху.
2. Вибухи створюють ударну хвилю, яка може поширюватися в радіальних напрямках, відбиватися від наявних будівель, а також проникати вглиб забудови уздовж вулиць. Інтенсивність дії ударної хвилі зменшується при збільшенні відстані від епіцентру вибуху.
3. Величина ударного навантаження характеризується величиною імпульсу, який дорівнює добутку інтенсивності навантаження на тривалість його дії. Реакція конструкції на ударне навантаження розтягується в часі та залежить не лише від величини самого навантаження, але й від характеристик конструкції, яка його сприймає. Якщо статичні навантаження краще сприймає міцна й жорстка конструкція, то при дії ударних навантажень краще працюють податливі, не надто жорсткі конструкції з великою масою.
4. На величину навантажувального ефекту від ударного навантаження впливає маса, інерційність, жорсткість, міцність та пластичні характеристики конструкції. В практичних розрахунках може використовуватися еквівалентне статичне навантаження, величина якого встановлюється з умов рівності зовнішньої енергії навантаження та внутрішньої енергії конструкції.
5. На основі методу скінченних елементів розроблені й реалізовані в програмно-розрахункових комплексах методи оцінювання несучої здатності та стійкості різних конструкцій, у тому числі пластин при навантаженні в їх площині та в перпендикулярному напрямку.
6. Наявні теоретичні обґрунтування та розроблені програмні комплекси дозволяють проаналізувати роботу огорожень зі сталевго профільованого листа при дії ударних навантажень, спричинених вибухами.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Розділ 2

ПОПЕРЕДНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТОНКОГО ГОФРОВАНОГО МЕТАЛЕВОГО ЛИСТА НА ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ

2.1 Орієнтація будівель та їх елементів

У минулому було проведено кілька досліджень, наприклад [8, 9], пов'язаних з роботою плит під ударним навантаженням. Більшість експериментів з плитами, ураженими вибухом, проводилися таким чином, що пластина піддається вибуховому навантаженню поперечно. У дослідженнях вивчалися різні геометрії, щоб побачити вплив вибуху на профлисти. Основними параметрами, за якими аналізувався вплив вибуху, були гнучкість пластини, відстань до місця вибуху, а також те, чи є пластини жорсткими чи нежорсткими. Були вивчені різні геометрії ребер жорсткості (горизонтальні, поперечні, круглі тощо) та різна кількість ребер жорсткості.

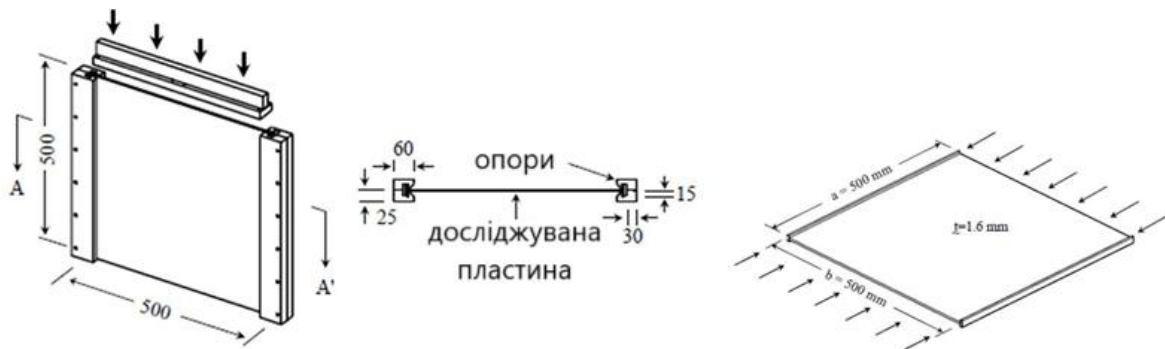
Розгляд попередніх досліджень такого типу показав, що використовувалося програмне забезпечення Abaqus CAE, наприклад у роботі [9]. Також видно, що в більшості випадків при моделюванні плити використовуються оболонкові скінченні елементи.

2.2 Відоме експериментальне дослідження сталевієї пластини

Було проведено одне експериментальне дослідження, коли корабельна плита навантажувалася осьовим динамічним навантаженням [12]. У цьому дослідженні динамічна межа міцності плити на стиск встановлена шляхом прикладення осьового навантаження на стиск з різними рівнями навантаження.

Випробувану пластину підтримували вздовж усіх сторін, щоб зберегти рівні краї. Навантаження на стиск створювали за допомогою гідравлічної динамічної випробувальної машини потужністю 100 кН. Випробувальна установка показана на малюнку 2.1, а властивості матеріалу випробного зразка наведені в таблиці 2.1.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



Малюнок 2.1. Випробувальна установка, геометрія випробуваного зразка та схема навантаження за [12].

Таблиця 2.1

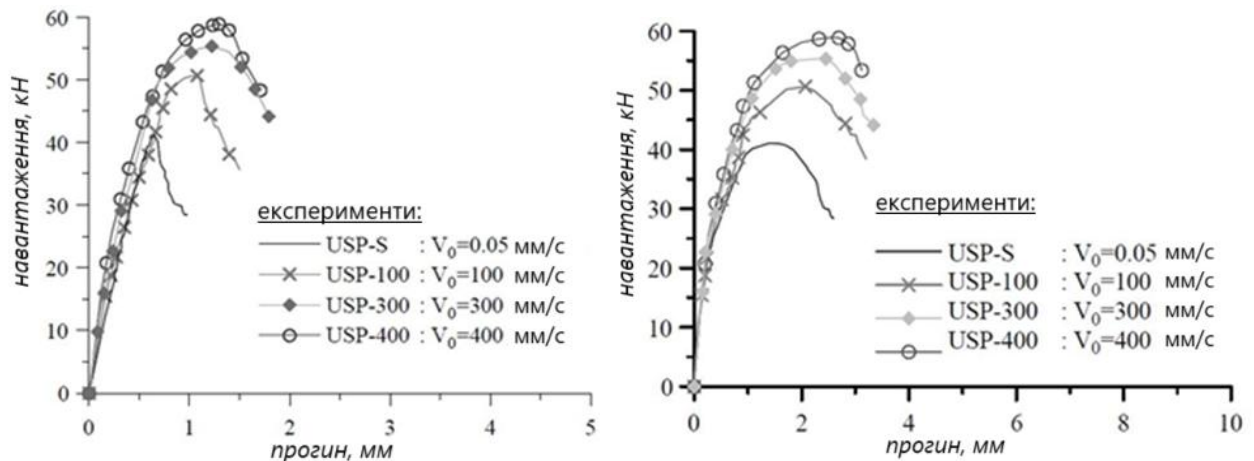
Властивості матеріалу досліджуваного зразка

Межа текучості, σ_y [МПа]	252
Граничне напруження на розтяг, σ_T [МПа]	360
Модуль Юнга, E [ГПа]	198
Деформація [%]	39.5

Швидкість прикладеного навантаження контролювалася персональним комп'ютером та підтримувалася постійною протягом кожного періоду випробування. Під час проведення випробувань комп'ютер документував переміщення в площині та відхилення поза площиною для кожного кроку часу. Експериментальні дослідження проводили для варіювання швидкостей навантаження v_0 в діапазоні від 0,05 мм/с до 400 мм/с. Випробування тривало до досягнення граничної міцності плити та деякий час після цього.

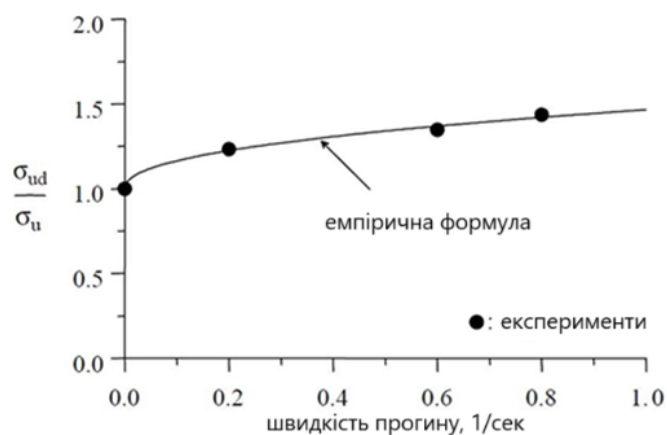
За словами авторів статті [12], результати експериментів показали, що збільшення швидкості навантаження призводить до збільшення граничної міцності на стиск і жорсткості в площині. Причина цього полягає в тому, що коли швидкість завантаження збільшується, швидкість деформації матеріалу також зростає. Ще одна річ, яку показують результати експерименту, полягає в тому, що бічний зсув і осьовий прогин до кінцевого граничного стану швидко зростають, коли швидкість навантаження збільшується, це показують графіки на малюнку 2.2. Вивчаючи графік, автори [12] також стверджують, що розвантаження відбувається швидше, коли швидкість завантаження збільшується. Через це

збільшення швидкості завантаження призведе до більш нестабільної поведінки матеріалу після досягнення граничного стану.



Малюнок 2.2. Залежності між навантаженням і вигином плити при зміні швидкості навантаження [12].

Крім того, автори вивчили взаємозв'язок між швидкістю деформації та співвідношенням між граничним розрахунковим напруженням і граничним напруженням. Тут коефіцієнт деформації визначається як швидкість, поділена на довжину пластини. Для опису залежності швидкості деформації використовуються рівняння Каупера-Саймондса з параметром $D=40,4 \text{ с}^{-1}$ і $q=5$. Результати експерименту показали гарну відповідність кривій, отриманих за результатами емпіричних досліджень, що показано на малюнку 2.3.

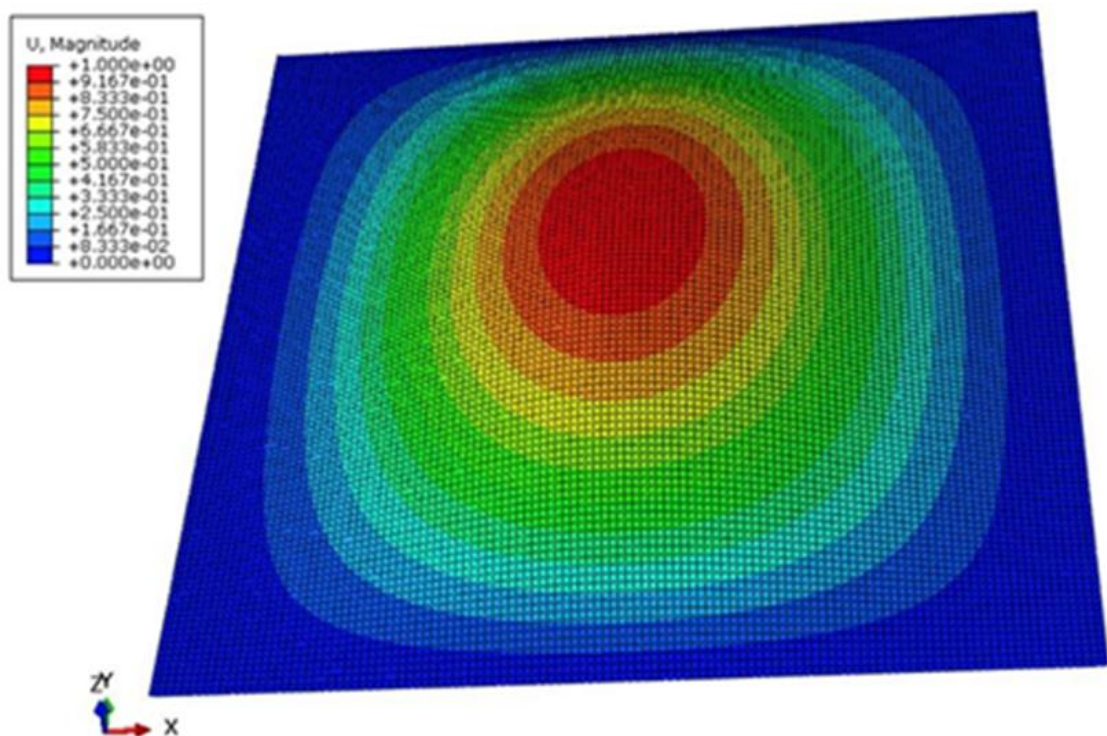


Малюнок 2.3. Співвідношення напружень і швидкості деформації для експериментальної пластини [12].

2.3 Відомі чисельні дослідження сталевих пластин

Стаття [9] включає обширний нелінійний аналіз суднових плит методом скінченних елементів, визначення їх динамічної межі міцності та її порівняння з результатами експериментальних випробувань, а також формулювання емпіричної формули для розрахунку кінцевої міцності прямокутних плит під навантаженням на стиснення в площині.

Можливість використання методу скінченних елементів перевіряється за допомогою програми Abaqus CAE шляхом порівняння з експериментальними результатами [12]. Дослідження виконані на прямокутній сталевій пластині з простою опорою, зберігаючи всі чотири краї прямими (малюнок 2.4) для загальної форми прогину. Швидкість деформації виражається як функція швидкості навантаження V_0 , і на основі швидкості навантаження кінцева міцність і кінцеві деформації за чисельним методом порівнюються з результатами, досягнутими експериментом (таблиця 2.2).



Малюнок 2.4. Контур початкової загальної форми прогину, отриманий за допомогою числового аналізу [9].

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Порівняння результатів тестування та результатів чисельного моделювання

Швидкість заванта- ження [мм/с]	Результати емпіричного випробування		Результати чисельного моделювання		Похибка граничної міцності
	Максимальна міцність [кН]	Переміщення в площині [мм]	Максимальна міцність [кН]	Переміщення в площині [мм]	
0.05	41.2	0.63	38.0	0.60	7.6 %
100	50.6	1.07	45.7	0.62	9.7 %
300	55.6	1.23	54.0	1.01	3.0 %
400	59.2	1.27	58.1	1.28	1.9 %

У цьому дослідженні режим вигину пластини розглядається як початковий прогин обшивки судна із середнім рівнем ($w_{0max} = b/200$). Для різних швидкостей деформації, вказаних у таблиці 2.2, були вивчені різні геометрії пластин, коефіцієнти гнучкості пластин і різні межі текучості.

2.4 Вихідні дані для аналітичного та чисельного аналізу

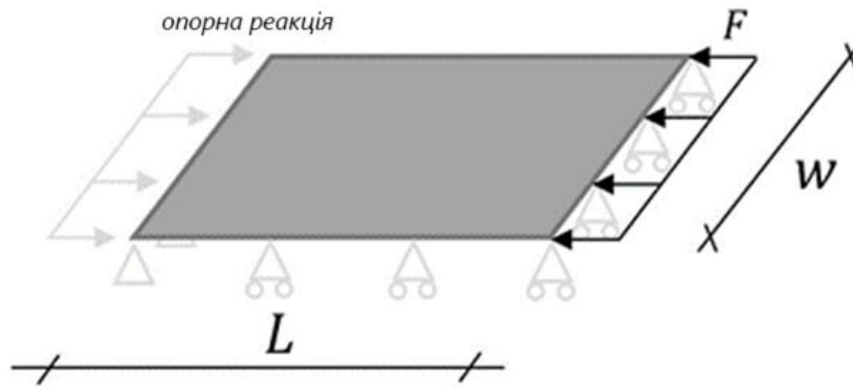
На основі двох праць відтворено аналогічне дослідження, які включали статичний і динамічний аналізів пластин. Основна геометрія, граничні умови та властивості матеріалів, що використовуються в Abaqus CAE, базуються на інформації, наданій у [9] і [12].

Щоб перевірити модель, яка використовується в Abaqus CAE, і переконатися, що навантаження та граничні умови задані так, що вони повторюють фактичний випадок роботи пластини, геометрія моделі відповідає тій, що використовувалася в двох попередніх дослідженнях [9, 12]. Ця геометрія показана на малюнку 2.5, а геометричні властивості пластини показані в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Геометричні характеристики пластини

Ширина w , мм	Довжина L , мм	Товщина t , мм
500	500	1,6



Малюнок 2.5. Ілюстрація геометрії пластини, що показує розташування прикладеного навантаження та граничні умови

Вивчаються та порівнюються кілька різних граничних умов, щоб знайти найкращий спосіб описати фактичну поведінку пластини, дослідженої в наведених вище роботах. У деяких моделях обертання пластини фіксується вздовж двох або більше країв, а в деяких із досліджуваних моделей ненавантажені краї фіксуються в напрямку з площини пластини. На основі отриманих результатів вибираються граничні умови для подальшого моделювання.

Усі краї пластини вільно обертається, але фіксуються в напрямку з площини пластини. Навантаження прикладається вздовж одного правого краю, а протилежний лівий край фіксується в площині пластини, що створює силу реакції $F_{\text{реакц}}$ такого ж розміру, що й прикладене навантаження F , рівняння (2.1).

$$F = F_{\text{реакц}} \quad (2.1)$$

Властивості матеріалу.

Матеріалом пластин є сталь. Властивості матеріалу, які в основному використовуються для пластини, вибрані на основі статей [9, 12] і наведені в таблиці 2.4. Аналіз ДБН [6] показує, що характеристики вказані в таблиці 2.4, відповідають конструкційній сталі Ст3.

Таблиця 2.4

Властивості матеріалу 1 базової пластини.

Модуль Юнга, ГПа	Коефіцієнт Пуассона	Межа текучості, МПа	Граничне напруження розтягу, МПа	Деформація	Густина, кг/м ³
199	0,3	252	360	0,19	7850

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата	KMP 2319218 ПЗ	Аркуш
						32

Пластичні характеристики сталі для різних значень напруження в пластині визначені за формулою:

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{tot} - \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (2.2)$$

де σ_s – напруження в зразку.

ε_{tot} – повна деформація зразка.

ε_{pl} – пластична деформація зразка.

E_s – модуль Юнга для сталі.

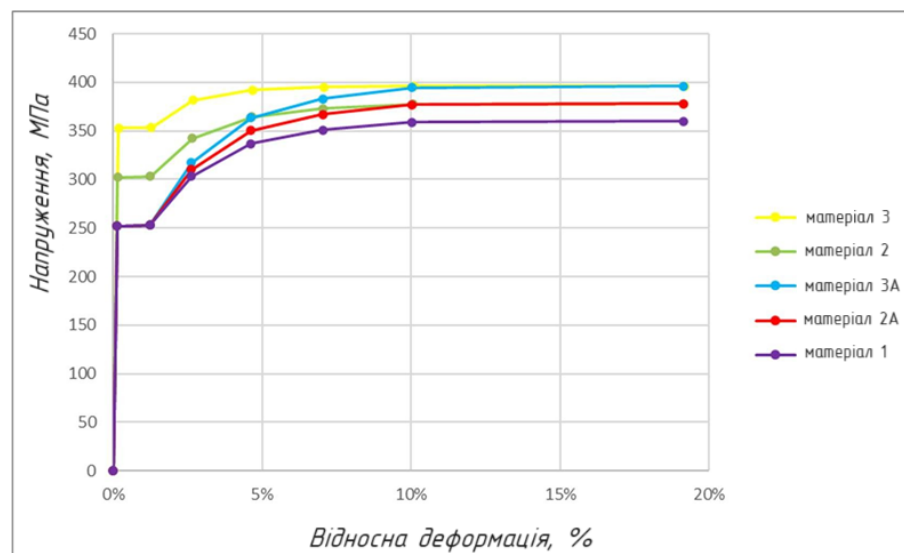
Визначені за формулою (2.2) величини пластичних деформацій при різних напруженнях для еталонного матеріалу № 1 наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Пластичні властивості тестового матеріалу № 1, використаного в Abaqus CAE

Межа текучості, МПа	252	253	303	337	351	359	360
Пластична деформація	0,000	0,011	0,025	0,045	0,069	0,099	0,190

У подальших дослідженнях використані матеріали п'яти видів з різними значеннями межі текучості та межі міцності. Діаграми роботи цих сталей у вигляді кусочно-лінійних залежностей напруження-деформація показані на малюнку 2.6.



Малюнок 2.6. Діаграми роботи напруження – деформація для п'яти сталей

Більш детальний опис характеристик використаних матеріалів наведено в магістерській роботі Кочерженка Олександра [13].

2.5 Створення моделі пластини в середовищі Abaqus CAE

Геометрія.

Пластина була змодельована в Abaqus CAE з використанням елементів оболонки S4R: 4-вузлова подвійно вигнута тонка або товста оболонка, знижена інтеграція з керуванням пісочним годинником, кінцеві деформації мембрани з 5 точками інтеграції товщини.

Основні граничні умови.

Пластина, як пояснюється в експериментальній статті [12], просто підтримується з усіх чотирьох сторін, а навантаження прикладається до однієї сторони пластини в її площині як рівномірне зміщення вздовж однієї сторони пластини, яке повторює фактичне статичне навантаження. У динамічному аналізі те саме навантаження задавалося як контрольована швидкість з певною амплітудою.

Аналіз вигину пластини.

Власне значення вигину, як правило, використовується для оцінки критичних навантажень на вигин, і відображає оцінки різних форм руйнування пластини. Abaqus пропонує два ітераційних методи вилучення власних значень, і це методи ітерації Lanczos та Subspace. Нами було використано стандартний розв'язувач власних ітерацій, а максимальну кількість ітерацій було встановлено рівною 30. Встановлення цих даних в програмі Abaqus показане на малюнку 2.7.

Edit Step

Name: Step-1

Type: Buckle

Basic Other

Description:

Nlgeom: Off

Eigsolver: ☐ Lanczos ☒ Subspace

Number of eigenvalues requested: 1

☐ Maximum eigenvalue of interest:

Vectors used per iteration: 2

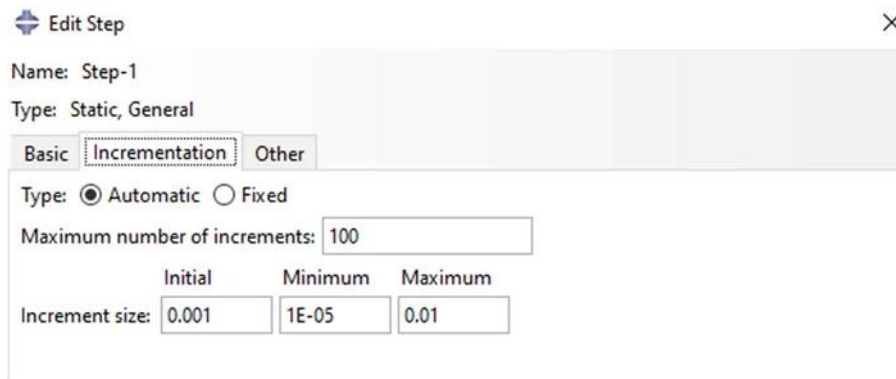
Maximum number of iterations: 30

Малюнок 2.7. Параметри для розрахунку вигину, задані в Abaqus

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Статичний аналіз.

Нелінійний статичний аналіз проводився в Abaqus CAE за допомогою загального статичного методу з нелінійною геометрією. За замовчуванням вибрано період часу «1» і схему з автоматичним кроком часу. Це показано на малюнку 2.8, де встановлено максимальну кількість кроків і вибраний розмір кроку. У статичному аналізі навантаження задане як зміщення, рівне 1 мм. Далі в деяких частинах дослідження використовується зміщення 2 мм.



Малюнок 2.8. Налаштування для статичного аналізу в Abaqus CAE

Динамічний розширений аналіз.

Процедура динамічного розрахунку полягає в тому, що виконується велика кількість малих приростів. Стандартна схема інкрементації в Abaqus/Explicit є повністю автоматичною та не потребує втручання користувача. Процедура явної динаміки підходить для аналізу високошвидкісних динамічних подій, але її також можна застосовувати для аналізу з повільнішими процесами.

У рамках дослідження було випробувано та вивчено кілька різних вхідних параметрів, які вказані нижче в короткому описі дослідження (кінцеві значення виділені жирним шрифтом).

Дослідження збіжності результатів залежно від розмірів сітки скінченних елементів проводиться шляхом аналізу кількох різних розмірів сітки від грубого до дуже малого з наступними значеннями: 2, 5, **10**, 20, 50 мм.

Вплив різних розмірів початкових дефектів вивчається при таких початкових відхиленнях пластини: 1,5, 2,0, **2,5**, 3,5, 5 мм.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Вивчаються різні властивості матеріалу, для чого межа міцності матеріалу приймається рівною: **360, 378, 396 МПа**. У деяких частинах дослідження межа текучості матеріалу також змінювалася згідно значень **252, 302, 353 МПа** в поєднанні з підвищеною межею міцності.

Різні налаштування використовуються для граничних умов, щоб побачити вплив різних параметрів. Випадок, який в основному вивчається в цьому дослідженні, полягає в тому, що пластина розглядається як просто підтримувана вздовж усіх країв від переміщень з площини пластини. Цей випадок порівнюється з налаштуваннями, використаними в статті [9], а також розглядаються ще 5 випадків з різними схемами обпирання пластин.

Щоб проаналізувати вплив малих крайових балок, прикріплених до ненавантажених країв пластин у вигляді поперечних ребер жорсткості, було проведено дослідження з різними розмірами цих балок. У всіх випадках товщина крайових балок складала 1,6 мм, а висота змінювалася і приймала наступні значення : **0, 10, 20, 30 мм**.

Окрім статичного аналізу пластини, були виконані динамічні дослідження. При динамічному дослідженні пластини використовується як неявна, так і явна модель. У динамічному аналізі замість прикладеного статичного навантаження використовується примусове деформування пластини із змінною швидкістю: **0,05, 1, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 400 мм/с**. Було вивчено різні типи прикладення навантажень, де навантаження задається як постійне, так і з лінійним або багатолінійним наростанням з різними темпами часу.

Результати розрахунків при швидкість деформування **0,05 мм/с** порівнюються зі статичними результатами для перевірки, чи такий випадок динамічного навантаження можна вважати статичним навантаженням.

Проводиться дослідження швидкості деформації, де вона прикладається до пластини з використанням степеневого закону та встановлених значень для змінних відповідно до [9]. У статті обчислено швидкість деформації на основі співвідношення між швидкістю та довжиною пластини, враховуючи лише деформацію в плані. Ґрунтуючись на результатах цього дослідження, прикладення

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

швидкості деформації в Abaqus CAE аналізується на стержні з одним елементом, на який діє осьова сила. Швидкість деформації визначається з роботи елемента, тому враховується як деформація прогину, так і деформація на площині. Вплив застосування швидкості деформації досліджується за допомогою функції степеневого закону та функції коефіцієнта текучості, доступних у Abaqus CAE. У дослідженні змінюються значення параметрів, де вилучина D встановлюється, як: 40.4, 1000, **1304**, а експонента q має значення: 5, 2, **4.83**. На основі дослідження швидкості деформації стержня вибираються параметри та метод, які використовують для прикладення деформації з заданою швидкістю, включаю дослідження швидкості деформації плоскої пластини.

У статичному та динамічному аналізах розрахунки виконуються на основі файлу, який створюється на основі режиму вигину для конкретного випадку. Для кожного випадку навантаження були обрані конкретні граничні умови та використовується процедура Abaqus Linear perturbation – Buckle. Було вибрано один режим вигину, заданий кількістю власних значень, і шляхом виконання розрахунку оцінено лінійну несучу здатність на прогин.

2.6 Висновки з розділу.

1. Характер впливу вибуху на огорожувальні конструкції залежить від орієнтації будівлі та самого огороження (стіна чи покриття).

2. Аналіз опублікованих результатів експериментального дослідження сталевієї пластини під динамічним навантаженням, а також даних моделювання такої пластини методом скінченних елементів підтвердив хорошу збіжність результатів і показав, що при збільшенні швидкості деформування (прикладення навантаження) її несуча здатність зростає.

3. При створенні моделей пластин в середовищі Abaqus CAE враховані властивості п'яти сталей з різними значеннями межі текучості та межі міцності, різні варіанти граничних умов закріплення країв пластини, а також різні розміри сітки скінченних елементів та початкових геометричних недосконалостей.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Розділ 3

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ГОФРОВАНОГО МЕТАЛЕВОГО ЛИСТА

Динамічний аналіз полягає в аналізі моделі за допомогою неявних і явних методів, коли модель, розроблена для розв'язання високошвидкісних динамічних проблем із високим ступенем переривчастості, піддається перехідним динамічним впливам. В Abaqus неявні методи спочатку використовувалися для постійних і лінійних швидкостей навантаження. Для багатолінійних швидкостей навантаження використано явний метод для фіксації малих приростів для досягнення більш гладкої кривої. В цьому методі вказується загальний час кроку, а розмір кроку вибирається програмою автоматично на основі використовуваного розміру сітки.

Обчислення виконуються за допомогою Abaqus Explicit при швидкості 0,05 мм/с із багатолінійним наростанням, за винятком випадку, коли досліджується загальне зміщення на 2 мм. У цьому випадку розрахунок займає багато часу через малий часовий крок, тому замість нього використовується Abaqus Implicit.

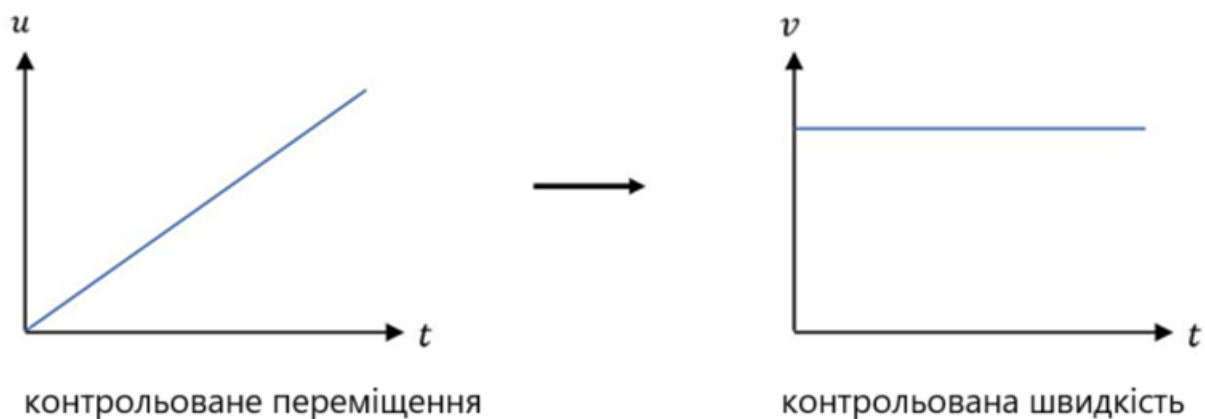
3.1 Динамічне моделювання

Під час дослідження в Abaqus CAE використовувалися явні та неявні (визначені та невизначені) моделі. Результати обох моделей порівнювалися, щоб побачити різні частини результату, які вдається отримати кожній моделі. Причина цього полягає в тому, що в обох методах наявні переваги й недоліки. Під час використання невизначеної моделі в Abaqus CAE виникає проблема виконання обчислень з приростами, які є достатньо малими, щоб охопити поведінку всіх частин обчислення та досягти плавної форми кривої. Прикладом цього є те, що існує проблема запуску моделі зі дуже малим початковим розміром приросту, який необхідний для фіксації поведінки пластини під час її початкового завантаження. Замість цього використовується більший початковий розмір

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

приросту, щоб уникнути повідомлень про помилки в Abaqus CAE. Виходячи з цього, явна модель є кращою, оскільки крок визначається на основі розміру сітки і можна приймати невеликий крок збільшення.

У динамічному аналізі пластини навантаження прикладається як рівномірно розподілена швидкість деформування на всіх вузлах уздовж однієї сторони пластини. Швидкість деформування досягається шляхом введення переміщення краю пластини згідно з малюнком 3.1. При такому навантаженні до пластини на початку розрахунку прикладається певне прискорення. Пізніше нами було виявлено, що це спричиняє певні проблеми, тому було використано інший метод збільшення навантаження.



Малюнок 3.1. Моделювання навантаження як переміщення
та як швидкості деформування

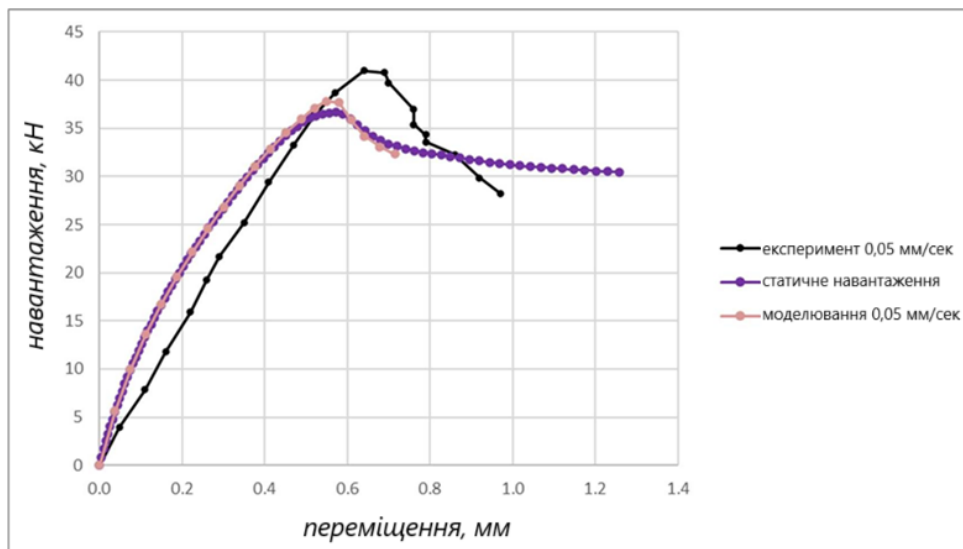
Навантаження з регульованою швидкістю прикладалося до пластини як рівномірно розподілена швидкість вздовж однієї сторони пластини. Замінивши навантаження, контрольоване зміщенням, на навантаження, контрольоване швидкістю, стало легко контролювати як швидкість, так і наростання швидкості в дослідженні динамічного навантаження. Щоб побачити вплив різних швидкостей завантаження, обидві швидкості, вивчені в статті [12], використовуються разом з деякими додатковими, початковими швидкостями. Швидкості деформування, які далі вивчаються в динамічному аналізі, наведені в таблиці 2.2 і дорівнюють 0,05, 100, 300, 400 мм/с.

Для випадку, коли розглядається швидкість 0,05 мм/с, існує проблема з малим розміром приросту, який використовує визначена (явна) модель. Проблема в тому, що аналіз займає дуже багато часу через малий часовий крок. Завдяки цьому для розрахунків із використанням швидкості 0,05 мм/с використовується невизначена (неявна) модель, у якій має бути зафіксовано загальне зміщення 2 мм. Щоб переконатися, що це не впливає на результат, результат явного методу порівнюється з неявним методом. На основі порівняння було зроблено висновок, що обидва методи дають практично однакові результати.

Зрештою, виходячи з досягнутих результатів, явна модель є типом моделі, який в основному використовується в динамічному дослідженні. Тому, якщо інше не зазначено в тексті, подальші дослідження базуються на цьому типі моделі.

3.2 Порівняння зі статичним моделюванням

Щоб переконатися, що модель поводиться однаково незалежно від того, чи виконуються на пластині статичні чи динамічні розрахунки, на малюнку 3.2 виконане порівняння результатів при найповільнішій швидкості 0,05 мм/с, і результатів статичного моделювання.



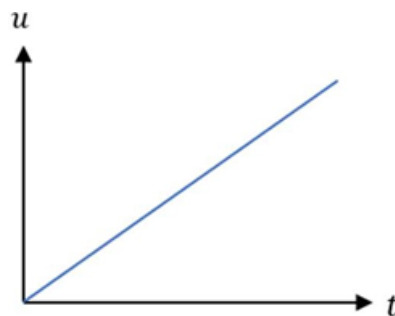
Малюнок 3.2. Порівняння сили та переміщення в площині для статичного випадку навантаження та при застосуванні динамічного навантаження 0,05 мм/с.

З малюнка видно, що пластина має однакову жорсткість для обох типів розрахунків, а максимальна сила досягається при однаковому переміщенні в площині пластини. Різницю можна побачити в області, найближчій до точки, де досягається граничне навантаження. У цій області динамічні розрахунки досягають граничного навантаження, яке приблизно на 1 кН більше, ніж під час статичного розрахунку. Оскільки різниця невелика, результати розрахунку при використанні швидкості деформування 0,05 мм/с можна розглядати як дію статичного навантаження.

3.3 Динамічні дослідження роботи пластин

Прикладення навантаження.

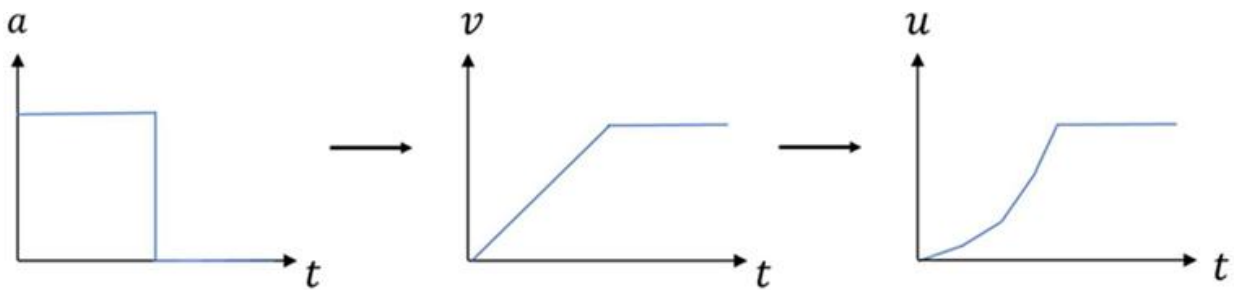
Під час моделювання в Abaqus CAE навантаження можна задавати кількома різними способами. У динамічному дослідженні навантаження прикладається як швидкість деформування, яку можна визначити, дивлячись на нахил кривої переміщення, показаної на малюнку 3.3, а прикладену силу можна знайти за силою реакції для всіх вузлів на паралельному боці.



Малюнок 3.3. Навантаження, контрольоване зміщенням, де нахил кривої є прикладеною швидкістю.

При вивченні динамічних результатів нас цікавить прикладена швидкість і прискорення, тому враховується зв'язок між залежним від часу переміщенням, швидкістю та прискоренням, як показано на малюнку 3.4.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

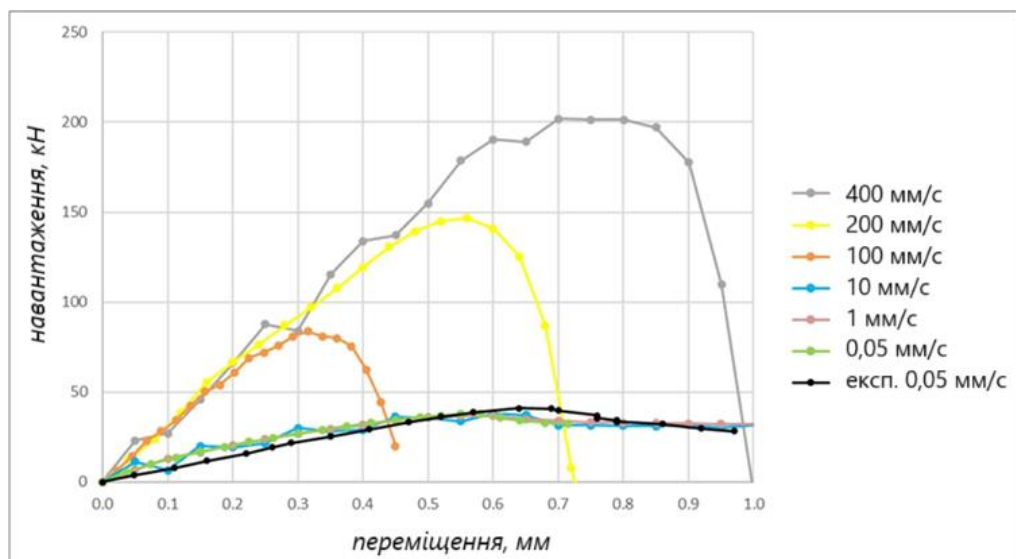


Малюнок 3.4. Зв'язок між залежними від часу прискоренням, швидкістю та переміщенням.

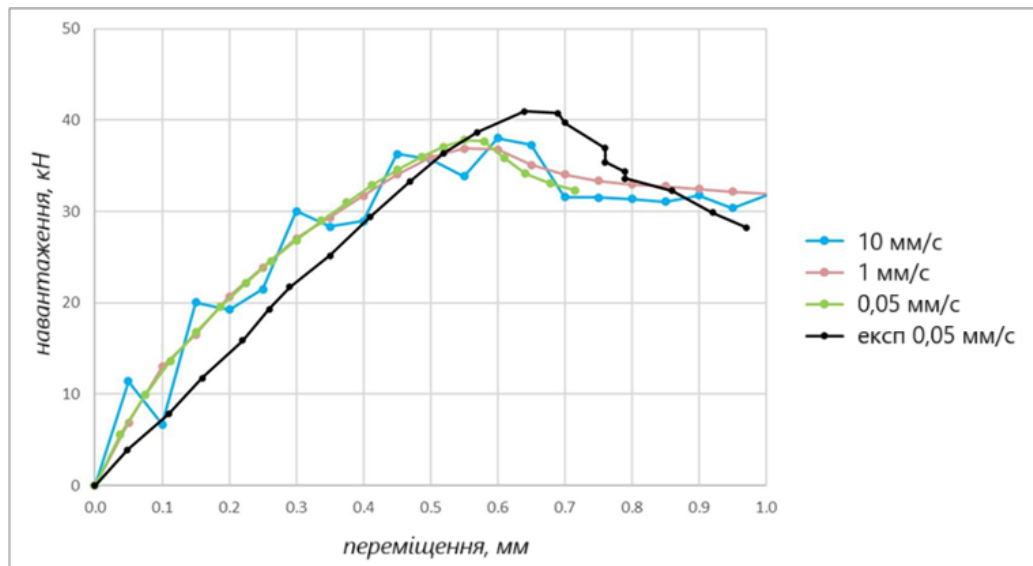
З малюнка вище видно, що на форму швидкості впливає форма прискорення. Ця інформація використовується в наступних підрозділах, де вивчається вплив різних схем прикладення навантаження.

Моделювання при постійній швидкості навантаження.

Динамічний аналіз проводився на сталевій пластині за допомогою Abaqus CAE Implicit для різних швидкостей навантаження, а також вивчалася крива залежності сили від переміщення в площині пластини. Спочатку навантаження прикладалося як постійна швидкість, як описано в розділі 3.1. Це означає, що на першому кроці використовувалася необхідна кінцева швидкість. Однак на основі отриманих кривих видно, що графіки не мали бажаної форми. Замість того, щоб створити один плавний пік, отримана синусоїдальна крива, а для деяких швидкостей крива мала кілька локальних піків, що показано на малюнках 3.5 і 3.6.



Малюнок 3.5. Залежність сили від переміщення в площині сталевій пластини, коли навантаження моделювалося як постійна швидкість.



Малюнок 3.6. Збільшений за масштабом графік залежності сили від переміщення в площині, коли навантаження моделювалося як постійна швидкість.

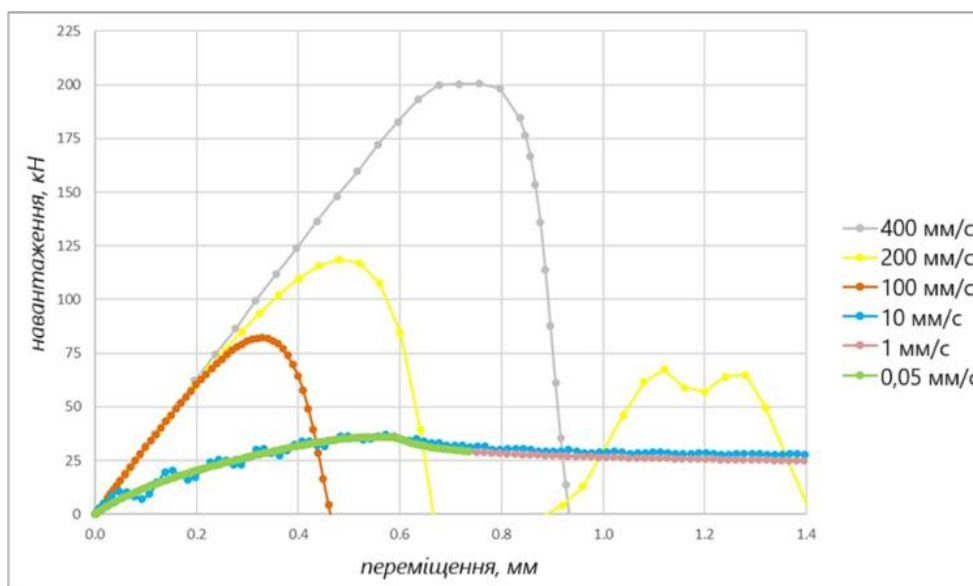
З наведених графіків видно, що величина динамічного ефекту відрізняється в залежності від прикладеної швидкості деформування. При швидкості 10 мм/с форма кривої є синусоїдальною, але в той же час крива все ще повторює форму результату для повільніших швидкостей. За результатами для швидкостей 100 мм/с, 200 мм/с і 400 мм/с, можна побачити значний динамічний ефект. Для цих результатів спостерігається дуже жорстка поведінка, порівняно із статичним випадком. На підставі того факту, що криві для швидкостей 100 мм/с, 200 мм/с і 400 мм/с мають однакові криві, можна зробити висновок, що для всіх трьох випадків спостерігається однакова жорсткість через динамічні ефекти.

У наведеному вище динамічному дослідженні та в решті дослідження до пластини не застосовується демпфування. Щоб побачити, який вплив мали б такі вхідні дані на результати, і спробувати зменшити форму синусоїди, було проведено дослідження при незначному демпфуванні.

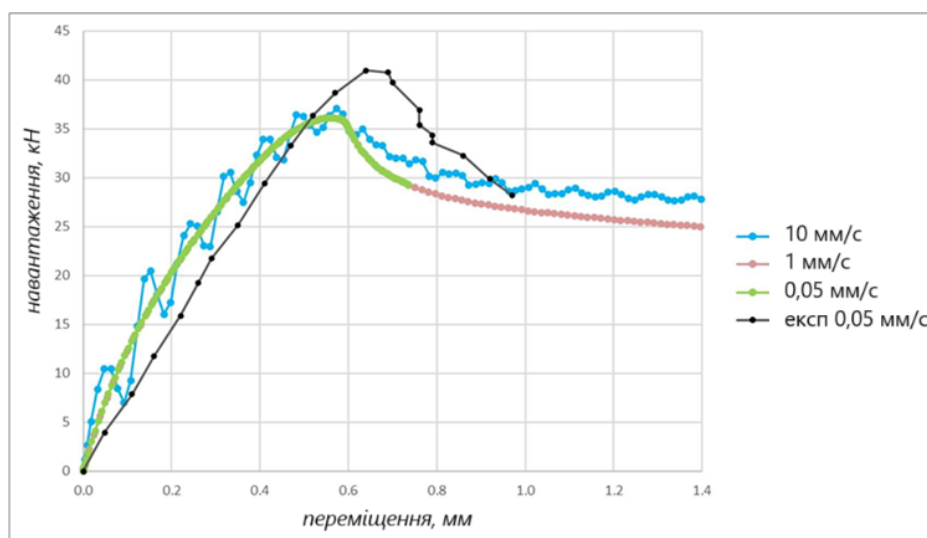
Це було зроблено за допомогою демпфування Релея, відповідно до [14], із демпфуванням 2 % між частотами 4,9 Гц і 40,3 Гц, які використовуються для розрахунку вхідних параметрів. Результати визначення несучої здатності порівнюються з випадком, коли демпфування не використовується. Видно, що для цього випадку є незначна зміна результатів. Виходячи з цього, показано, що використання демпфування майже не впливає на результати цього дослідження.

Збільшення лінійної швидкості навантаження.

Щоб позбутися синусоїдальної форми кривих та щоб програма краще впоралася з динамічним навантаженням, використовується лінійне наростання швидкості. Таке навантаження більше схоже на реальне навантаження, при якому неможливо безпосередньо застосувати постійне навантаження. Табличні дані в Abaqus CAE Implicit були використані для визначення кривої амплітуди моделі для бажаних точок на часовій шкалі. Отримані графіки залежності сили від переміщення показані на малюнках 3.7 та 3.8.

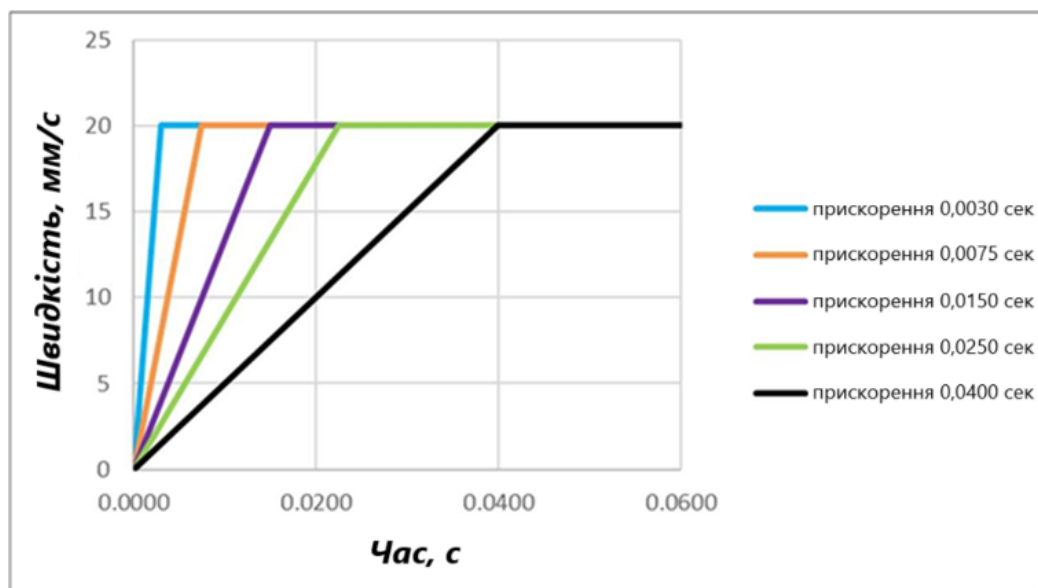


Малюнок 3.7. Співвідношення сили та переміщення в площині для пластини під дією швидкості зі значним лінійним наростанням.



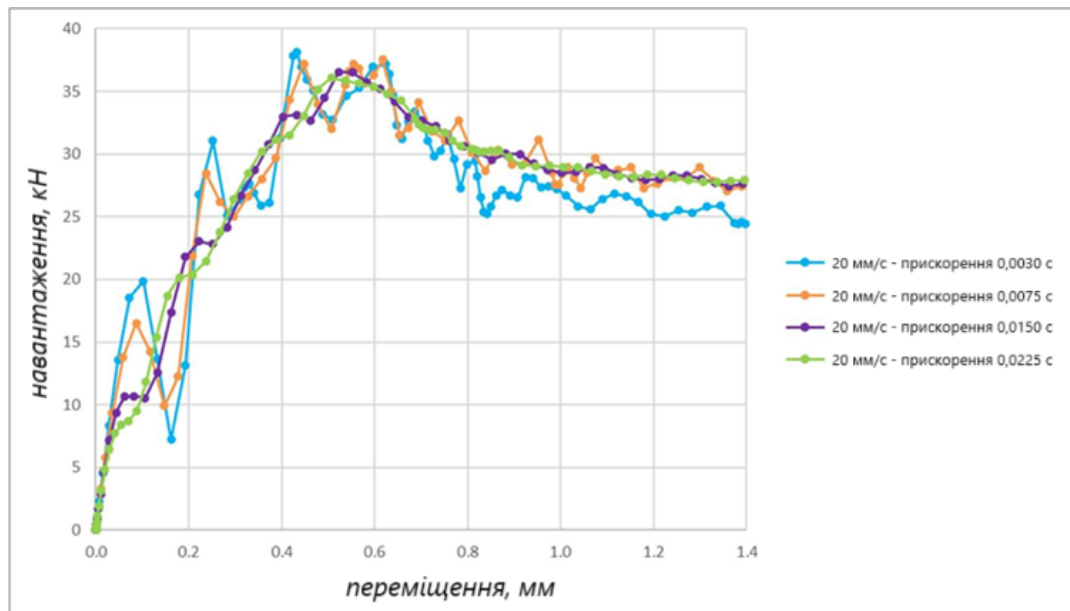
Малюнок 3.8. Співвідношення сили та переміщення в площині для пластини під дією швидкості з помірним лінійним наростанням.

На основі наведених вище двох графіків видно, що при застосуванні навантаження з лінійним наростанням синусоїдальна форма кривих трохи зменшується. Це вказує на те, що більш плавне навантаження допомагає зменшити динамічні ефекти в пластині. Щоб перевірити, як вплив змінюється з різними періодами часу наростання, пластина була розрахована для чотирьох різних періодів часу. В основному вивчалася швидкість 20 мм/с, оскільки це найповільніша швидкість, при якій спостерігалася синусоїдальна форма кривої. Щоб вирішити, які періоди часу брати до уваги до моменту досягнення кінцевого навантаження, були вивчені різні швидкості. Виходячи з отриманого часу, періоди наростання були обрані для кожного випадку навантаження у відсотках від цього значення, згідно з малюнком 3.9. Для кожного випадку навантаження, показаного на малюнку 3.10, будується графік залежності сили від переміщення в площині.



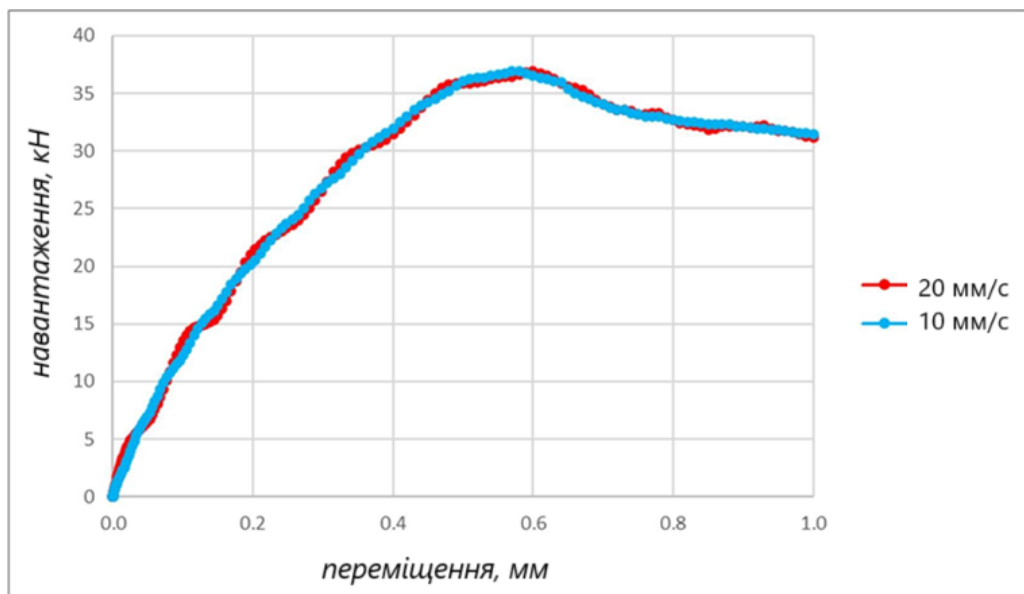
Малюнок 3.9. Різні періоди часу, що використовуються для лінійного наростання швидкості 20 мм/с, прикладеної до пластини.

Порівнюючи криві на малюнку 3.10, видно, що час наростання навантаження істотно впливає на синусоїдальну форму кривої для навантаження 20 мм/с. При застосуванні навантаження з коротким часом наростання сили крива набувала синусоїдальної форми з великою амплітудою, а при збільшенні часу наростання амплітуда коливань зменшувалась, і крива виходила більш гладкою.



Малюнок 3.10. Залежність сили від переміщення для пластини, що піддається динамічному навантаженню з кінцевою швидкістю 20 мм/с і різним часом лінійного наростання навантаження.

Пізніше час наростання навантаження збільшується ще більше. При швидкості деформування 20 мм/с час наростання становить 0,04 с, що дає результат, показаний на малюнку 3.11. Для цього випадку навантаження видно, що синусоїдальна форма кривої слабо виражена, а кінцеві навантаження відрізняються мало. Для кожного випадку навантаження забезпечується досягнення необхідної швидкості до досягнення граничного навантаження.



Малюнок 3.11. Залежність сили від переміщення для пластини, що піддається лінійному наростанню швидкостей 20 мм/с і 10 мм/с. Швидкість 0,05 мм/с дає дуже подібний результат до 10 мм/с.

Базуючись на наростанні для 20 мм/с, наростання для інших швидкостей з такою ж величиною розраховується, як показано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

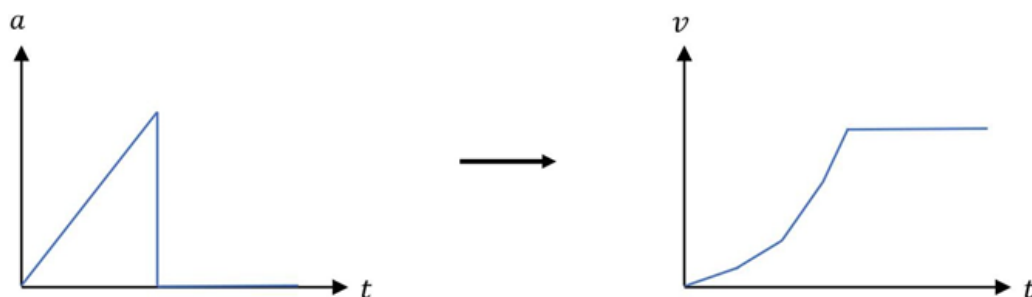
Параметри для лінійного наростання швидкості при $u_r=0,4$ мм і $u_{tot}=2,0$ мм

v_r , мм/с	t_r , с	t_{tot} , с
1	0,8000	2,4000
10	0,0800	0,2400
20	0,0400	0,1200
50	0,0160	0,0480
100	0,0080	0,0240
200	0,0040	0,0120
400	0,0020	0,0060

Вивчення результатів показало, що криві для швидкостей до 20 мм/с є досить гладкими при використанні лінійного наростання, але все ж результат вищих швидкостей відображає великий динамічний вплив. Оскільки синусоїдальну форму все ще можна побачити на графіках сили та деформації, було вирішено розглянути натомість багатолінійне нарощування навантаження.

Багатолінійне прискорення навантаження.

Оскільки результати для швидкостей більше 20 мм/с все ще згладжені, проведені додаткові дослідження, в яких прикладене багатолінійне навантаження замість лінійного. При цьому в усіх випадках загальний період часу розрахунку вибирається таким чином, щоб кінцеве переміщення в площині пластини становило приблизно 2 мм. Багатолінійна форма збільшення швидкості символізує лінійне прискорення навантаження згідно з малюнком 3.12.



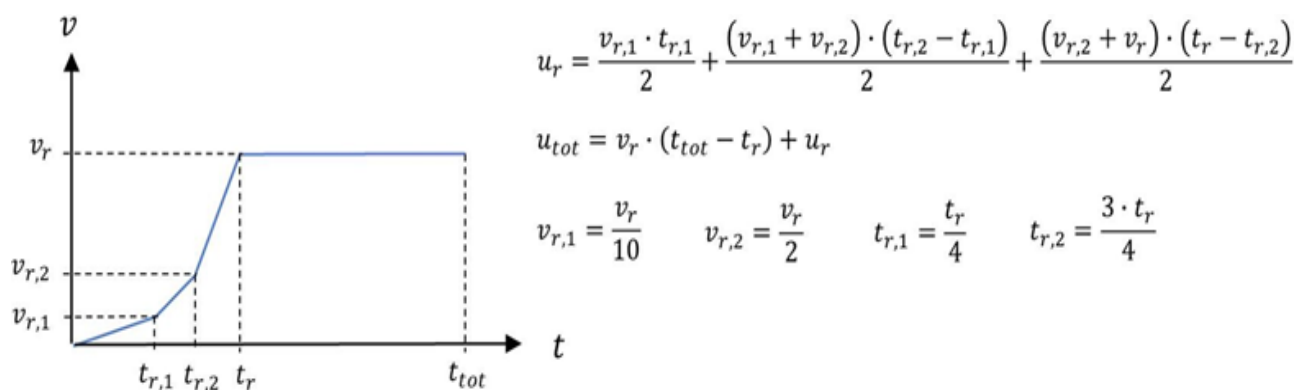
Малюнок 3.12. Демонстрація того, як лінійне прискорення розглядається як швидкість.

Залежність сили від переміщення в площині пластини було вивчено для кожного випадку навантаження, і на основі результатів прийняте рішення про остаточну форму прискорення, коефіцієнти якої наведені в таблиці 3.2 та проілюстровані на малюнку 3.13.

Таблиця 3.2

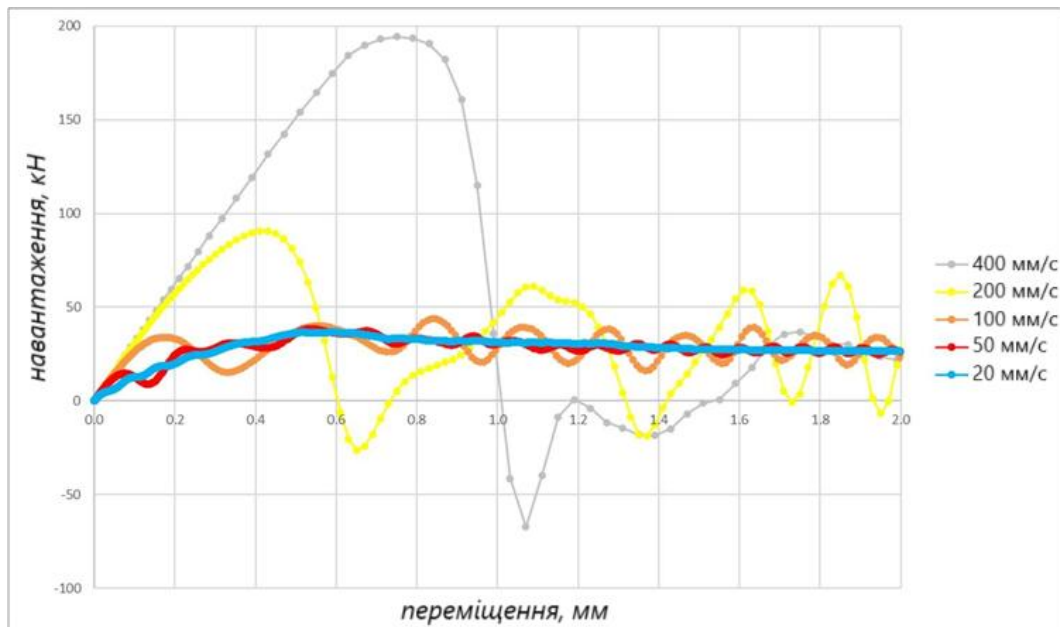
Вхідні дані, що використовуються в Abaqus CAE для моделювання багатолінійного прискорення. Згідно отриманих даних $u_r=0,34$ мм і $u_{tot}=2,0$ мм

	Фактори					
	10	2	1.2	1.1	4	1.33
v_r [мм/с]	$v_{r,1}$ [мм/с]	$v_{r,2}$ [мм/с]	t_r [с]	t_{tot} [с]	$t_{r,1}$ [с]	$t_{r,2}$ [с]
1	0.100	0.500	0.9600	2.6400	0.2400	0.7200
10	1.000	5.000	0.0960	0.2640	0.0240	0.0720
20	2.000	10.000	0.0480	0.1320	0.0120	0.0360
50	5.000	25.000	0.0192	0.0528	0.0048	0.0144
100	10.000	50.000	0.0096	0.0264	0.0024	0.0072
200	20.000	100.000	0.0048	0.0132	0.0012	0.0036
400	40.000	200.000	0.0024	0.0066	0.0006	0.0018

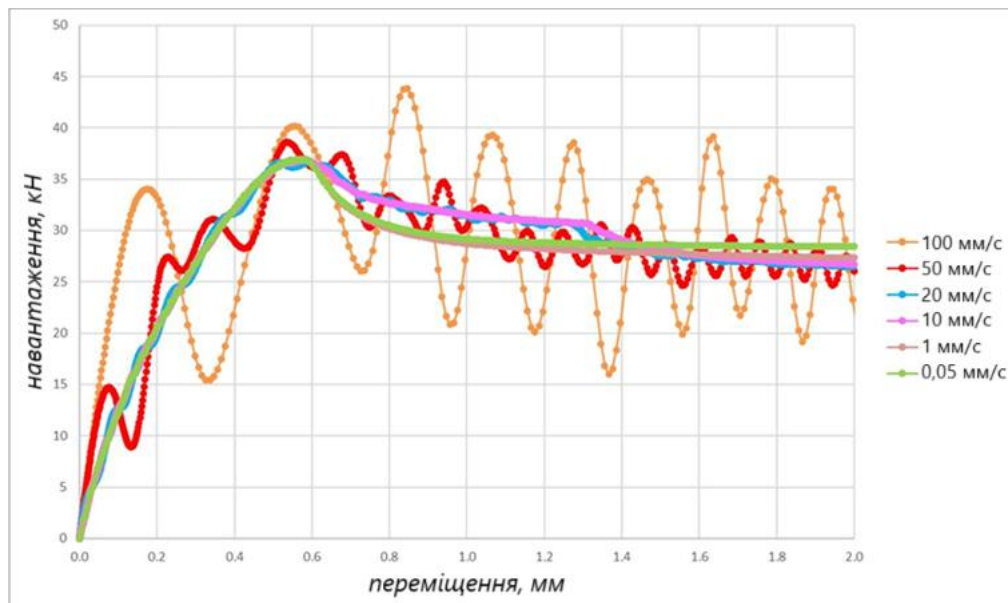


Малюнок 3.13. Остаточна форма багатолінійного наростання швидкості, що використовується в Abaqus CAE з відповідними рівняннями.

На основі кінцевої форми багатолінійного прискорення визначається несуча здатність пластини як кінцева сила в залежності від переміщення в площині, за графіками малюнків 3.14 і 3.15.



Малюнок 3.14. Співвідношення сили та переміщення в площині для пластини, яка піддається багатолінійному прискоренню. Швидкості, менші за 20 мм/с, не показані, оскільки мало відрізняються в цьому масштабі.



Малюнок 3.15. Збільшений графік залежності сили від переміщення в площині для пластини, що піддається багатолінійному прискоренню.

На основі малюнків 3.14 і 3.15 можна стверджувати, що при розглянутій схемі прикладення навантаження спостерігається менший динамічний ефект порівняно з постійним і лінійним прискоренням. Криві все ще не згладжені для всіх швидкостей, але для швидкостей до 100 мм/с вони більш гладкі, і вони також повторюють форму, отриману при моделюванні статичного навантаження.

Базуючись на всіх трьох різних типах навантажень, тобто на постійному, лінійному та багатолінійному прискоренні, можна стверджувати, що найменші динамічні ефекти спостерігаються при багатолінійному зростанні навантаження, яке й використовується в подальшому дослідженні.

Порівнюючи результати для різних динамічних швидкостей з результатом, отриманим [12], показаним на малюнку 3.2, робимо висновок, що аналогічний результат не може бути отриманий для швидкостей від 100 мм/с до 400 мм/с. Отримане нами співвідношення сили та переміщення вказує на значне збільшення початкової жорсткості пластини для вищих швидкостей, чого не видно з результатів експерименту. Кінцева сила, отримана Paik & Thayamballi, становить близько 50 кН для швидкості 100 мм/с і близько 60 кН для швидкості 400 мм/с, що значно нижче, від результатів моделі Abaqus, які становлять 90 кН для 100 мм/с і 195 кН при навантаженні 400 мм/с.

3.4 Висновки з розділу.

1. У середовищі програмного комплексу Abaqus CAE виконано комп'ютерне моделювання роботи пластин під динамічним навантаженням, яке задавалося примусовим деформуванням зі швидкостями 0,05, 100, 300, 400 мм/с.

2. Порівняння з результатами моделювання при статичному навантаженні та з експериментальними даними виявило підвищення початкової жорсткості пластин унаслідок динамічного навантаження.

3. При навантаженні з постійною швидкістю деформування несуча здатність і деформації пластин зростають при збільшенні цієї швидкості, але на загальному фоні звичайної кривої росту та зменшення напружень після досягнення граничної величини спостерігаються синусоїдальні коливання напружень.

4. Амплітуда виявлених коливань напружень зменшується при лінійному наростанні швидкості навантаження. Найменші динамічні ефекти в пластині спостерігаються при багатолінійному зростанні навантаження з наростаючому швидкістю, яке й використовується в подальшому дослідженні.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Розділ 4

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПРИКЛАДЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА РОБОТУ МЕТАЛЕВИХ ПЛАСТИН

4.1 Вплив швидкості деформації на окрему сталеву пластину

Щоб вивчити вплив швидкості деформації на роботу моделі, розрахунки в Abaqus CAE спочатку виконуються без використання ефекту швидкості деформації, пізніше швидкість деформації застосовується до числової моделі, і результати порівнюються один з одним.

Існують різні типи ефектів швидкості деформації, які можна використати. У досліджуваній моделі використовується те саме рівняння, що й в емпіричній роботі [9], так зване рівняння Каупера-Саймондса.

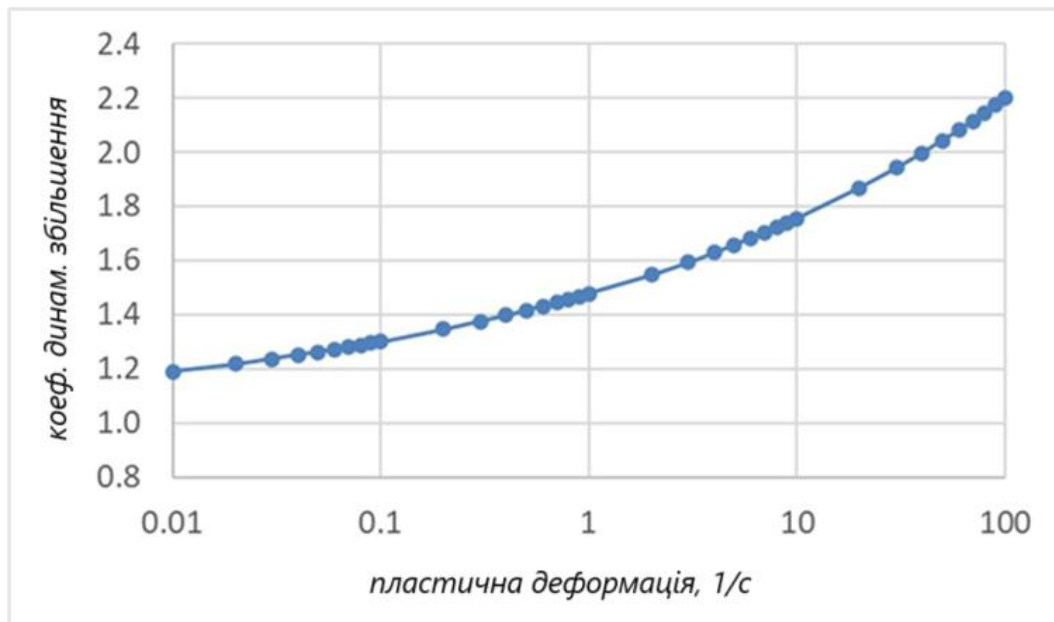
$$\sigma_{yd} = \sigma_y \cdot \left(1 + \left(\frac{\varepsilon^{1/q}}{D} \right) \right) \quad (4.1)$$

Динамічний аналіз проводився на сталевій пластині за допомогою модуля Abaqus/Explicit шляхом побудови кривих переміщення-сила на основі рівняння (4.1) при різних швидкостях навантаження з багатолінійним прискоренням. Для контролю результатів обчислення виконані за допомогою функції (4.1) та шляхом ручного додавання коефіцієнта текучості для пластини. Розрахунок виконано для швидкостей 400 мм/с, 200 мм/с, 100 мм/с, 50 мм/с, 10 мм/с і 0,05 мм/с.

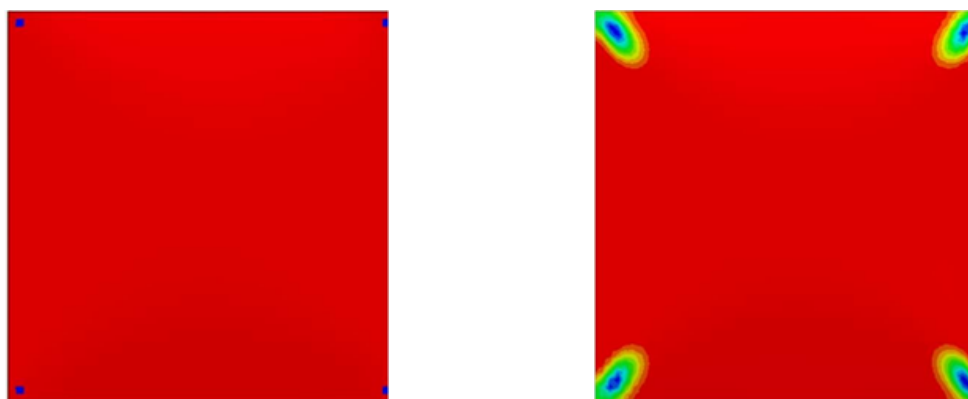
На основі функції степеневого закону (4.1) та параметрів $D=40,4$ і $q=5$, наведених у статті [9], будується графік залежності коефіцієнта динамічного збільшення, КДЗ, від швидкості деформації, малюнок 4.1.

Ступеневий закон у Abaqus CAE використовувався для реалізації ефекту швидкості деформації, а вхідні значення були взяті з емпіричного дослідження, як зазначено в розділі 3.2. Щоб знайти елемент, де з'являється максимальна пластична деформація, на малюнку 4.2 побудовані кольорові графіки розподілу сили в моменти, коли пластична деформація починає з'являтися в пластині та коли досягається гранична сила.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

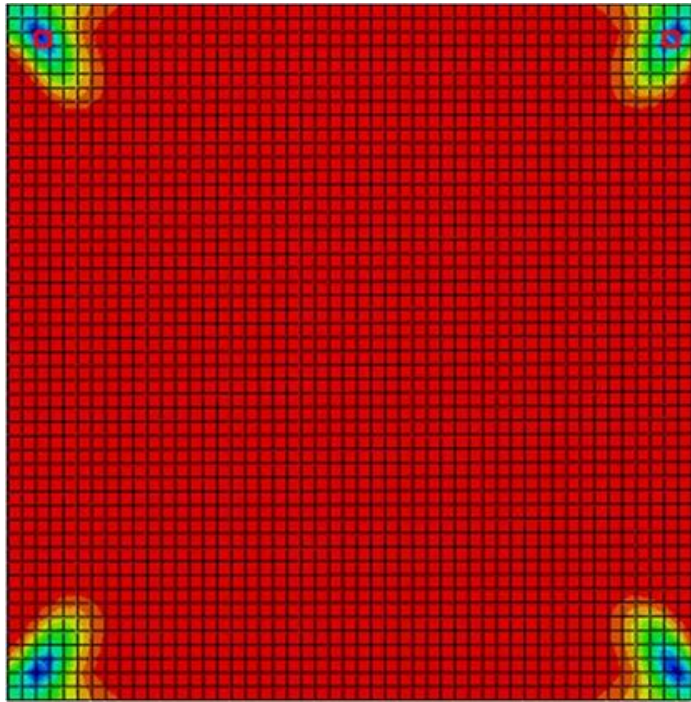


Малюнок 4.1. Очікувана залежність між коефіцієнтом динамічного збільшення та пластичною деформацією на основі рівняння (4.1) та заданих параметрів D і q



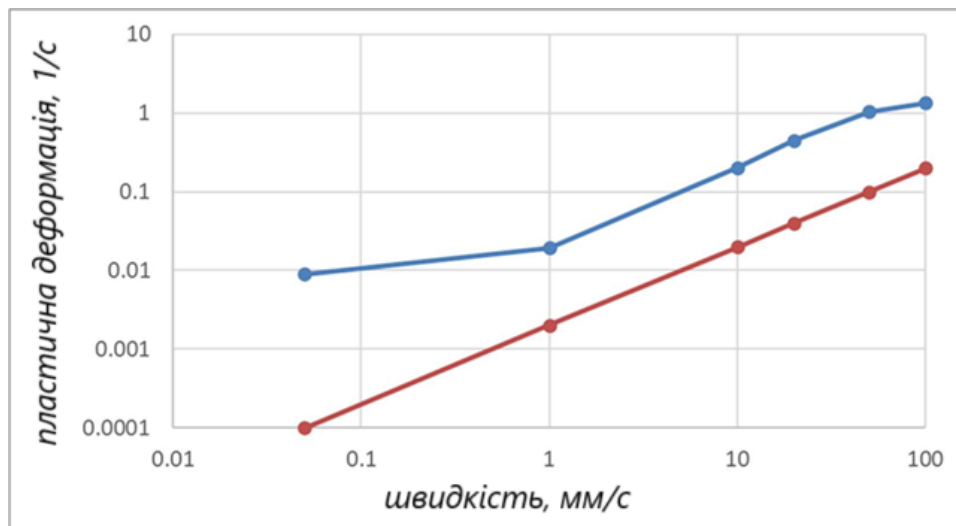
Малюнок 4.2. Графіки розподілу пластичної деформації в пластині в момент, коли в пластині вперше виникає пластична деформація (ліворуч) і при досягненні граничного навантаження в пластині (праворуч) для швидкості 1 мм/с. Червоний колір вказує на нульову пластичну деформацію, а синій колір вказує на максимальну пластичну деформацію

На графіках розподілу пластичної деформації в пластині з малюнка 4.2 видно, що пластична деформація спочатку з'являється саме в кутах пластини і згодом там досягається максимальна деформація. Таким чином, під час дослідження швидкості деформації вибирається елемент у цій області, як показано на малюнку 4.3.



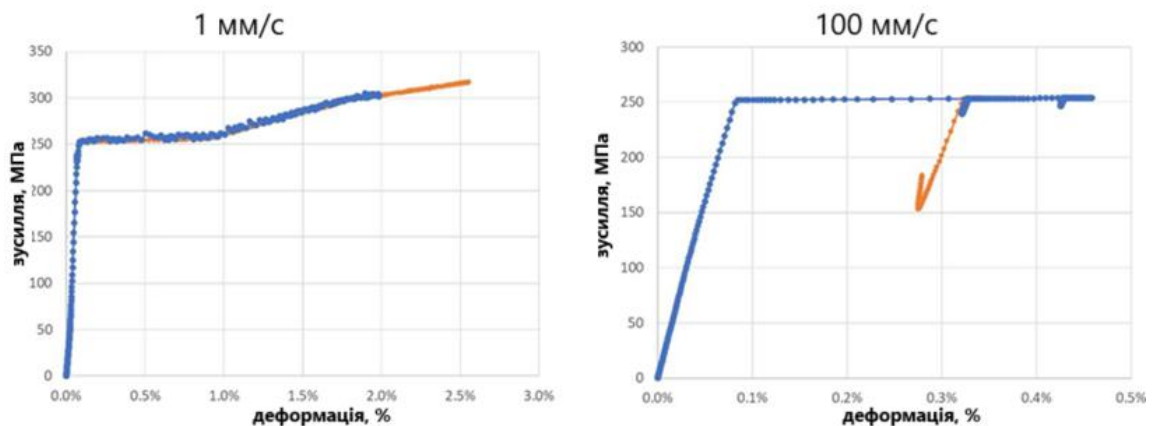
Малюнок 4.3. Розташування елементів у Abaqus CAE, де вивчався ефект деформації (червона рамка навколо елемента).

На основі пластичної деформації розраховується коефіцієнт динамічного збільшення КДЗ, який на малюнку 4.4 порівнюється з очікуваним значенням на основі графіка із співвідношенням швидкості деформації та DIF.



Малюнок 4.4. Залежність швидкості пластичної деформації від швидкості навантаження сталевієї пластини без ефекту деформації для швидкостей до 100 мм/с. Синя крива показує пластичну деформацію, отриману від елемента в Abaqus, а червона крива – швидкість деформації, розраховану як в експериментальній статті [12].

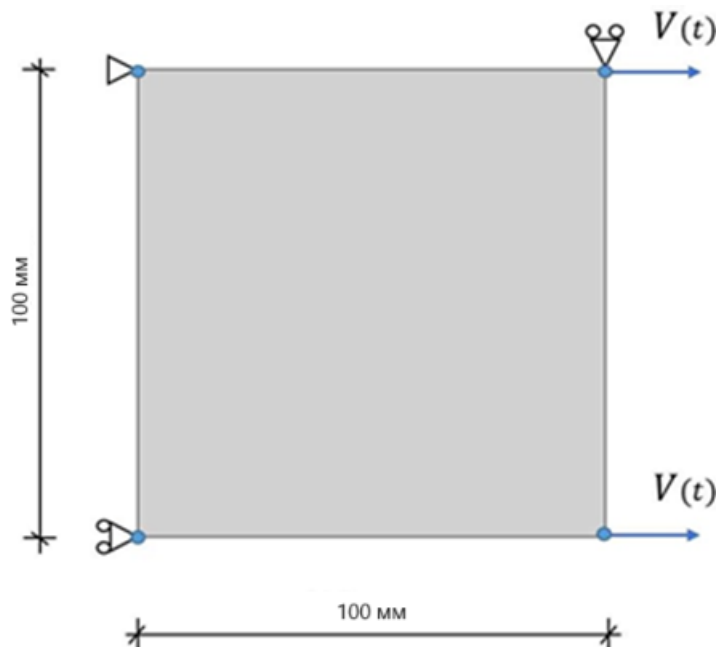
Отримані залежності деформації та напружень для 1 мм/с і 100 мм/с показані на малюнку 4.5, де залежність напруження від деформації не має великої різниці при моделюванні швидкості деформації, хоча насправді має бути збільшення несучої здатності.



Малюнок 4.5. Співвідношення напруження та деформації для сталевієї пластини при використанні параметрів $D=40,4$ і $q=5$, де помаранчева крива показує залежність без ефекту швидкості деформації, а синя крива відображає урахування ефекту швидкості деформації

При вивченні кривої напруження-деформації для різних швидкостей збільшення навантаження порівнюється зі значенням, отриманим на основі результуючої пластичної деформації та відповідного DIF з малюнка 4.1. Як видно з цього малюнка та з малюнка 4.4, очікуване збільшення несучої здатності становитиме приблизно 20% для 1 мм/с і приблизно 50% для 100 мм/с. На основі цих результатів можна зробити висновок, що вплив на результат не відповідає очікуваному на основі ступеневого закону та параметрів, наведених у статті [9]. Для меншої швидкості навантаження спостерігається незначний ефект, який не відповідає очікуванням.

Виходячи з цього, проведене більш детальне дослідження, у якому поведінка швидкості деформації в Abaqus CAE вивчається при використанні ступеневої функції та коефіцієнта DIF, щоб краще зрозуміти, як працює програмне забезпечення. Виконано динамічний аналіз одного елемента оболонки, схема якого наведена на малюнку 4.6.



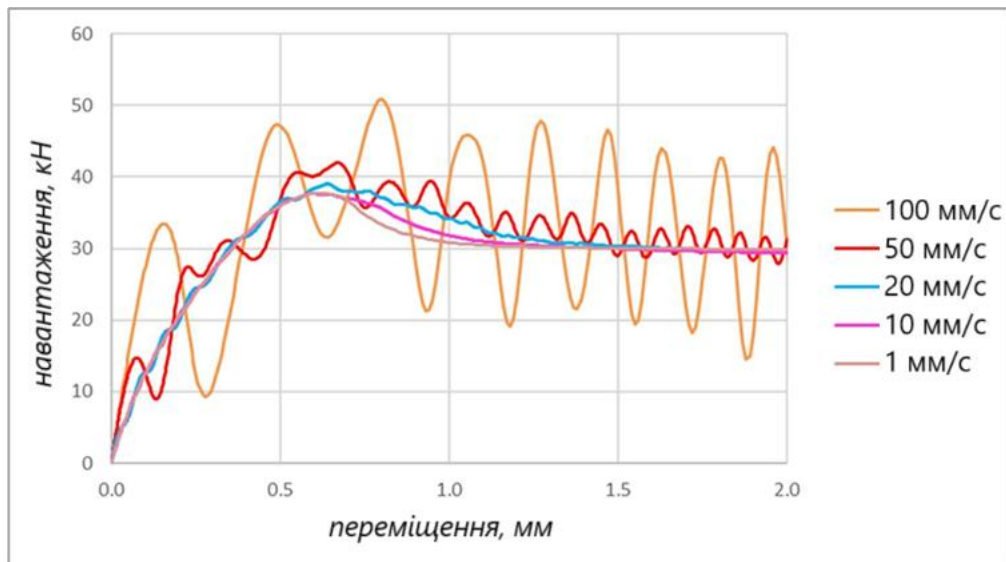
Малюнок 4.6. Геометрія та розміри одного елемента оболонки, що використовується в Abaqus CAE

Отримані результати були дуже схожими на простий стержень, що вказує на відсутність впливу на типу елемента: балковий елемент чи елемент оболонки. При заданні стискаючого навантаження на елемент оболонки результати були такими ж, як і при розтягуючому навантаженні. Отже, геометрія та площі пластини не впливають на швидкість деформації.

4.2 Дослідження швидкості деформації плоского пластинчастого елемента

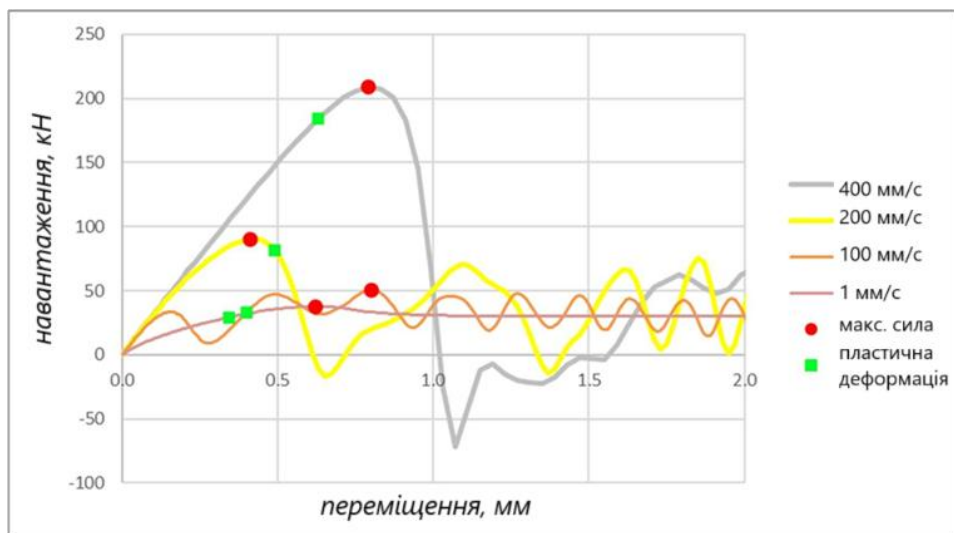
Метод, який використовується для подання ефекту швидкості деформації – це коефіцієнт текучості в Abaqus CAE та ефект швидкості деформації, який базується на ступеневому рівнянні Каупера-Саймондса (4.1) зі змінними $D=1304$ і $q=4,83$. Вплив додавання коефіцієнта текучості досліджено для швидкостей деформування 1 мм/с, 10 мм/с, 20 мм/с, 50 мм/с і 100 мм/с. Для кожного випадку навантаження вивчається залежність сили від переміщення та пластична деформація в пластині. Результати наведено на малюнку 4.7, де розташований елемент, максимальне прикладене навантаження та де починається пластична деформація в пластині.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



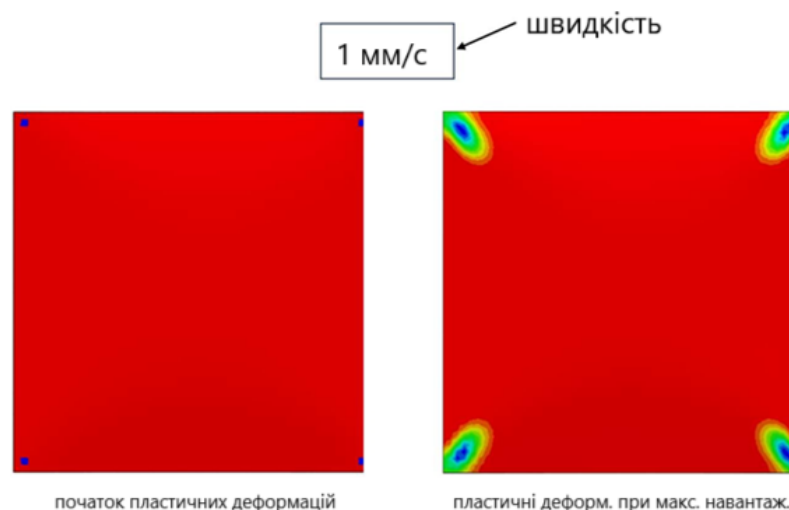
Малюнок 4.7. Співвідношення сили та переміщення в площині для пластини при використанні понижених швидкостей деформації

На малюнку 4.8 позначені точки на кривій залежності сили від переміщення в площині, у яких реалізується максимальна сила і починає з'являтися пластична деформація. На графіку видно, що для швидкостей 1 мм/с, 100 мм/с і 400 мм/с пластична деформація виникає в пластині до досягнення граничного зусилля. Для 200 мм/с граничне навантаження досягається до того, як у пластині почне з'являтися пластична деформація.

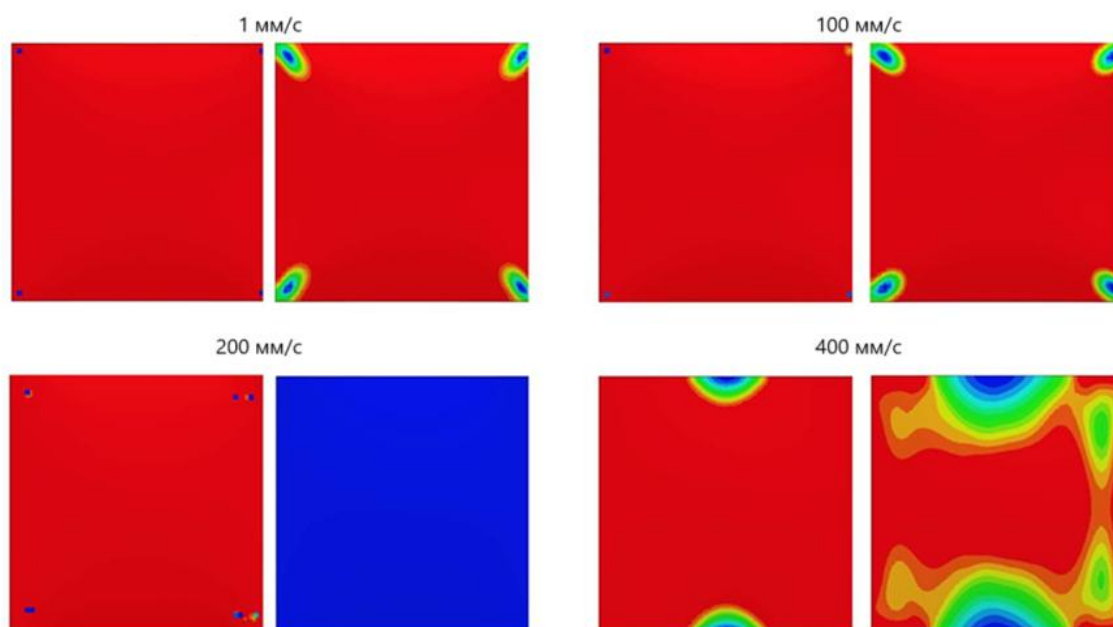


Малюнок 4.8. Місця, де граничне навантаження та пластична деформація починають з'являтися в пластині при заданій швидкості деформації

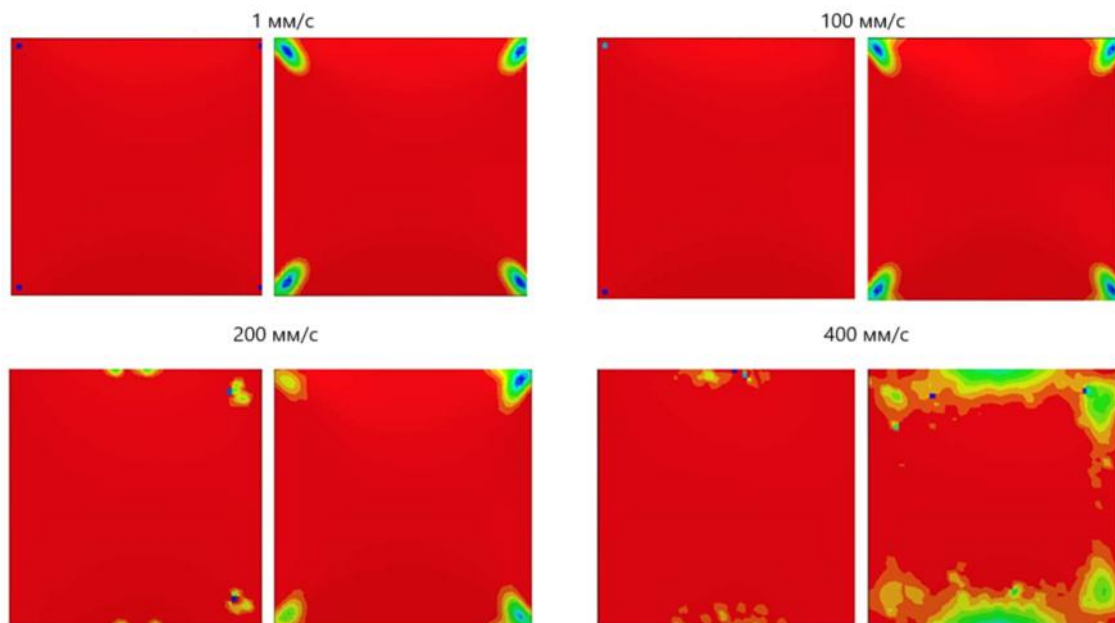
Змодельовані кольорові діаграми розподілу пластичної деформації в площині вказують на місце, де починає з'являтися пластична деформація на пластині і як відбувається розподіл напружень, коли сила досягає максимального значення. Пояснення графіків показано на малюнку 4.9, а графіки для різних швидкостей показані без урахування ефекту швидкості деформації на малюнку 4.10 та з ефектом швидкості деформації на малюнку 4.11.



Малюнок 4.9. Зразок графіка розподілу пластичної деформації в пластині з вказаною швидкістю



Малюнок 4.10. Графіки для різних швидкостей, які вказують на початок появи пластичних деформацій та їх розподіл при максимальній силі (без урахування ефекту швидкості деформації в моделі)



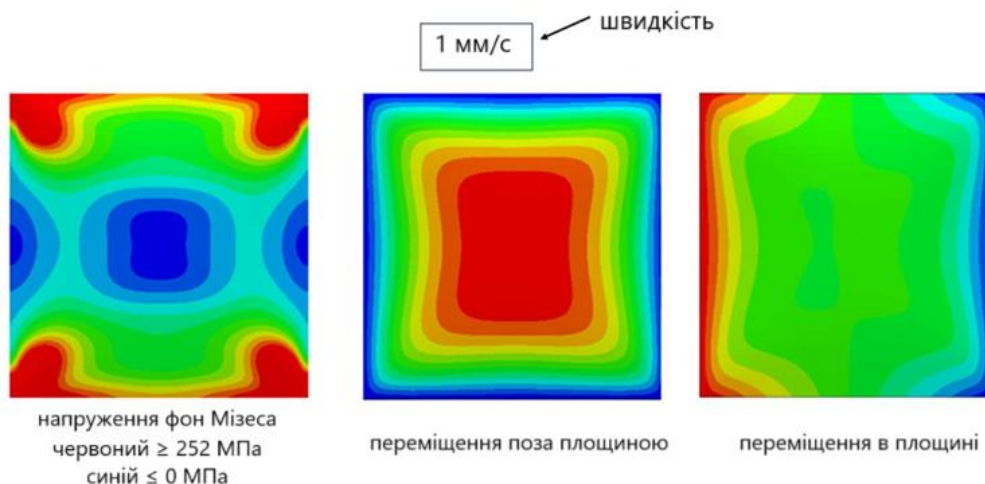
Малюнок 4.11. Графіки для різних швидкостей, які вказують на початок появи пластичних деформацій та їх розподіл при максимальній силі (з урахуванням ефекту швидкості деформації в моделі)

За графіками 4.10 і 4.11 можна зробити висновок, що розташування та форма зони першої появи пластичної деформації подібні для швидкостей 1 мм/с і 100 мм/с. Крім того, видно близький розподіл зусиль на кольорових графіках для цих швидкостей. На основі лінійної залежності між швидкостями навантаження можна вважати поведінку пластин для швидкостей у цьому діапазоні ідентичною.

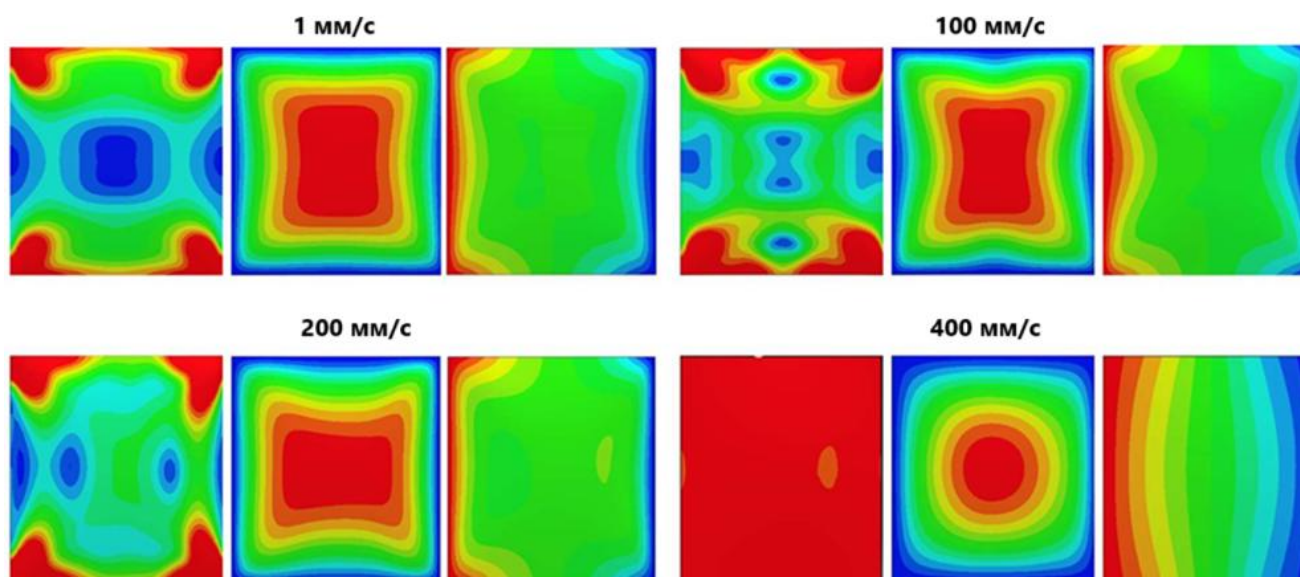
Аналіз графіків при швидкості деформування 200 мм/с вказує на таку ж поведінку, як і для менших швидкостей. При вивченні випадку, коли до пластини не прикладається швидкість деформації, зони появи пластичної деформації розподіляються так само, як при менших швидкостях, але граничне навантаження досягається без появи пластичних деформацій. Це означає, що в цьому випадку на граничне навантаження не впливають пластичні характеристики пластини.

З графіків при швидкості 400 мм/с видно, що пластична деформація в пластині з'являється до прикладення максимального навантаження. Однак кольоровий графік деформацій показує, що в цьому випадку пластична деформація починається в середині ненавантажених країв, а не в кутах, як в інших випадках. Розподіл пластичної деформації при досягненні граничної сили має іншу форму, ніж при інших швидкостях прикладення навантаження.

Для тих самих швидкостей створено кольорові графіки, де показано напруження фон Мізеса, відхилення поза площиною та зміщення в площині. Ці графіки з малюнків 4.12 і 4.13 дозволяють побачити, де досягається текучість і як виглядає деформація пластини.



Малюнок 4.12. Зразок графіків, який показує напруження фон Мізеса, відхилення поза площиною та переміщення в площині

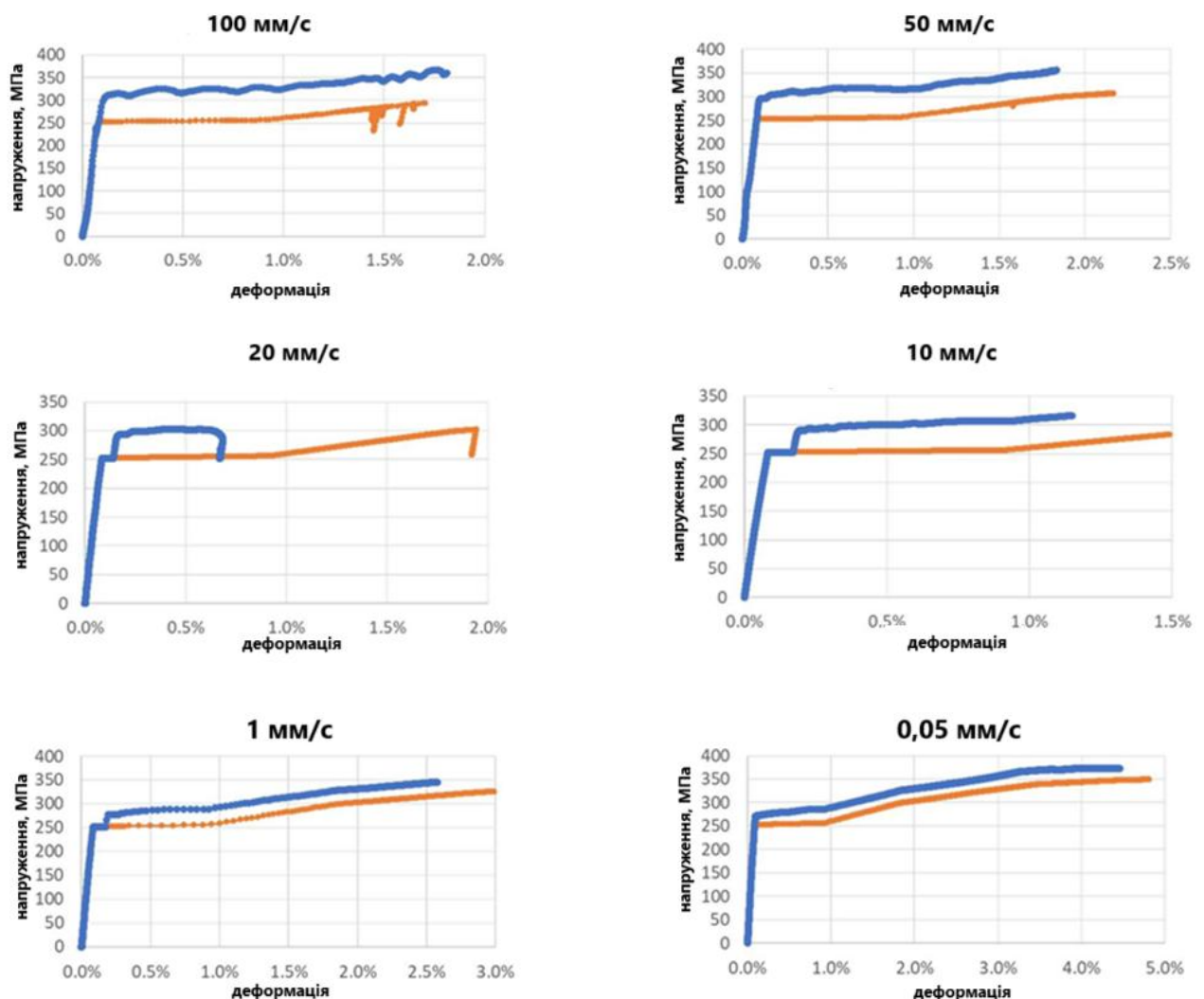


Малюнок 4.13. Графіки розподілу деформацій для різних швидкостей навантаження, які показують напруження фон Мізеса пластини та деформацію поза площиною, напруження у площині з ефектом швидкості деформації

Графіки на малюнку 4.13 показують, що поведінка пластини змінюється зі збільшенням швидкості від 1 мм/с до 400 мм/с. При 200 мм/с реакція на напруження фон Мізеса змінюється та не слідує шаблону, за винятком того, що область появи пластичності знаходиться в кутах пластини. При швидкості

400 мм/с текучість досягнута майже у всій пластині. Якщо натомість дивитися на відхилення поза площиною, картина майже однакова для випадків від 1 мм/с до 200 мм/с, але для 400 мм/с максимальні значення все ще досягаються в середині пластини. Аналіз площинного переміщення показує, що для швидкості 400 мм/с кольори поступово змінюються по всій пластині, тоді як для решти швидкостей максимальні та від’ємні значення зосереджені на навантажених краях.

На малюнку 4.14 наведені графіки напруження - деформація для різних швидкостей навантаження. Вони дозволяють побачити, як збільшується міцність матеріалу, коли швидкість деформації прикладається до пластини.



Малюнок 4.14. Графіки залежності напруження від деформації для різних швидкостей з ефектом швидкості деформації та без нього, де помаранчева крива показує залежність без урахування ефекту швидкості деформації, а синя крива показує залежність з урахуванням ефекту швидкості деформації

З графіків на малюнку 4.14 можна простежити поведінку напруження та деформації пластини для різних швидкостей навантаження. Для всіх випадків текучість пластини зросла при урахування ефекту швидкості деформації в моделі.

На підставі наведених кривих можна зробити висновок, що збільшення сили при урахуванні ефекту швидкості деформації є різним для різних швидкостей. Змінюється також місце, де починається збільшення сили. У деяких випадках значення напруження збільшується на початку деформування, тоді як в інших випадках воно починає збільшуватися при досягненні певного значення деформації. Як правило, чим вища швидкість деформації, тим раніше відбувається така зміна, тоді як для повільних швидкостей криві залишаються незмінними до переходу матеріалу в зону текучості. Хоча при швидкості 0,05 мм/с збільшення міцності можна побачити з початку розвитку текучості.

4.6 Висновки з розділу.

1. Встановлено, що збільшення несучої здатності пластини при дії динамічного навантаження близьке до 20% для швидкості прикладення навантаження 1 мм/с і до 50% для 100 мм/с. Геометрія та розміри пластини не впливають на ступінь динамічного збільшення несучої здатності.

2. Характер розподілу зон текучості по поверхні пластини залежить від швидкості прикладення навантаження. З ростом швидкості збільшується також величина зон, у яких матеріал пластини переходить в пластичну стадію.

5. При збільшенні швидкості прикладення навантаження початок проявів динамічного зміцнення пластини зміщується у бік більших деформацій, зростає гранична несуча здатність пластини, а також розширюються зони виникнення пластичних деформацій та змінюється форма цих зон.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Виконані в кваліфікаційній магістерській роботі дослідження сталевих пластин та профільованих листів при дії динамічного навантаження дозволили зробити такі висновки:

1. Огородження дахів і стін можуть сприймати навантаження від ваги конструкцій та обладнання, снігу та вітру, які діють у площині стіни чи в перпендикулярному напрямку. Одним з небезпечних і непередбачуваних аварійних навантажень може буди дія ударної хвилі від вибуху.
2. Ударне навантаження характеризується величиною імпульсу, який дорівнює добутку інтенсивності навантаження на тривалість його дії. Реакція конструкції на ударне навантаження розтягується в часі та залежить не лише від величини самого навантаження, але й від характеристик конструкції, яка його сприймає, такими як впливає маса, інерційність, жорсткість, міцність та пластичні властивості конструкції. Статичні навантаження краще сприймає міцна й жорстка конструкція, а при дії ударних навантажень краще працюють податливі, не надто жорсткі конструкції з великою масою.
3. На основі методу скінченних елементів розроблені й реалізовані в програмно-розрахункових комплексах методи оцінювання несучої здатності та стійкості різних конструкцій, у тому числі сталевих пластин та огорожень зі сталевого профільованого при ударних навантаженнях від вибухів у площині пластини та в перпендикулярному напрямку. Для подальших досліджено в магістерській роботі обрано програмний комплекс Abaqus CAE, який дозволяє моделювати роботу конструкцій в умовах дії статичних і динамічних навантажень.
4. У середовищі Abaqus CAE досліджено вплив на роботу плоских сталевих пластин різних схем прикладення динамічного навантаження у формі примусового деформування та різних швидкостей деформування при динамічних навантаженнях. Проаналізовані властивості п'яти сталей з різними значеннями межі текучості та межі міцності, різні варіанти граничних умов закріплення країв пластини, а також різні розміри сітки скінченних елементів та початкових геометричних недосконалостей.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

5. На роботу пластин виявляє значний вплив схема прикладення динамічного навантаження. Постійне навантаження та схема лінійного прискорення навантаження дають значну різницю в результатах, і викликають динамічні коливання в моделі, що може спотворити результати моделювання. Динамічні ефекти більш точно моделюються при прикладенні навантаження з багатолінійним наростанням швидкості деформування.
6. Порівняння результатів виконаного моделювання з опублікованими даними експериментальних досліджень пластин під динамічним навантаженням підтвердило хорошу збіжність результатів і показало, що при збільшенні швидкості прикладення навантаження несуча здатність пластин зростає приблизно на 20% при швидкості прикладення навантаження 1 мм/с і до 50% при 100 мм/с. Геометрія та розміри пластини не впливають на ступінь динамічного збільшення несучої здатності.
7. Характер розподілу зон текучості по поверхні пластини залежить від швидкості прикладення навантаження. З ростом швидкості навантаження збільшується також величина зон, у яких матеріал пластини переходить в пластичну стадію.
8. При збільшенні швидкості прикладення навантаження початок проявів динамічного зміцнення пластини зміщується у бік більших деформацій, зростає гранична несуча здатність пластини, а також розширюються зони виникнення пластичних деформацій та змінюється форма цих зон.
9. Загалом моделювання в середовищі Abaqus CAE дозволяє проаналізувати роботу плоских сталевих конструкцій під дією ударного навантаження, але вимагає уважно аналізувати отримані результати для відсіювання небажаних проявів динамічної моделі, зокрема виникнення коливань при високих швидкостях прикладення навантаження.

CONCLUSIONS RESULTS OF RESEARCH

The studies of beams with a perforated wall carried out in the qualifying master's thesis allowed to make the following conclusions:

1. Roof and wall enclosures can take loads from the weight of structures and equipment, snow and wind, which act in the plane of the wall or in a perpendicular direction. One of the dangerous and unpredictable emergency loads can be the action of a shock wave from an explosion.
2. Shock load is characterized by the magnitude of the impulse, which is equal to the product of the load intensity and the duration of its action. The reaction of a structure to a shock load is stretched in time and depends not only on the magnitude of the load itself, but also on the characteristics of the structure that perceives it, such as the mass, inertia, stiffness, strength and plastic properties of the structure. Static loads are better perceived by a strong and rigid structure, and when subjected to shock loads, flexible, not too rigid structures with a large mass work better.
3. Based on the finite element method, methods for assessing the bearing capacity and stability of various structures, including steel plates and steel profiled fences under impact loads from explosions in the plane of the plate and in the perpendicular direction, have been developed and implemented in software and computational complexes. For further research, the Abaqus CAE software complex was selected in the master's thesis, which allows modeling the operation of structures under static and dynamic loads.
4. In the Abaqus CAE environment, the influence of different schemes for applying a dynamic load in the form of forced deformation and different deformation rates under dynamic loads on the operation of flat steel plates was studied. The properties of five steels with different values of the yield strength and tensile strength, different options for the boundary conditions for fixing the edges of the plate, as well as different sizes of the finite element mesh and initial geometric imperfections were analyzed.
5. The operation of the plates is significantly influenced by the scheme for applying a dynamic load. The constant load and the linear acceleration scheme of the load give

					КМР 2319218 ПЗ	Архив
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		64

a significant difference in the results, and cause dynamic oscillations in the model, which can distort the simulation results. Dynamic effects are more accurately modeled when applying a load with a multi-linear increase in the strain rate.

6. Comparison of the results of the performed simulation with published data from experimental studies of plates under dynamic loading confirmed good convergence of the results and showed that with an increase in the rate of load application, the bearing capacity of the plates increases by approximately 20% at a load application rate of 1 mm/s and up to 50% at 100 mm/s. The geometry and dimensions of the plate do not affect the degree of dynamic increase in the bearing capacity.
7. The nature of the distribution of yield zones on the plate surface depends on the rate of load application. With an increase in the loading rate, the size of the zones in which the plate material passes into the plastic stage also increases.
8. With increasing load application rate, the onset of dynamic strengthening of the plate shifts towards larger deformations, the ultimate bearing capacity of the plate increases, and the zones of plastic deformations expand and the shape of these zones changes.
9. In general, modeling in the Abaqus CAE environment allows you to analyze the operation of flat steel structures under the action of impact loading, but requires careful analysis of the results obtained to screen out undesirable manifestations of the dynamic model, in particular the occurrence of oscillations at high load application rates.

					КМР 2319218 ПЗ	Архив
						65
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 8802:2018 Вироби з тонколистової сталі із захисно-декоративним покриттям для будівництва. Загальні технічні умови. ДП «УкрНДНЦ», Київ, 22 с.
2. Johansson, M., & Laine, L. Explosion at an intersection in an Urban Environment – Experiments and analyses. Vol 1, MSB, 2012.
3. Johansson, M. and Laine, L., 2006, Resistance capacities of buildings for extreme dynamic loading, Research project description, Swedish Rescue Services Agency.
4. Carlsson, M., & Kristensson, R. (2012). Structural response with regard to explosions - Mode Superposition, Damping and Curtailment. Division of Structural Mechanics, Lund University, Master's Dissertation, Sweden.
5. Al-Emrani, M., & Åkesson, B. (2020). Steel structures. Report ACE 2020:13, Chalmers University of Technology, Sweden.
6. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною № 1. К., 2022. – 220 с.
7. Dubina, D., Ungureanu, V., & Landolfo, R. (2012). Design of Cold-formed Steel Structures. ECCS - European Convention for Constructional Steelwork.
8. Paik, J. K., & Thayamballi, A. K. (2003a). Ultimate limit state design of steel-plated structures. John Wiley & Sons Ltd.
9. Yang, B., Soares, G. C., & Wang, D. (2018). An empirical formulation for predicting the dynamic ultimate strength of rectangular plates under in-plane compressive loading. International Journal of Mechanical Sciences, 141, 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.04.015>
10. Kowal-Michalska, K., & Mania, R. (2008). Some Aspects of Dynamic Buckling of Plates Under In-Plane Pulse Loading. Division of Mechanics and Mechanical Engineering, Technical University of Lodz, Publication no. 02:12, Poland, 135-146.
11. Kubiak, T. (2013). Static and Dynamic Buckling of Thin-Walled Plate Structured. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00654-3>.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

12. Paik, J. K., & Thayamballi, A. K. (2003b). An experimental investigation on the dynamic ultimate compressive strength of ship plating. *International Journal of Impact Engineering*, 28(7), 803-811. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00154-9](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00154-9)
13. Кочерженко Олександр Дмитрович. Аналіз напружено-деформованого стану плоских огорожень при дії поперечних навантажень. Кваліфікаційна магістерська робота. ЦНТУ, 2024 р. – 69 с.
14. Rayleigh, Lord, (1877). *Theory of Sound* (two volumes). Dover Publications, USA, reissued 1945, second edition.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Додаток А

ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ МОНТАЖІ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Вимоги до персоналу, що допускається до виробничого процесу

Охорона праці представляє собою систему правових, організаційно-технічних, соціально-економічних, санітарно-гігієнічних засобів, направлених на збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці. Задача охорони праці – звести до мінімуму вірогідність травмування або хвороби працюючих за умови забезпеченням комфорту та максимальної продуктивності праці. Висока кваліфікація персоналу, науково обґрунтовані правила безпеки праці, правильні умови експлуатації технічних засобів та нова техніка є необхідним факторами, що забезпечують безпеку праці, як при розробці проектної документації, так і на будівельному майданчику [1, 11, 24].

При монтажі сталевих конструкцій дотримуються особливих заходів безпеки. Перед допуском робітників до самостійної роботи необхідно їх ознайомити, а потім перевірити знання з організаційних та загальних заходів з охорони праці на будівельному майданчику.

До самостійних верхолазних робіт допускаються лише особи, які досягли повноліття і віком до 60 років, які пройшли повний медичний огляд, мають стаж верхолазних робіт не менше одного року і тарифний розряд не нижче третього. Медичний огляд працівник повинні проходити згідно з «Положенням про медичний огляд працівників визначених категорій». Якщо є необхідність підбору працівників, зв'язаних з роботами, викладеними в «Переліку робіт, де є потреба в професійному доборі», їх необхідно направити на медичну перевірку на психофізіологічні показники. Не можна допускати до роботи з монтажу будівельних конструкцій осіб, які не визнані придатними після медичного огляду, професія і кваліфікація яких не відповідає характеру роботи. Якщо особа знаходиться в нетверезому стані, її необхідно негайно вивести з території

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

монтажної площадки зі складанням акту встановленої форми. Робітники з малим стажем повинні працювати під наглядом досвідчених робітників і майстрів.

Для того, щоб знизити відсоток травматизму працівників на будівництві, необхідно навчити їх правильним прийомам роботи. Перед тим як допустити їх до роботи, з робітниками проводиться ввідний інструктаж інженером з охорони праці або особою, на яку покладено обов'язки інженера по охороні праці.

Інструктаж та навчання усіх працюючих проводиться у вигляді ввідного інструктажу, інструктажу на робочому місці, щоденного (поточного) інструктажу, періодичного (повторного) інструктажу, непланового інструктажу, курсового навчання.

Ввідний інструктаж необхідно проводити з усіма найманим працівниками, незалежно від їх освіти, посади та стажу роботи. Після його проведення в журналі реєстрації робиться відповідний запис з обов'язковим підписом того, кого інструктують та того, хто проводить цей інструктаж. Повторно інструктаж необхідно проводити кожні шість місяців.

Вимоги до будівельно – монтажної площадки

Організація будівельного майданчика (розташування санітарно-побутових зон, складських площадок, огорожень, мереж тимчасового електропостачання, водопостачання і пожежогасіння, тимчасових і постійних доріг і шляхів руху, стоянок для роботи вантажопідіймальних машин і механізмів), повинна відповідати будгеплану підготовчого періоду. Будівельно - монтажна площадка повинна розташовуватися в межах ділянки, яку було відведено для забудови згідно з актом – допуском, оформленим за встановленим порядком. На період інженерної підготовки будівельно – монтажну площадку необхідно звільнити від усіх факторів, що заважають зведенню об'єкта (споруд, будинків, дерев). Після проведення усіх необхідних заходів виконують першочергові роботи по плануванню території, такі як перенесення існуючих підземних і наземних інженерних споруд, влаштування тимчасового стоку поверхневих вод, геодезичну

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

розбивку, будують автодороги, шляхи руху і стоянки вантажопідйомних машин і механізмів, влаштування тимчасового освітлення, мережі водопостачання, енергопостачання і пожежогасіння, зведення усіх необхідних тимчасових будинків і споруд, при цьому використовуючи вже існуючі будинки чи збірно – розбірні і пересувні тимчасові побутові приміщення. Ці будови повинні розташовуватися стосовно об’єктів, які виділяють пил, шкідливі пари і гази (бункерних естакадах, бетонорозчинних вузлах, сортувальних пристроях) на відстані не менше 50 м з навітряного боку вітрів переважного напрямку. Убиральні розміщуються на відстані не більше 100 м від робочих місць і не менше ніж на 15 м від споруджувального об’єкта і існуючих адміністративно – господарських житлових приміщень та не менше ніж на 25 м від джерел водопостачання.

Окремо виділяються при організації будівельно – монтажної площадки ділянки, відведені під монтажні роботи, зони дії вантажопідйомних машин і механізмів, робочі місця, проходи для людей, де виникають небезпечні для працюючих зони, у межах яких постійно діють чи потенційно можуть діяти небезпечні виробничі фактори, такі як неізольовані струмоведучі частини електроустановок, ЛЕП, необгороджені перепади по висоті в 1,3 м і більше, місця, де рівні вібрації, шуму або забруднення повітря перевищують допустимі гігієнічні норми. Така територія має бути огорожена захисним огородженням за ГОСТ 2340 – 78 «Огороження інвентарні будівельних майданчиків і ділянок будівельно – монтажних робіт. Технічні умови.» і ГОСТ 12.4.059 – 89 «Будівництво. Огороження запобіжні інвентарні. Загальні технічні умови.»

Захисне огороження – це пристрої, що призначені для запобігання ненавмисному доступу людей у зону дії небезпечного виробничого фактору.

Зони потенційно діючих виробничих факторів (споруди, поверхи (яруси) будинків і споруд, над якими відбувається монтаж будівельних конструкцій, ділянки поблизу споруджуваного будинку, монтажні зони, зони переміщення машин чи їх частин, робочих органів, місць над якими відбувається переміщення

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

вантажів), необхідно огорожувати сигнальними огороженнями за вимогами ГОСТ 2340 – 78 і ГОСТ 12.4.059 – 89.

Сигнальні огороження призначені для попередження наявності потенційно діючих небезпечних факторів і позначення зон обмеженого доступу. Небезпечними зонами на будівельно – монтажному майданчику є:

- межі дії монтажних кранів і землерийних машин;
- межі котловану та траншеї глибиною більше ніж 1 м;
- місця зварювальних робіт і робіт з легкозаймистими матеріалами;
- зони та ділянки доріг з інтенсивним рухом транспорту.

Зона дії екскаватора, де він є небезпечним, визначається із розрахунку максимального радіусу дії плюс 5 м. Небезпечна зона дії самохідного стрілового крану визначена із розрахунку максимального вильоту стріли плюс 7 м при висоті споруди до 20 м. Грунт, вийнятий з котловану, необхідно розташовувати на відстані не менше 0,5 м від бровки. Для спуску в котлован передбачають драбини (трапи) шириною 0,6 м з перильними огороженнями висотою 1,1 м.

Єдина транспортна мережа будівельного майданчика складається з тимчасових і постійних доріг, що мають кільцеву схему руху. Прокладаються дороги у порядку черговості об'єкту будівництва, відповідно до календарного плану та будгенплану. При русі транспорту в одну сторону ширина дорожнього полотна складає 4,0 м. Для розвантажувальних робіт у зоні дії кранів передбачаються майданчики шириною 7 – 8 м та довжиною 12 – 14 м. Радіус кривизни дороги складає 8 м.

Схема руху транспорту встановлюється на самому в'їзді до будівельного майданчика. Дорожні знаки встановлюються на узбіччях доріг та переїздів, повинні бути добре видимими, бо саме вони регламентують порядок руху транспорту. Швидкість руху знаходиться в межах до 10 км/год на прямих ділянках, та до 5 км/год – на поворотах та на території будівництва.

Під час виконання робіт по переміщенню вантажів у темний час доби будівельно – монтажна ділянка повинна бути добре освітлена. Освітлення здійснюється з переставних інвентарних прожекторних щогл, електроприладів

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

освітлення, що встановлені на металеві конструкції вантажопідіймальних кранів. Розрізняють робоче та охоронне освітлення.

У першому випадку встановлюють прожектори на стовпах із розрахунку не менше 2 лк на рівні землі. Місцеве робоче освітлення здійснюють прожекторами з лампами ДРЛ на металевих полегшених щоглах.

У другому випадку, використовують прожектори загального робочого освітлення із розрахунку, що світла на будівельному майданчику повинно бути не менше 0,5 лк на рівні землі в горизонтальній площині. На електричну частину вищевказаних способів освітлення необхідно розробляти спеціальний проект.

По завершенню всіх підготовчих робіт необхідно скласти акт підготовки площадки. Це документ, що підтверджує готовність будівельно – монтажної площадки до початку монтажу будівельних конструкцій.

Вимоги до складування, зберігання і транспортування матеріалів

Задля ефективного виконання календарного плану будівництва, необхідно встановити в технологічних картах на виконання ВРР чіткий порядок доставки конструкцій на будівельний майданчик з урахуванням технологічної послідовності виконання робіт, розмірів приоб'єктних складів і збірно-укрупнювальних площадок, тип транспорту згідно вантажу, якості доріг, способів укладки і закріплення вантажу, місць розташування вантажопідійомних машин і складування виробів, місцевих кліматичних умов а також забезпечити ритмічний і якісний монтаж будівельних конструкцій. Це реалізується шляхом створення при об'єктах будівництва складів конструкцій і матеріалів. Загальну потребу в складських площах визначають за найбільш інтенсивним періодом виконання монтажних робіт. На центральних складах необхідно мати тримісячний запас металоконструкцій з урахуванням площ для сортування та укрупнювального складання металоконструкцій та півторамісячний запас збірного залізобетону з урахуванням площ для сортування конструкцій. На приоб'єктних складах

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

потрібно мати двотижневий запас металоконструкцій та п'ятиденний – для збірної залізобетонної.

Площадки для складування, укрупнення і зберігання будівельних конструкцій і матеріалів необхідно спланувати, утрамбовувати і у деяких випадках відсипати непросадним матеріалом (гравієм, щебенем, шлаком), що відповідає розрахункам з ухилами для стоку вод. Також необхідно прийняти міри для виключення довільного зміщення конструкцій. Майданчики складування огорожують парканом висотою 1,2 м і обладнують знаками безпеки й табличками з назвами виробів і конструкцій.

Складування матеріалів на відкритому повітрі організовують за затвердженими технологічними картами, де зазначено місця і розміри площадок для складування з розмірами проходів. Технологічна карта складування – це план складу, де позначено місця та розміри штабелів вантажів, проходи для людей, шляхи транспорту, колії рейкових кранів та зони їх дії, місця встановлення самохідних кранів, зупинки транспорту під навантаження та розвантаження.

Будівельні конструкції та матеріали необхідно зберігати з дотриманням певних умов:

- кроквяні і підкроквяні ферми – у вертикальному положенні в спеціальних касетах чи кондукторах;
- ригелі, колони і сталеві балки – у штабелях висотою до 2 м на підкладках і прокладках;
- стінові панелі «сандвіч» - у пакетах висотою штабеля 2,4 м, два пакети по висоті за умов укладання поруч у горизонтальному положенні двох пакетів (в одному пакеті 13 панелей);
- плити покриття і перекриття – у штабелях висотою до 2,5 м на підкладках і прокладках;
- профільовані листи – у пачках, при укладанні поруч двох пачок у плані і двох пачок по висоті до 1,6 м;
- великогабаритне устаткування і його частини – в один ряд на підкладках;

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

- труби діаметром до 300 мм – у штабелях висотою до 3 м у сідло без підкладок. Нижній ряд труб повинен бути покладений на підкладки і укріплений інвентарними металевими башмаками чи кінцевими упорами.

При виконанні вантажно-розвантажувальних робіт слід дотримуватись безпеки праці згідно з вимогами ГОСТ 12.3.009 – 76 «Роботи вантажно – розвантажувальні. Загальні вимоги безпеки» і ДНАОП 0.00 – 1.03.- 93. Якщо вантажно – розвантажувальні роботи виконуються на залізничних коліях, тобто використовується залізничний транспорт, необхідно дотримуватись «Правил техніки безпеки і виробничо санітарної при вантажно – розвантажувальних роботах на залізничному транспорті» Української залізниці. Всі роботи виконуються під керівництвом спеціально призначеної особи.

Для відкривання люків піввагонів, дверей вагонів і бортів платформ необхідно застосовувати спеціальні важелі. Не можна знаходитися в зоні можливого падіння вантажу при відкриванні борту кришки або люка. Вивантажувати вантаж на шляху і між коліями, а також захаращувати колії забороняється. При розвантаженні і укладанні, перед навантаженням у вагони матеріалів і конструкцій поблизу залізничних колій між вантажем і найближчою до нього рейкою повинен бути оставлений прохід шириною 2 м.

Організація праці при виконанні монтажних робіт

Під час монтажу будівельних конструкцій, виробів, трубопроводів і обладнання (далі - виконання монтажних робіт) необхідно передбачати заходи із запобігання негативному впливу на працівників таких небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

- розташування робочих місць поблизу перепаду по висоті 1,3 м і більше;
- машини, що рухаються, переміщення конструкцій чи матеріалів;
- обвалення елементів конструкцій будівель і споруд;
- падіння матеріалів, інструменту;
- виконання робіт у зоні поблизу повітряних ліній електропередачі;

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

- піднімання вантажів, вага яких перевищує вантажопідйомність механізмів;
- недостатня жорсткість конструкції, яка може призвести до її руйнування під час монтажу;
- перекидання машин, падіння їх частин;
- недостатня освітленість робочого місця;
- підвищена напруга в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини.

За наявності небезпечних і шкідливих виробничих факторів, зазначених вище, безпека монтажних робіт повинна бути забезпечена відповідно до цих норм, рішень проектно-технічної документації (ПОБ, ПВР тощо), зазначених заходів безпеки праці:

- точного визначення місця встановлення крана із зазначенням його марки, позначенням небезпечних зон під час його роботи;
- зазначення ваги вантажу, що піднімається;
- забезпечення безпеки робочих місць на висоті;
- визначення послідовності та забезпечення безпечного встановлення конструкцій;
- забезпечення стійкості конструкцій і частин будинку під час зведення;
- зазначення схем і способів укрупнювального складання елементів конструкцій.

Під час монтажних робіт безпеку праці необхідно забезпечувати з урахуванням вимог розділу 7 ДБН А.3.2-2-2009 [1].

У робочій зоні монтажних робіт не допускається виконання інших робіт і перебування сторонніх осіб. Під час зведення будинків і споруд забороняється виконувати роботи, пов'язані з перебуванням людей на одній ділянці на поверхах (ярусах), над якими переміщують, встановлюють і тимчасово закріплюють елементи конструкцій та обладнання.

За неможливості розподілення будинків і споруд на окремі ділянки одночасне виконання монтажних та інших будівельних робіт на різних поверхах (ярусах) дозволяється тільки за наявності між ними надійних (обґрунтованих

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

відповідними розрахунками на дію ударних навантажень) міжповерхових перекрить, що передбачені у ПВР.

Використання встановлених конструкцій для прикріплення до них вантажних поліспастів, відвідних блоків та інших монтажних пристосувань допускається тільки за згодою проектної організації, яка виконала робочі креслення конструкцій.

Установлені в проектне положення елементи конструкцій чи обладнання повинні бути закріплені так, щоб забезпечувалася їх стійкість і геометрична незмінність. Розстропування елементів конструкцій і обладнання, які установлені у проектне положення, необхідно робити після постійного або тимчасового їх закріплення відповідно до проекту. Переміщувати встановлені елементи конструкцій чи обладнання після їх розстропування без використання монтажного оснащення, передбаченого ПВР, не допускається. До закінчення вивіряння і закріплення встановлених елементів не допускається обпирання на них конструкцій, що розташовані вище, якщо це не передбачено ПВР.

Під час насування (переміщення) конструкцій і обладнання лебідками вантажопідйомність гальмових лебідок і поліспастів повинна дорівнювати вантажопідйомності тягових засобів, якщо інші вимоги не визначено проектом. Переміщення конструкцій чи обладнання кількома кранами (або піднімальними чи тяговими засобами) необхідно здійснювати згідно з ПВР під безпосереднім керівництвом осіб, відповідальних за безпечне виконання робіт кранами.

Забороняється виконання монтажних робіт на висоті у відкритих місцях за швидкості вітру 15 м/с і більше, під час ожеледі, грози, туману, що унеможливило б видимість у межах фронту робіт. Роботи з переміщення і встановлення конструкцій, що мають велику парусність, необхідно зупиняти за швидкості вітру 10 м/с і більше.

Під час монтажу конструкцій із рулонних заготовок необхідно вживати заходів з унеможливлення самовільного згортання рулону.

Під час складання горизонтальних циліндричних ємностей, що складаються з окремих царг, необхідно застосовувати клинові прокладки та інші пристосування, що унеможливлюють мимовільне скочування царг.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Укрупнювальне складання конструкцій і обладнання перед монтажем необхідно виконувати у спеціально призначених для цього місцях.

Вимоги безпеки при виконанні монтажних робіт

Монтаж будівельних конструкцій відноситься до робіт з підвищеною небезпекою. Робітники, які виконують монтажні роботи, повинні пройти медичний огляд, спеціальну підготовку, здати іспит і отримати посвідчення на право виконання робіт. Вантажопідйомні машини і такелажні пристосування до початку роботи і в процесі експлуатації повинні проходити технічний огляд. Огляд вантажопідіймальних машин і механізмів проводять щомісяця. Траверси оглядають не рідше одного разу в 6 міс, коуші - через 1 міс, стропи - кожні 10 днів. Зовнішній огляд сталевих канатів слід виконувати щоденно, керуючись нормами вибракування зношених канатів. Такелажні пристосування при огляді випробовують навантаженням, що на 25% перевищує розрахункову вантажопідйомність. Дату випробувань і вантажопідйомність вказують на бирках. Крани слід встановлювати у відповідності з проектом виконання робіт, при цьому слід забезпечити безпечні відстані кранів від ліній електропередачі, укосів котлованів, габаритів будівель і споруд.

Ліси і підмостки повинні мати огороження на рівні робочого місця висотою не менше 1 м. На монтажних роботах використовують типові інвентарні ліси і підмостки. Ліси і підйомні люльки повинні мати паспорти підприємства-виробника.

Монтаж конструкцій виконують відповідно до ПВР. У ньому повинні бути передбачені основні заходи щодо виконання вимог безпеки. Стропування конструкцій виконують стропами або спеціальними вантажозахоплювальними пристроями за схемами, передбачених технологічною картою, із застосуванням напівавтоматичних пристроїв для розстропування з землі. При вільному монтажі підняті елементи необхідно утримувати від розгойдування розтяжками. Конструкції, що не володіють достатньою жорсткістю, треба посилювати згідно з проектом. Розстропування змонтованих елементів здійснюють тільки після

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

надійного їх закріплення. До остаточного закріплення повинна бути забезпечена їх стійкість з допомогою тимчасових в'язей, розчалок, кондукторів і т. п.

Заборонено одночасно проводити монтажні роботи на одній захватці по вертикалі з іншими роботами в нижніх поверхах при висоті будівлі менше п'яти поверхів. Поєднувати ці роботи можна тільки у виняткових випадках.

Монтажники повинні перебувати позаду конструкцій, з протилежного боку її подачі. Складальні операції на висоті здійснюють зі спеціальних помостів або колисок. Монтажники-верхолази повинні мати спеціальний одяг, неслизьке взуття і запобіжні пояси. Для переходу від однієї конструкції до іншої повинні бути передбачені сходи, перехідні містки і трапи.

Майданчик, на якому виконують монтаж, є небезпечною зоною, і перебувати на ній заборонено. Кордон небезпечної зони – це коло радіусом рівним вильоту стріли гака крана, плюс 7...10 м від контуру вантажу, що піднімається (на відстань 7 м може відлетіти вантаж при підйомі його на висоту до 20 м і 10 м – при підйомі на висоту до 100 м). Керувати підйомом конструкцій повинен тільки один чоловік - бригадир монтажної бригади або ланковий. Команду "Стоп!" може подати кожен робітник, який помітив небезпеку.

					КМР 2319218 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		