

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд і технологій

(повна назва факультету)

Кафедра будівельної механіки

(повна назва кафедри)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

**Магістра**

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Моделювання роботи комбінованих тонкостінних  
сталевих конструкцій із пінозаповнювачем**

Виконав: студент VI курсу, групи МБнм-61  
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»  
(шифр і назва спеціальності)

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Франків М. Р.

(прізвище та ініціали)

Керівник

\_\_\_\_\_

(підпис)

Коваль І. В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_

(підпис)

Мещерякова О.М.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_

(підпис)

Ясній В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Кошалко С.А.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд і технологій

(повна назва факультету)

Кафедра Будівельної механіки

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ясній В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

студенту Франківу Миколі Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання роботи комбінованих тонкостінних сталевих  
конструкцій із пінозаповнювачем»

Керівник роботи Коваль Ігор Володимирович, к.т.н. доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 15 » 04 2024 року № 4/7-346

2. Термін подання студентом завершеної роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Стан питання основного напрямку дослідження. Експериментальне дослідження адгезії  
пінополіуретану до металу. Чисельне дослідження балки зі сталевих тонкостінних  $\Sigma$  - профілів  
замкнутого перерізу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

---



---



---



---



---



---

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каспрук В.Б. доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С. ст. викл.		
Нормоконтроль	Мещерякова О.М. ст.викл.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою досліджень		
2	Експериментальне дослідження адгезії пінополіуретану до металу.		
3	Чисельне дослідження балки зі сталевих тонкостінних $\Sigma$ – профілів замкнутого перерізу.		
4	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.		
5	Загальні висновки		

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Франків М. Р.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Коваль І. В.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	8
1.1 Характеристика легких сталевих тонкостінних профілів .....	8
1.1.1 Холодногнутий тонкостінний профіль в будівельних конструкціях .....	8
1.1.2 Класифікація легких сталевих профілів .....	10
1.1.3 Історія розвитку теорії тонкостінних конструкцій .....	13
1.1.4 Втрата стійкості. Місцева втрата стійкості .....	14
1.2 Пошук та аналіз матеріалу для створення комбінованого елемента зі сталевих тонкостінних профілів замкнутого перетину .....	17
1.2.1 Застосування спеціальних матеріалів з легких сталевих тонкостінних конструкцій .....	17
1.3 Матеріал для заповнення внутрішньої порожнини балки замкнутого перерізу .....	18
1.3.1 Конструктивні рішення з комбінованих елементів .....	23
1.4 Висновки за розділом .....	25
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЇ ПІНОПОЛІУРЕТАНУ ДО МЕТАЛУ .....	26
2.1 Зразки для експериментального дослідження адгезії пінополіуретану до металу .....	26
2.2 Висновки за розділом 2 .....	31
РОЗДІЛ 3 ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БАЛКИ ЗІ СТАЛЕВИХ ТОНКОСТІННИХ $\Sigma$ - ПРОФІЛІВ ЗАМКНУТОГО ПЕРЕРІЗУ .....	32
3.1 Числове моделювання .....	33
3.2 Визначення значення критичного напруження втрати стійкості .....	34
3.3 Результати чисельного розрахунку .....	36
3.4 Висновки за розділом .....	41
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	42
4.1 Охорона праці .....	42

4.1.1 Інженерні рішення з охорони праці .....	42
4.1.2 Огородження території.....	44
4.1.3 Визначення небезпечних зон на будівельному майданчику .....	44
4.1.4 Організація безпечних умов праці земляних робіт .....	45
4.1.5 Організація безпечних умов праці бетонних робіт .....	45
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях .....	48
4.2.1 Законодавча база України .....	48
4.2.2 Стійкість будівлі від ударної хвилі .....	48
4.2.3 Заходи при землетрусі .....	52
4.2.4 Системи сейсмозахисту будівель і споруд.....	53
4.2.5 Заходи щодо підвищення стійкості об'єкта.....	54
4.3 Висновки до розділу 4 .....	55
ВИСНОВКИ.....	57
БІБЛІОГРАФІЯ .....	59

## ВСТУП

В умовах активного розвитку сегмента інноваційних будівельних технологій постійно збільшується кількість проектно-будівельних компаній, що пропонують клієнтам сучасні та економічно обґрунтовані комплексні будівельні системи і послуги.

До числа подібних пропозицій сьогодні належить і швидке будівництво будівель і споруд з металевим каркасом з ЛСТК (легких сталевих тонкостінних конструкцій). Цю технологію будівництва будівель і споруд досить широко й ефективно використовують у багатьох країнах.

Легкі сталеві тонкостінні конструкції (ЛСТК) є однією з галузей широкого класу легких металевих конструкцій (ЛМК). Характерними рисами ЛМК і ЛСТК є: мала металоємність, висока технологічність і пристосованість для виготовлення на потокових автоматизованих лініях, легкість транспортування, а також для конвеєрно-блокових та інших швидкісних методів монтажу; високий ступінь заводської готовності, можливість комплектного постачання цілих будівель-модулів і їхніх несучих конструкцій. Основним елементом ЛСТК є тонкостінний холодногнутий оцинкований профіль.

Однією з основних переваг ЛСТК є невелика вага конструкцій, тому в даній роботі розглядається можливість збільшення несучої здатності без істотного збільшення загальної ваги конструкцій за рахунок застосування спінених матеріалів.

**Мета роботи:** визначення несучої здатності балки із легкого сталевого холодногнутого оцинкованого профілю замкнутого перерізу заповненої спіненим матеріалом.

**Об'єкт досліджень** – балка із легкого сталевого холодногнутого оцинкованого профілю замкнутого перерізу заповнена спіненим матеріалом.

**Предмет дослідження** – напружено-деформівний стан (НДС) балки із легкого сталевого холодногнутого оцинкованого профілю замкнутого перерізу заповнена спіненим матеріалом.

**Доцільність проведення досліджень** зумовлена тим, що отримані результати дадуть можливість підвищити економічність покрить швидкокомтованих блочних будівлях.

**Завдання роботи:**

- провести аналіз матеріалу для створення комбінованого елемента із легкого сталевих тонкостінного профілю замкнутого перерізу із заповненням внутрішньої порожнини;
- визначити адгезію піни до металу;
- виконати чисельне дослідження балок із легких сталевих тонкостінних профілів замкнутого перерізу як пустотілих, так і із заповненням внутрішньої порожнини спіненим матеріалом;
- провести аналіз чисельних результатів для подальшого випробування конструкції із легких сталевих тонкостінних профілів замкнутого перерізу як порожнистих, так і із заповненням внутрішньої порожнини спіненим матеріалом і оцінити ефективність прийнятого конструктивного рішення.

**Методи дослідження** – скінченно-елементне моделювання будівельних конструкцій.

**Галузю застосування** результатів роботи є проектування нових, реконструкція та експлуатація існуючих будівель виконаних із ЛСТК.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому що встановлено вплив заповнювача у вигляді спіненого матеріалу на несучу здатність балки із легкого сталевих холодногнутого оцинкованого профілю.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що отримала подальший розвиток методика моделювання НДС балки із легкого сталевих холодногнутого оцинкованого профілю замкнутого перерізу заповнена спіненим матеріалом.

**Апробація результатів** магістерської роботи виконана роботи виконана на XII Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів( Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя 6-7 грудня 2023 року) та на VII Міжнародній студентській науково-технічній

конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 25-26 квітня 2024 року.).

**Публікація результатів магістерської роботи** здійснена у збірнику тез вищезазначених конференцій.

Робота виконана згідно з тематикою науково-дослідних робіт кафедри будівельної механіки ТНТУ та державними програмами надійності і економічності будівельних виробів, матеріалів і конструкцій.

**Ключові слова:** ЛСТК, балка, заповнювач.



## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1 Характеристика легких сталевих тонкостінних профілів

##### 1.1.1 Холодногнутий тонкостінний профіль в будівельних конструкціях

Нині найефективнішою технологією будівництва споруд, що швидко зводяться, є використання каркасної системи з легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК).

Однак така важлива властивість, як легкість, може помітно позначитися на несучій здатності конструкції. Тому легкі сталеві тонкостінні конструкції (ЛСТК) перед їхнім впровадженням у будівництво мають бути піддані ретельному аналізу щодо несучої здатності.

Основним будівельним елементом ЛСТК є тонкостінний холодногнутий профіль, виготовлений на профілезгинальному обладнанні з високоміцної низьковуглецевої оцинкованої сталі.

Основною відмінністю ЛСТК від інших сталевих конструкцій є застосування холодноформованих профілів з оцинкованої сталі товщиною від 1 до 4 мм. Це дає низку переваг ЛСТК перед традиційними конструкціями з гарячекатаного прокату:

Таблиця 1.1 - Основні переваги ЛСТК

№	Перевага використання ЛСТК	Примітка
1	Зменшення витрат на будівництво	<ul style="list-style-type: none"> <li>– зниження трудовитрат, можливість монтажу без застосування кранів та інших вантажопідйомних механізмів</li> <li>– зниження витрат на влаштування фундаментів завдяки зниженню ваги конструкцій (економія на нульовому циклі до 30-60%)</li> <li>– високий ступінь заводської готовності компонентів, простоти й уніфікації складальних елементів</li> <li>– низькі експлуатаційні витрати</li> </ul>

Закінчення таблиці 1.1

№	Перевага використання ЛСТК	Примітка
1	Зменшення витрат на будівництво	<ul style="list-style-type: none"> <li>– готовність внутрішньої поверхні під чистове оздоблення</li> <li>– економія оздоблювальних матеріалів завдяки високій точності та правильній геометрії металоконструкцій</li> <li>– висока контрольованість використовуваних матеріалів</li> <li>– відносно невисокі трудовитрати на будівництво</li> </ul>
2	Скорочення термінів будівництва	– відсутність "мокрих" процесів і висока швидкість монтажу
3	Екологічність матеріалу	<ul style="list-style-type: none"> <li>– можливість рециркуляції металоконструкцій необмежену кількість разів</li> <li>– не вбирає і не виділяє хімікати</li> <li>– скорочення витрат первинної енергії (необхідність підігріву бетону і його компонентів у процесі приготування, транспортування і застигання)</li> </ul>
4	Висока точність виготовлення	– забезпечується мінімально допустимими похибками під час виробництва на заводі і дає змогу скоротити витрати на вирівнювання і доопрацювання конструкцій на будмайданчику, а також забезпечує швидкий і точний монтаж інших елементів будівлі (вікон, дверей, фасадів, обладнання).
5	Можливість індивідуальних архітектурно-планувальних рішень	
6	Можливість економічного будівництва в складних кліматичних зонах (сейсмонебезпечні райони)	
7	Технічні переваги	<ul style="list-style-type: none"> <li>– енергоефективність, зниження експлуатаційних витрат на опалення та кондиціонування</li> <li>– збільшення внутрішніх площ завдяки малій товщині стін за збереження тих самих теплотехнічних характеристик</li> <li>– мала вага конструкції</li> <li>– стійкість до динамічних навантажень</li> <li>– вогнестійкість</li> <li>– довговічність, термін служби сталі близько 100 років</li> <li>– можливість позасезонного будівництва завдяки "сухості" процесу</li> <li>– можливість ефективного ремонту та реконструкції</li> </ul>

Галузь застосування сталевих тонкостінних конструкцій: малоповерхові будівлі житлового [2] і громадського призначення, промислові об'єкти, об'єкти

реконструкції [3] і спеціальні конструкції.

### 1.1.2 Класифікація легких сталевих профілів

Аналіз світових тенденцій у будівництві та застосуванні будівельних матеріалів приводить до висновку, що застосування гнутих профілів у будівництві швидкокомтованих будівель рік від року розширюється і зачіпає все нові типи конструкцій, водночас відстежується тренд до зменшення товщини таких профілів; для запобігання втраті місцевої стійкості в таких профілях ЛСТК часто влаштовують поздовжнє гофрування.

Основні конструктивні елементи швидкокомтованої будівлі - оцинкований профіль і профлист - виготовляються за технологією холодного формування сталеві стрічки при прокаті. Ця технологія вже давно і широко застосовується в різних галузях промисловості, глибоко розвинена і вивчена, не вимагає використання великої кількості ручної праці, обладнання, ресурсів, що дає змогу одержувати високоточну геометрію та стабільні властивості готової продукції з гарантованими параметрами (площа перерізу, моменти опору, осьові моменти інерції, радіуси інерції).

Тонкостінний профіль є стрижнем, у якого всі три характерні розміри істотно відрізняються: товщина стінки набагато менша за протяжність профілю поперечного перерізу, яка, своєю чергою, набагато менша за довжину стрижня (рисунок 1.1).

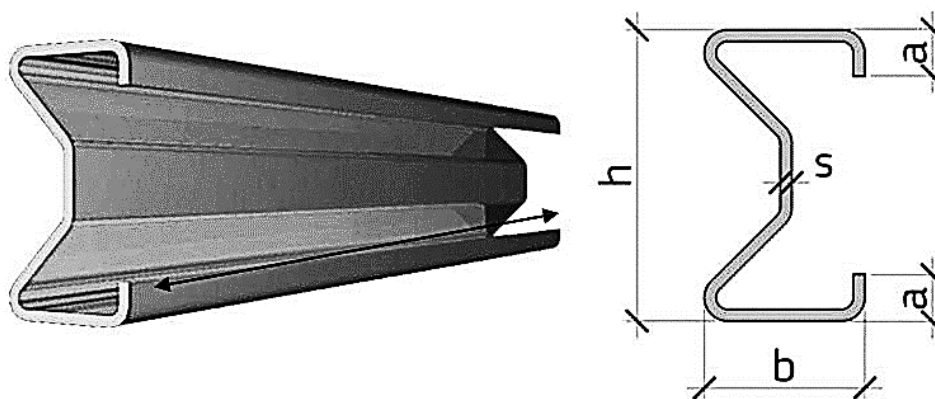


Рисунок 1.1 - Схема тонкостінного стрижня

Сортамент тонкостінних холодногнутих профілів різноманітний [3], залежно від призначення профілю використовують різні форми перерізу (рисунок 1.2).

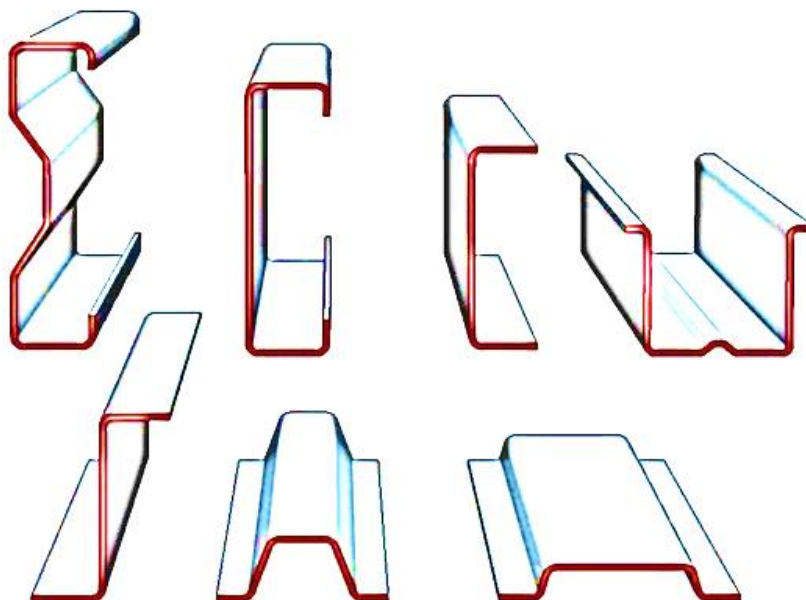


Рисунок 1.2 - Сортамент перерізів тонкостінних профілів (С,  $\Sigma$ , П-подібні)

Найпоширенішими перетинами тонкостінних профілів для несучих конструкцій є С,  $\Sigma$ , Z-подібні перетини. Так само використовуються складові перерізи, що складаються з двох і більше поодиноких профілів (рисунок 1.3).

Для з'єднання поодиноких профілів у складові використовуються самонарізні гвинти, заклепки, болти. Зварне з'єднання для тонкостінних профілів застосовується вкрай рідко, оскільки невелика товщина профілів підвищує ризик наскрізного проварювання, а також призводить до порушення цинкового покриття.

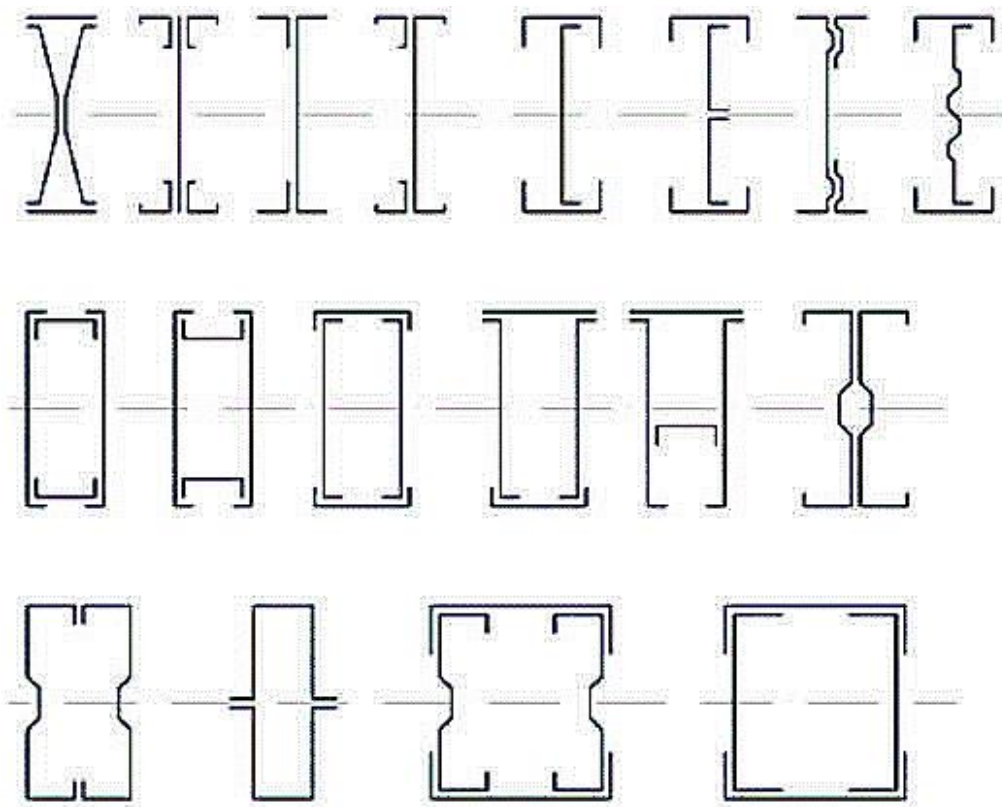


Рисунок 1.3 - Складені перерізи елементів конструкцій зі сталевих тонкостінних, холодногнутих профілів

Тонкостінні профілі можна розділити на дві категорії (рисунок 1.4):

- відкритого перетину;
- замкнутого (закритого) перерізу.

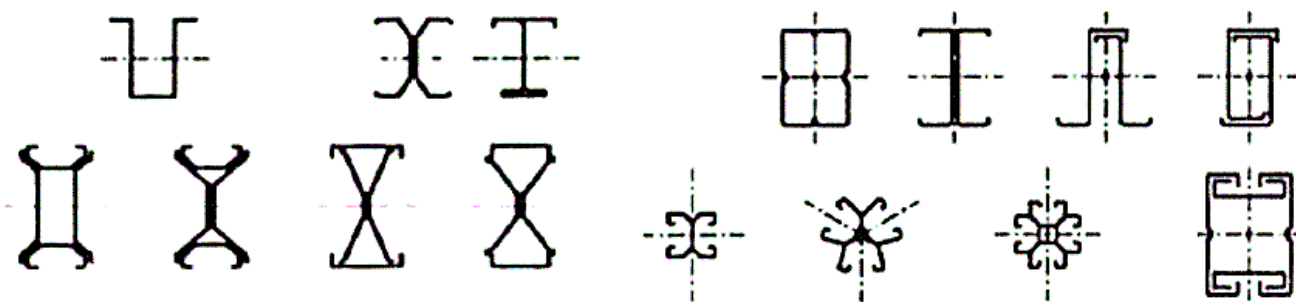


Рисунок 1.4 - Відкриті та замкнуті перерізи елементів конструкцій зі сталевих тонкостінних, холодногнутих профілів

### 1.1.3 Історія розвитку теорії тонкостінних конструкцій

Теоретична основа роботи тонкостінних холодногнутих профілів була розроблена в ХХ столітті. Неоціненний внесок у розвиток загальної теорії вигину, крутіння і стійкості тонкостінних стрижнів довільного відкритого профілю вніс С.П. Тимошенко С.П. [4, 5]. Тимошенко вивів точний розв'язок визначення центру вигину перерізу. Роботи С.П. Тимошенка стали основоположними в дослідженнях К. Вебера, Г. Вагнера, Ф. і Г. Блейхі. К. П. [6] незалежно один від одного вивели формулу для визначення критичної стисливої сили під час кручення.

Розвиток емпіричної формули І. Ходкінсона і теоретичних висновків Дж. Браїана задачі стійкості стиснутих прямокутних пластин з різними граничними умовами, включно з пластинами з поздовжніми ребрами жорсткості, були детально викладені в його дослідженнях.

Неоціненний внесок у теорію тонкостінних стрижнів зробив радянський учений В.З. Власов. Він розвинув беззсувну теорію довільно навантажених тонкостінних стрижнів відкритого профілю в 1930-х роках[7] Побудована ним теорія дала змогу дати вичерпне розв'язання задачі про вигинно-крутильну форму втрати стійкості та коливання тонкостінних пружних стрижнів..

Загальну теорію деформації тонкостінного стрижня закритого профілю розроблено та проаналізовано роботу стрижнів у закритичній стадії [7,8]. Роботою тонкостінних стрижнів у закритичній стадії також займалися Б.М. Броуде,[8] Г.Г. Голенко, А.В. Геммерлінг, Т. Карман, Л. Доннел, Е. Шехлер та інші.

Інженерний підхід щодо врахування місцевої втрати стійкості перерізу шляхом "виключення" ділянок перерізу з роботи запропонував Т. Карман, увівши тим самим поняття "ефективного" перерізу. Втрата форми перерізу тонкостінного холодногнутого профілю, за якої місцева втрата стійкості стінок і полиць перерізу відбувається одночасно, була відзначена в роботах М. Л. Шарпа й експериментах Д. Б. Двігхта. Питаннями місцевої втрати стійкості згодом

займався Т. Пекоч, Б.В. Шафер. Пізніше їхні роботи [13, 14] були пов'язані з оцінкою впливу залишкових напружень на несучу здатність тонкостінного холодногнутого профілю. Дослідженню втрати форми перерізу приділив особливу увагу у своїх роботах Г.Д. Хенкок [15] спільно з Ю.Б. Квон [16] і С.К.В. Лау[17] Останні роботи Г.Д. Хенкока пов'язані з дослідженням задач стійкості на основі напіваналітичного методу скінченних смуг. Питання втрати форми перерізу актуальні й сьогодні, дослідження проводяться на базі відомих інститутів.

Завданнями чисельного моделювання тонкостінних стрижнів на основі методу скінченних елементів, методу скінченних смуг на сьогодні займаються Б.В. Шафер,[18] Г.Д. Хенкок,[19] Д. Камотім, К. Саад та інші.

До числа сучасних зарубіжних учених, які також сьогодні досліджують питання роботи тонкостінних холодногнутих конструкцій, належать К.Д.Р. Расмуссен, М. Хейнісуо, Х. Пастернак, Р. Ландольфо, Ф.М. Маццолані та інші. Результати досліджень останніх років викладено в посібниках і звітах відомих зарубіжних інститутів.

Останніми роками було проведено велику кількість експериментальних досліджень холодногнутих профілів різного перерізу [25-28]: двотаврових складових, С-подібних, Z-подібних, швелерних, зокрема суцільних і перфорованих. Однак лабораторні випробування і теоретичний аналіз дійсної роботи балок зі сталевих тонкостінних профілів замкнутого перерізу заповнених спіненим матеріалом не виконувалися.

Таким чином, через відсутність експериментально-теоретичних даних щодо роботи балок зі сталевих тонкостінних профілів замкнутого перерізу, заповнених спіненим матеріалом тема дослідження є актуальною.

#### **1.1.4 Втрата стійкості. Місцева втрата стійкості**

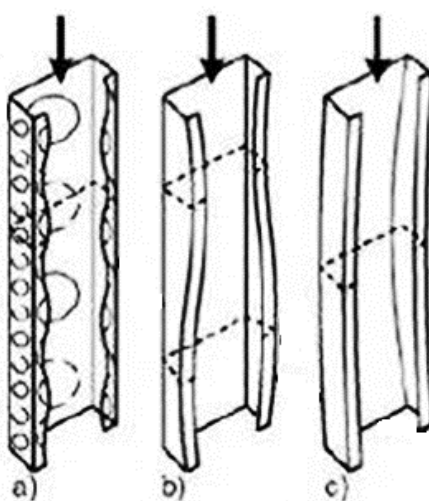
До середини ХІХ ст. вважали, що якщо напруження, які виникають в

елементі, не перевищують величини, що залежить від механічних властивостей матеріалу, то експлуатаційна надійність конструкції забезпечена. Однак поява конструкцій, до складу яких входять довгі стиснуті стрижні, змусила переглянути вкорінену точку зору. Після вивчення низки аварій, що сталися, було встановлено, що вони сталися внаслідок недостатньої стійкості стиснутих стрижнів.

Фізичною ознакою стійкості або нестійкості форми рівноваги слугує поведінка навантаженої пружної системи в разі її відхилення від розглядуваного положення рівноваги на деяку малу величину. Якщо система, відхилена від положення рівноваги, повертається в початкове положення після усунення причини, що викликала відхилення, то рівновага стійка. Якщо відхилення не зникає, а продовжує зростати, то рівновага нестійка.

Для тонкостінних стрижнів існує три основні форми втрати стійкості: місцева (локальна), втрата форми перерізу, загальна (рисунок 1.5).

Особливість роботи тонкостінних стрижнів полягає в тому, що вичерпання несучої здатності може настати як унаслідок втрати загальної стійкості елемента, так і в результаті іншої форми втрати стійкості елемента.



а)- місцева втрата стійкості;  
б)- втрата форми перерізу; с) - загальна втрата стійкості.

Рисунок 1.5 - Форми втрати стійкості



Під час поступового навантаження стрижня з ЛСТК профілю осьюовою центральною силою для "коротких" стрижнів першим лімітуючим фактором буде місцева втрата стійкості (точка А), для "довгих" - загальна вигинна форма втрати стійкості (точка Б). Тому після розрахунків визначальної граничної сили та згинального моменту місцевої та дисторсійної втрати стійкості слід виконати перевірку стрижня на загальну стійкість. У Єврокодi 3 [16] переріз тонкостінного профілю розглядають як сукупність пластин із різними граничними умовами, стійкість яких і визначають розрахунками.

Розрахунки надзвичайно громiздкі, особливо за наявності численних елементів жорсткості, і в реальній інженерній практиці виконувати їх дуже складно і трудомістко.

Суть розрахунків полягає у визначенні ефективної (реально працюючої) площі та ефективного моменту опору поперечного перерізу ЛСТК профілю.

Проблемами загальної та місцевої стійкості тонкостінних стрижнів займалося багато вчених, основними вважаються роботи Блейха, Брезіни, Колбруннера, Налешкевича і Вольміра.

Спочатку розглядали два випадки втрати стійкості тонкостінного стрижня: загальна (самого стрижня) і місцева (його стiнок). Втрата загальної стійкості може статися в разі осьюового стиснення, позацентрового стиснення, розтягування або вигину стрижня. Пізніше дослідниками було введено поняття "втрата форми перерізу".

Під час стиснення стрижнів малої та середньої довжини проявляється найбільший вплив кручення і можливість втрати місцевої стійкості стiнок, які найчастіше мають контури пластинок. При стисненні стрижнів великої довжини - загальна втрата стійкості. Аналіз низки досліджень показав, що один і той самий переріз тонкостінного стрижня за різної довжини стрижня поводитиметься по-різному, тобто переважною будуть різні форми втрати стійкості, і, навпаки, за однакової довжини різні перерізи матимуть різні властивості. Наприклад, у роботах Блейха Ф., Вольміра А.С. та ін. наводять графіки залежності гнучкості від

довжини, які показують, що місцеве випучування є вирішальним у стрижнях завдовжки до 1,25 м незалежно від розмірів перерізу.

Також у багатьох роботах показано, що зміна конфігурації перерізу (наприклад, додавання відгинів) різко збільшує опір місцевій втраті стійкості, але мало впливає на опір вигинокрутільній втраті загальної стійкості та вимагає розрахунку з урахуванням "спотворення" перерізу. Отримати загальні залежності гнучкості та довжини вельми важко у зв'язку з різноманіттям профілю, що випускається нині.

Втрата місцевої стійкості зовні проявляється у вигляді хвилястості полиці та випучуванні ділянок стінки. Зазвичай втрата місцевої стійкості в стиснутій зоні перерізу відбувається на ранніх стадіях навантаження, за рівня напружень, істотно нижчого від розрахункових значень, але це не означає досягнення профілем граничного стану, переріз загалом залишається працездатним, має достатній запас за несучою здатністю і може сприймати зовнішнє навантаження.

## **1.2 Пошук та аналіз матеріалу для створення комбінованого елемента зі сталевих тонкостінних профілів замкнутого перетину**

### **1.2.1 Застосування спеціальних матеріалів з легких сталевих тонкостінних конструкцій**

Однією з основних переваг ЛСТК є невелика вага конструкцій, тому в даній роботі розглядається можливість збільшення несучої здатності без істотного збільшення загальної ваги конструкцій за рахунок застосування спінених матеріалів.

Заповнення сталевих і алюмінієвих конструкцій спіненими матеріалами активно застосовують у галузі авіаційного та автомобільного машинобудування, з метою підвищення жорсткості та міцності конструкцій. [20, 21]

У статтях, [22] автор досліджує сталеві тонкостінні труби на осьове стиснення із заповненням внутрішньої порожнини такими матеріалами, як

алюмінієва піна, два типи алюмінієвих сот і пінополіуретан. Автор підкреслює, що під час заповнення сталевих труб спіненим матеріалом відбувається поглинання і перерозподіл навантаження, внаслідок чого збільшується несуча здатність. Так само автор зазначає, що жорсткий пінополіуретан є найбільш ефективним заповнювачем, і сприяє найбільшому збільшенню міцності конструкції.

Застосуванню спіненого матеріалу як заповнювача для несучих будівельних конструкцій зі сталевих тонкостінних профілів коробчастого перерізу безпосередньо у сфері будівництва присвячена робота David Camenish Gelder, [23] у якій проводять натурний експеримент сталевих колон замкнутого перерізу із заповненням внутрішньої порожнини пінополістиролом, а також чисельний експеримент. Для експерименту використовувалися готові пінополістирольні вставки, з'єднані з профілями за допомогою клею. За результатами чисельного моделювання автор відзначає ефективність заповнювача, і наголошує, що найбільших результатів можна досягти, якщо процес хімічного заповнення профілів спіненим матеріалом здійснити безпосередньо в готовий профіль, що зробить конструкцію більш монолітною.

### **1.3 Матеріал для заповнення внутрішньої порожнини балки замкнутого перерізу**

У цій роботі підбір спіненого матеріалу для заповнення внутрішньої порожнини замкнутого профілю здійснювали на підставі низки параметрів, як-от довговічність матеріалу, особливості монтажу, характеристики міцності, адгезія з іншими матеріалами, вогнестійкість тощо.

Передбачається, що висока щільність спіненого матеріалу зменшить вм'яття стінок складеного перерізу балки, а адгезія матеріалу, завдяки утриманню стінок, буде перешкоджати їхньому випучуванню, що збільшить стійкість стінок і відповідно підвищить несучу здатність усієї конструкції.

Оскільки в профілі матеріал буде прихований, простежити за його поведінкою під час експлуатації досить складно. При цьому важливо, щоб геометричні характеристики матеріалу залишалися в первісному стані, звідки випливає висновок, що кращими є матеріали з найбільшими характеристиками міцності, довговічні, стійкі до перепадів температур, вогнестійкі.

На підставі вище сказаного для заповнення внутрішньої порожнини замкнутого перерізу легких сталевих тонкостінних оцинкованих профілів були розглянуті два варіанти газонаповнених пластмас, такі як карбамідно-формальдегідний пінопласт (піноізол) і пінополіуретан (ППУ). Нині як піноізол, так і пінополіуретан у великих промислових масштабах застосовують як утеплювач.

Піноізол - це рідкий карбамідно-формальдегідний пінопласт, твердіння якого відбувається при досить невисокій температурі (всього +15С). Цей факт дає змогу заливати піноізол у стіни будівель. Піноізол має однорідну дрібнопористу структуру і добре приймає форму заповнюваних пустот, практично виключаючи ймовірність того, що залишаться хоч якісь незаповнені зони. При цьому його обсяг під час затвердіння не збільшується, що звільняє від необхідності проведення додаткових розрахунків. Піноізол не горить, і під час плавлення під дією високих температур не виділяє токсичних газів. Піноізол є універсальним теплоізоляційним матеріалом, який отримав розвиток у 1930-х роках у Німеччині та дуже активно застосовувався там, особливо в 50-і роки. У нашій країні цей матеріал має кілька назв, залежно від його виробника: піноізол, міпора, юніпол, меттемпласт.

Однак існує і низка недоліків піноізолу. Внаслідок усадки цього заповнювача з плином часу в ньому можуть утворюватися наскрізні тріщини. Це є причиною зниження його властивостей. Так само піноізол має відкриту пористу структуру, тому вимагає досить надійного захисту від вологи.

Переваги піноізолу:

- екологічність;

- досить низька температура затвердіння;
- не горить і не виділяє токсичних газів під час плавлення;
- добре приймає форму пустот і не розширюється під час затвердіння.

Недоліки піноізоли:

- при усадці можуть з'являтися тріщини;
- вимагає надійного захисту від вологи.

Пінополіуретан є далеким родичем піноізолів, оскільки його також було відкрито в Німеччині німецьким хіміком Байером, але вже 1947 року. Пінополіуретан - полімерний матеріал, що є різновидом пластмаси. Він утворюється під час реакції двох, а іноді й більше компонентів.

Пінополіуретани поділяють на жорсткі, еластичні та інтегральні. У цій роботі розглядаються саме жорсткі пінополіуретани, які набули широкого поширення в будівництві як теплоізоляційні матеріали. Жорсткі пінополіуретани також, як і піноізоли, мають дрібнопористу структуру. На відміну від піноізоли, жорсткий пінополіуретан має вищу щільність - від 12 кг/м<sup>3</sup> і вище, а також непогану еластичність, що робить його міцнішим.

Пінополіуретан не обсипається і не кришиться.

Переваги:

- висока адгезія до різних матеріалів (метал, деревина, скло, камінь);
- високі характеристики міцності;
- висока шумо- і теплоізоляція;
- екологічність (не містить токсичних сполук);
- довговічність (термін служби 50 років);
- стійкість до перепадів температури;
- не підтримує горіння.

Недоліки:

- відносно висока вартість;
- не стійкий до ультрафіолетового випромінювання; Порівняємо два ці матеріали за технічними параметрами.

Порівнюємо матеріали з боку пожежної безпеки. Піноізоли належать до класу горючості Г2, тобто до групи матеріалів, які не здатні до самостійного горіння. Пінополіуретани відносяться до класу горючості Г3 і Г4 залежно від марки, які є важкогорючими і самозатухаючими або горючими в зоні дії відкритого вогню.

Якщо порівняти два матеріали на взаємодію з водою або парою, то піноізоли мають відносно високе вологопоглинання - 18-20%, тому такі утеплювачі бояться вологи. Під дією надмірної вологості піноізол руйнується, тому для такого матеріалу потрібна додаткова паро- і вологоізоляція.

Пінополіуретани мають мінімальне водопоглинання завдяки своїй структурі із закритою пористістю. Пінополіуретан буде додатковим антикорозійним захистом і захистом від вологи. На покриттях з пінополіуретану виключена поява конденсату.

У плані фізико-механічних властивостей піноізол поступається пінополіуретану. Піноізол не завжди актуальний у плані застосування теплоізоляційного матеріалу, який може піддаватися механічному впливу. Пінополіуретан досить міцний і еластичний матеріал, який може витримувати усадку будівлі, ходьбу та інші впливи залежно від обраної щільності пінополіуретану.

Морозостійкість пінополіуретану до 300 циклів, тоді як оптимальним температурним режимом для експлуатації піноізолів є від 0 до + 40 °С.

Основні технічні показники порівнюваних матеріалів зведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Технічні показники матеріалів

Характеристики	Піноізол	Пінополіуретан
1	2	3
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	10-25	12-300
Межа міцності, МПа:		
На стиснення	0,005-0,35	0,1-0,7
На вигин	0,01-0,25	0,15-1,0
На розтягнення	0,05-0,08	0,1-0,6

Продовження таблиці 1.2

1	2	3
Паропроникність, мг/(м-год-Па)	0,1-0,14	0,02 - 0,05
Вологопоглинання, %	18-20	1-2,1
Горючість	Г2	Г3-Г4
Діапазон експлуатаційних температур, °С	Від -50 до +80	Від -100 до +100
Термін експлуатації, років	30	50
Усадка, %	до 5	-

\* Дані, представлені в таблиці, є усередненими показниками і на пряму залежать від виробника матеріалу

На підставі порівняння піноізолу і пінополіуретану, в даній роботі вирішено використовувати для заповнення тонкостінної балки замкнутого перерізу пінополіуретан, так як він має високу щільність, гарну адгезію до різних матеріалів, не схильний до усадки і довговічний з терміном експлуатації 50 років.

Аналізуючи ринок пінополіуретанової продукції і оцінюючи можливості проведення експерименту, обрано двокомпонентний пінополіуретан. Застосування однокомпонентного поліуретану, найпоширенішого на ринку продукції, недоцільне, оскільки для його використання необхідний вміст вологи в повітрі для розширення, а під час заповнення замкненої балки цю умову важко виконати, що призводить до утворення порожнеч і не повного заповнення порожнини балки. Застосування найскладніших поліуретанів виробляють у великих промислових обсягах, тому воно недоцільне на даній стадії експерименту. Двокомпонентний пінополіуретан є найоптимальнішим варіантом, тому що він є саморозширювальним, а хімічна реакція відбувається без доступу вологи, що дає змогу використовувати його під час заповнень у місцях з обмеженим доступом повітря.

Таблиця 1.3 - Характеристика пінополіуретану

№	Основа	Поліуретановий полімер
1	2	3
1	Швидкість затвердіння	6 хвилин
2	Структура піни	76 % закритих комірок
3	Щільність	Близько 42 кг/м <sup>3</sup>
4	Термостійкість	Від -40 до +100 °С
5	Вогнестійкість	В2
6	Водопоглинання	0,23 кг/м <sup>2</sup>
7	Міцність при зсуві	119 кПа
8	Міцність при розтягуванні	212 кПа
9	Міцність при стисненні	95 кПа
10	У-подовження при розриві	25,5 %
11	Зміна лінійних розмірів	5%

Властивості:

- швидке затвердіння, незалежно від рівня вологості в повітрі;
- висока стабільність (ніякої усадки або подальшої експансії);
- висока зчіплюваність до будівельних поверхонь;
- наповнення безпечно для довкілля.

### 1.3.1 Конструктивні рішення з комбінованих елементів

Для утворення несучих елементів із замкнутим перерізом ухвалено рішення використовувати різнополичні профілі товщиною 1,0 мм. Дані профілі мають різну ширину полиць  $B_1$  і  $B_2$  з урахуванням що:

$$B_1 = B_2 - 2t,$$

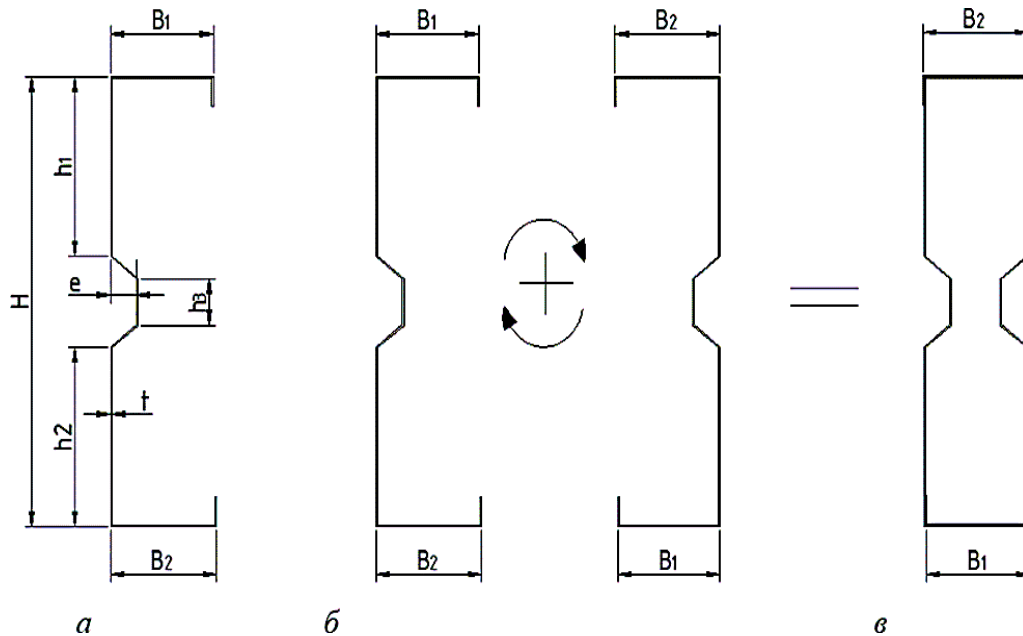
де  $B_1$  - ширина меншої полиці;

$B_2$ - ширина більшої полиці;

$t$  - товщина металу профілю.



Для утворення замкнутого коробчатого перерізу два  $\Sigma$  - профілі розташовані внутрішньою поверхнею один до одного, і розгорнуті так, щоб велика полиця  $B_2$  одного профілю під час сполучення розташовувалася над меншою полицею  $B_1$  іншого профілю (Рисунок 1.6).[24, 25, 26].



а)– форма перерізу  $\Sigma$  -профілів; б) - розгорнуті профілі для утворення коробчатого перерізу; в) - коробчатий переріз несучих елементів.

Рисунок 1.6 - Утворення коробчатого перерізу несучих елементів

У даній роботі для виготовлення несучих елементів, балок використовуються  $\Sigma$  -профілю з наступними параметрами:  $B_1 = 78$  мм;  $B_2 = 80$  мм;  $H = 300$  мм;  $h_1 = h_2 = 120$ ,  $h_3 = 20$  мм;  $t = 1$  мм.

Довжина балок складеного перерізу прийнята з урахуванням співвідношення 1/12 довжини до висоти перерізу. Довжина балок  $L = 6000$ мм. Між собою  $\Sigma$  -профілі скріплені витяжними заклепками  $d = 5$ мм, з кроком 250мм (Рисунок 1.7).

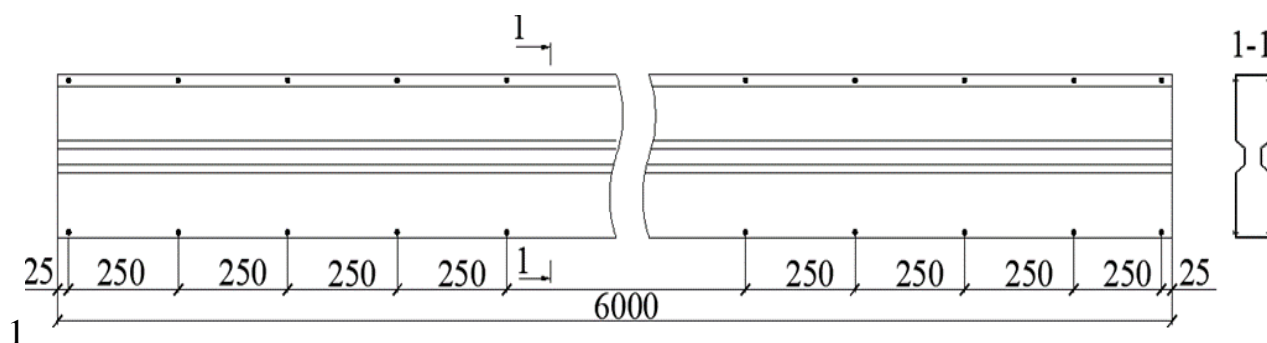


Рисунок 1.7 - Балка складеного перерізу

#### 1.4 Висновки за розділом

Згідно з результатами проведення огляду літератури, впливає, що основна частина дослідження заповнення спіненими матеріалами сталевих і алюмінієвих конструкцій припадає на сферу авіаційного та автомобільного машинобудування, в той час як у галузі будівельних конструкцій дане дослідження є маловивченим. Тому вивчення застосування таких матеріалів, як легкі сталеві тонкостінні конструкції є актуальною темою для дослідження.

Для досягнення мети дослідження проведено аналіз різних матеріалів таких як: ЛСТК і пінозаповнювачі. Представлено конструктивні рішення утворення замкнутого перерізу різнозмугових -профілів з наступними параметрами: довжина 6000 мм, ширина 80 мм, висота 300 мм. Виконано порівняння технічних характеристик піноізолу і пінополіуретану, для заповнення балок замкнутого перерізу. Для подальшої роботи прийнято двокомпонентний пінополіуретан, що має найкращі характеристики, як-от хороша адгезія до різних поверхонь матеріалу, відсутність усадки і можливість заповнення різних форм.

## **РОЗДІЛ 2**

### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЇ ПІНОПОЛІУРЕТАНУ ДО МЕТАЛУ**

У цьому розділі кваліфікаційної роботи наведено дані про випробування з визначення адгезії пінополіуретану до металу.

Об'єктом випробувань є поліуретанова піна і сталевий лист товщиною 1 мм. Для випробування виготовляються зразки кубів (10x10x10 см) з поліуретанової піни, прикріплених до сталевих листів.

Мета експериментальних досліджень:

- вивчення адгезії пінополіуретану до різних оброблених поверхонь сталевих листів.
- Завдання експериментальних досліджень:
- визначити адгезію пінополіуретану до різних оброблених поверхонь сталевих листів.
- зіставити отримані результати зразків;
- оцінити ефективність адгезії до різних поверхонь, обробленого сталевих листів.

#### **2.1 Зразки для експериментального дослідження адгезії пінополіуретану до металу**

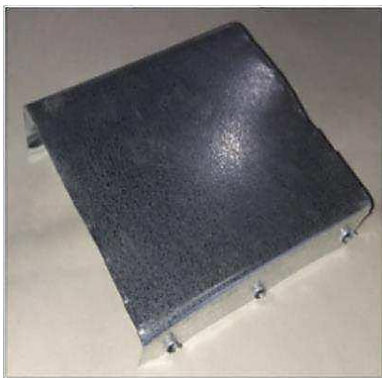
Для визначення найкращої адгезії пінополіуретану до металу, виготовлено куби 10x10x10 см з пінополіуретану, прикріпленого до сталевих листів з оцинкованого металу завтовшки 1 мм (рисунок 2.1).



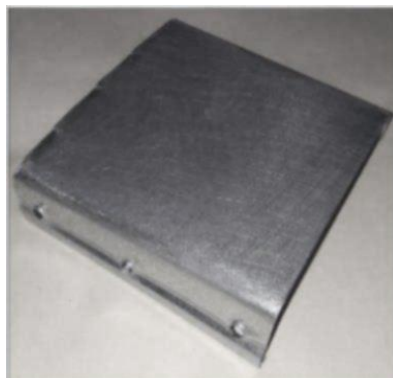
Рисунок 2.1 - Куби 10x10x10 см з пінополіуретану, прикріпленого до сталевого листа

Сталеві листи виготовлені трьох видів:

- лист, оброблений знежирювачем (рисунок 2.2 а)
- лист, оброблений знежирювачем і шліфувальним листом Р220, Р80, Р40 (рисунок 2.2 б)
- лист, оброблений знежирювачем з отворами від просікача (Просікач Matrix 87951). Отвори зроблені з кроком 1,5 см, діаметр отвору 3 мм (рисунок 2.2 в)



а



б



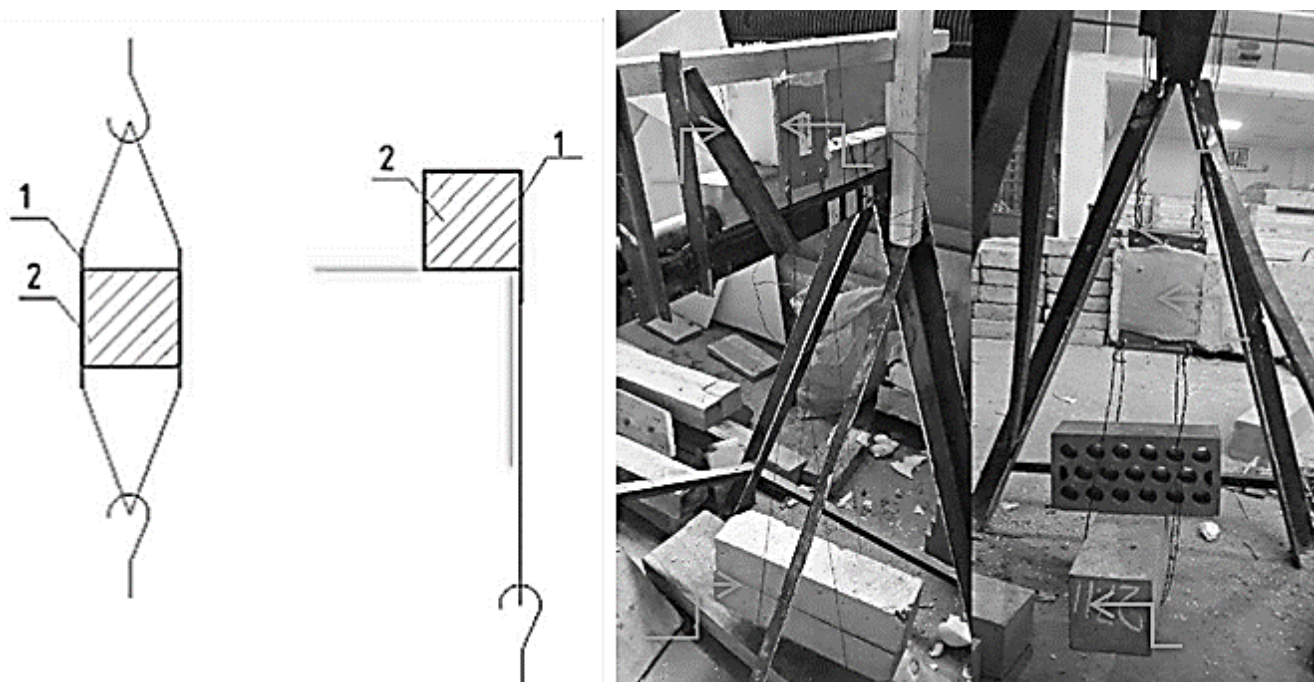
в

Рисунок 2.2 - Зразки, виготовлені зі сталевго оцинкованого листа

Підготовлені куби закріплено на стенді та визначено значення опору відриву (рисунок 2.4) і зрізу (рисунок 2.5) металевго листа від пінополіуретану. Залізобетонні блоки підвішували на сталевому тросі  $\text{Ø}1,5$  мм.

Зразки завантажували ступінчасто з кроком 6 кгс.

Випробування проведено до руйнування зразків.



1) сталевий лист товщиною 1 мм; 2) пінопіуретан; 3) вагове навантаження

Рисунок 2.3 - Розрахункова схема установки

Результати випробування представлені в таблицях 2.1, 2.2 і на рисунках 2.4 і 2.5.





Рисунок 2.4 - Випробування на зріз



Рисунок 2.5 - Випробування на відрив

Таблиця 2.1 - Результати випробувань на відрив

Поверхня металу оброблена знежирювачем			
Поз.	Тип зразка	Навантаження, кгс	Напруження, кгс/см <sup>2</sup>
1	1А	21	0,21
2	2А	23	0,23
3	3А	18	0,18

Продовження таблиці 2.1

Поверхня металу оброблена знежирювачем і шліфувальним листом			
4	1Б	34	0,34
5	2Б	39	0,39
6	3Б	29	0,29
Поверхню металу оброблено знежирювачем і зроблено отвори за допомогою просікача			
7	1В	16	0,16
8	2В	23	0,23
9	3В	18	0,18

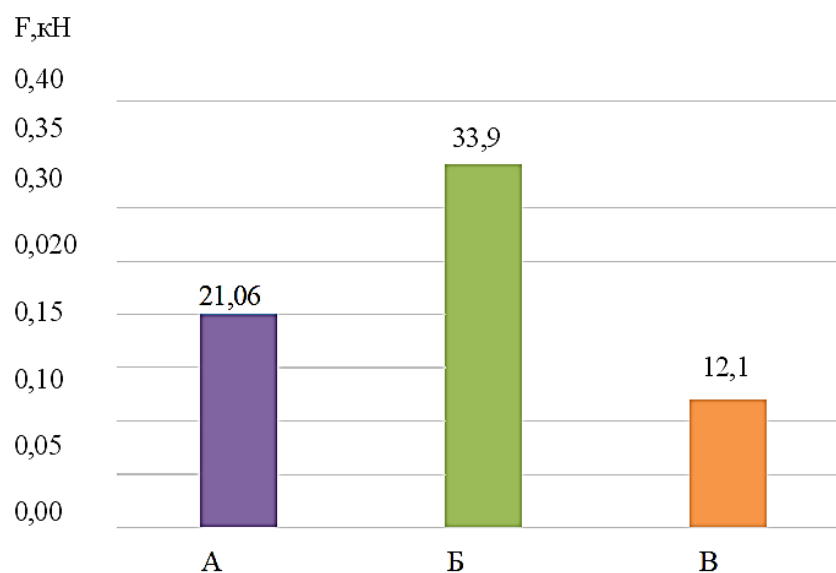


Рисунок 2.6 - Гістограма чисельних результатів випробувань на відрив

Таблиця 2.2 - Результати випробувань на зріз

Поверхня металу оброблена знежирювачем			
Поз.	Тип зразка	Навантаження, кгс	Напруження, кгс/см <sup>2</sup>
1	1Г	16	0,16
2	2Г	21	0,21
3	3Г	18	0,18
Поверхня металу оброблена знежирювачем і шліфувальним листом			
4	1Д	32	0,32
5	2Д	39	0,39
6	3Д	42	0,42

## Продовження таблиці 2.2

Поверхню металу оброблено знежирювачем і зроблено отвори за допомогою просікача			
Поз.	Тип зразка	Навантаження, кгс	Напруження, кгс/см <sup>2</sup>
7	1E	65	0,65
8	2E	46	0,46
9	3E	46	0,46

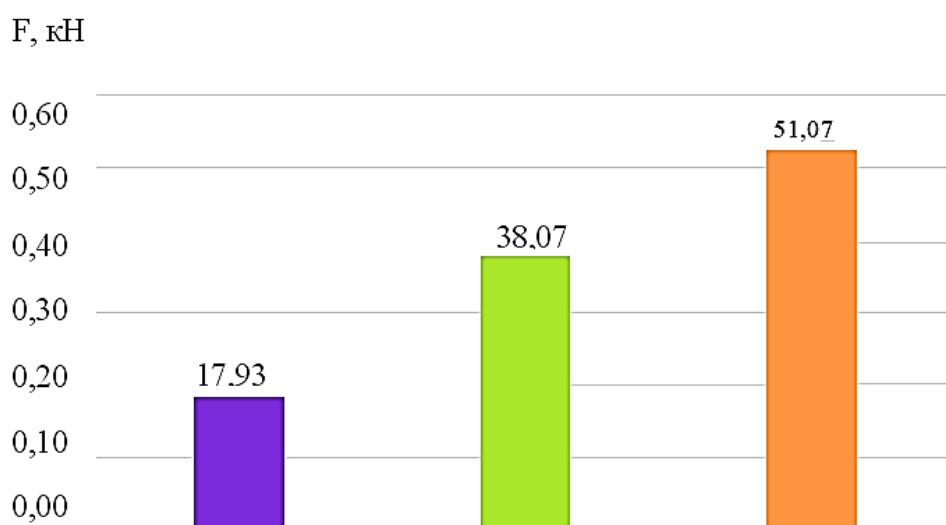


Рисунок 2.7 - Гістограма чисельних результатів випробування на зріз

**2.2 Висновки за розділом 2**

У результаті натурних випробувань найбільш ефективним для найкращої адгезії під час випробування на відрив став зразок, оброблений шліфувальним листом, показники якого склали 34 кгс. За даними, отриманими під час випробування на зріз, найкращий результат показав зразок з отворами, який склав 52,33 кгс. Оскільки зразок з отворами має меншу площу адгезії, для подальшого випробування балки з ЛСТК замкненого перерізу приймаємо поверхню оброблену шліфувальним листом.



### РОЗДІЛ 3

## ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БАЛКИ ЗІ СТАЛЕВИХ ТОНКОСТІННИХ $\Sigma$ - ПРОФІЛІВ ЗАМКНУТОГО ПЕРЕРІЗУ

У третьому розділі кваліфікаційної роботи представлено результати експериментально-теоретичних досліджень балок із тонкостінних профілів складеного перерізу із заповненням внутрішньої порожнини пінополіуретаном на основі скінченно-елементного моделювання.

Дослідження, що базуються лише на теоретичних твердженнях, вважаються наближеними і трудомісткими. Отримані дані, отримані шляхом експериментальних досліджень, дають більш точні результати, проте дослідні моделі по суті одноразові, крім того, для виготовлення експериментальних зразків потрібні великі фінансові витрати. Завдяки сучасним програмам чисельного розрахунку значно скорочуються терміни проведення дослідження з більш точними результатами. Для отримання найбільш точних даних у цій магістерській роботі використовується програмний комплекс ANSYS.

Мета чисельних досліджень:

- визначення несучої здатності тонкостінних балок із заповненням внутрішньої порожнини пінополіуретаном.

Завдання чисельних досліджень:

- визначити несучу здатність порожнистих складових балок із заповненням внутрішньої порожнини пінополіуретаном;

- проаналізувати чисельне дослідження і порівняти результати балок зі сталевих тонкостінних профілів замкнутого перерізу як пустотілих, так і із заповненням внутрішньої порожнини пінополіуретаном;

- оцінити ефективність заповнення балок пінополіуретаном.

Скінченно-елементне моделювання було виконано з використанням програмного комплексу ANSYS. Вибір програмного комплексу було обґрунтовано можливістю моделювання сталевих профілів складеного перерізу та їхньої взаємодії як між собою, так і із заповнювачем у вигляді пінополіуретану.

### 3.1 Числове моделювання

Скінченно-елементне моделювання виконано з використанням модуля "Static Structural", що інтегрований у систему просторового проектування ANSYS. Цей програмний комплекс орієнтований на моделювання та розрахунок із використанням об'ємних скінченних елементів.

Скінченно-елементні моделі з об'ємних елементів забезпечують точніше врахування геометрії профілів ЛСТК порівняно з моделями з пластинчастих елементів.

Моделлю дослідження є однопролітна балка з шарнірними опорами, з оцинкованих тонкостінних холодногнутих різносмугових  $\Sigma$ -профілів замкненого перерізу (рисунок 3.1).

Схему закріплення і завантаження зразка показано на рисунку 3.1.

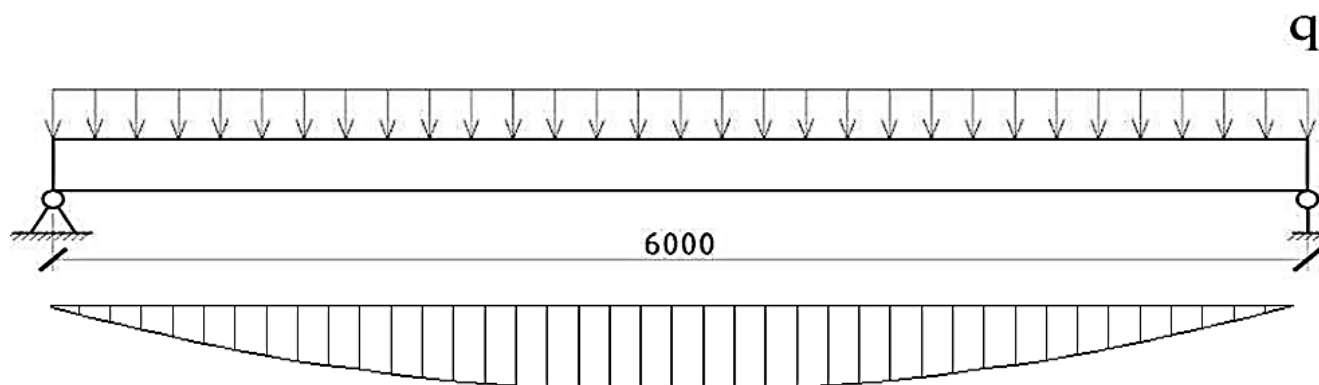


Рисунок 3.1 - Схема закріплення та завантаження зразка

Для опису розрахункової моделі використовується термінологія, що застосовується в програмному комплексі ANSYS. Геометрична модель профілів балки реалізована в модулі "SpaceClaim". Скінченно-елементна модель побудована на підставі геометричної шляхом інструменту "калібрування" розбивки моделі на об'ємні скінченні елементи тетраїдальної топології. Вибір об'ємних скінченних елементів зумовлений необхідністю моделювання контакту профілів складеного перерізу як між собою, так і з заповнювачем у вигляді пінополіуретану.

Розбиття сітки виконано окремою сіткою для кожного елемента на основі кривизни високої якості, що дає змогу точніше вивчити поведінку моделі, але призводить до значного підвищення обчислювальних витрат.

Тип контакту профілів, що утворюють складовий замкнутий переріз балки, задано параметром "зв'язаний", а тип контакту для внутрішньої порожнини профілів з пінополіуретаном задано "пов'язаний", що застосовується як адгезія пінополіуретану до сталі. [27]

Для підвищення точності розрахунку контактної задачі використано параметр "великі переміщення", який дає змогу враховувати зміну геометрії поверхні під час навантаження конструкції та відповідно напрямки реакцій сил тертя.

### 3.2 Визначення значення критичного напруження втрати стійкості

Під час визначення несучої здатності та жорсткості холодногнутих профілів слід враховувати вплив втрати місцевої стійкості та стійкості форми перерізу як це показано для випадків, наведених на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 - Приклади втрати стійкості форми перерізу

Розрахункове значення критичного напруження, за якого відбувається втрата місцевої стійкості стінки, визначено на підставі результатів розв'язання задач стійкості прямокутних пластинок, що мають різні

граничні умови [30, 31, 32].

Для забезпечення місцевої стійкості ділянок профілю, що працюють у пружній ділянці, під час дії нормальних напружень по краях у загальному вигляді має виконуватися умова:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{cr} , \quad (3.1)$$

де  $\sigma_{\max}$  - найбільше напруження, що стискає;

$\sigma_{cr}$  - критичне напруження.

Критичне напруження, що відповідає втраті стійкості пластинки шириною  $n$  і товщиною  $t$ , визначається за формулою:

$$\sigma_{cr} = \frac{k_{\sigma}(\pi^2 * E)}{12 * (1 - \nu^2)} * \left(\frac{t}{h}\right)^2 \quad (3.2)$$

де  $k_{\sigma}$  - параметр, що визначає критичний стан пластинки;

$E$  - модуль пружності;

$\nu$  - коефіцієнт Пуассона;

$t$  - товщина металу стінки;

$h$  - розрахункова висота стінки.

Параметр, що визначає критичний стан пластини, прийнято  $k_{\sigma}=4$ , що відповідає найгіршій умові роботи ізольованої шарнірно опертої по краях пластинки.

Під час розрахунку стінки стиснуто-зігнутої балки на стійкість має виконуватися умова:

$$\sigma_{\max} \leq \gamma_{\tau} * \sigma_{cr} , \quad (3.3)$$

де  $\gamma_{\tau}$  - коефіцієнт, що враховує наявність дотичних напружень по краях розрахункової пластинки.

Таким чином критичне напруження дорівнює:

$$\sigma_{cr} = \frac{4 * (3,14^2 * 2,06 * 10^5)}{12 * (1 - 0,3^2)} * \left(\frac{1}{120}\right)^2 = 51,6 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{max} \leq \gamma_{\tau} * \sigma_{cr},$$

$$\sigma_{max} \leq 0,9 * 51,6 = 46,4 \text{ МПа.}$$

Метою чисельних розрахунків:

- визначити граничне навантаження на порожнисті та заповнені балки, за яких максимальні напруження досягають, але не перевищують розрахункового значення критичного напруження в центрі балки, за якого відбувається втрата місцевої стійкості, а отже - втрата несучої здатності.

### 3.3 Результати чисельного розрахунку

Розрахунок балки виконано в геометрично нелінійній постановці. Чисельну модель наведено на рисунку 17, властивості матеріалів подано в таблиці 3.2. Властивості пінополіуретану визначено відповідно до технічних даних від виробника та на підставі досліджень механічних характеристик пінополіуретану [33, 34].

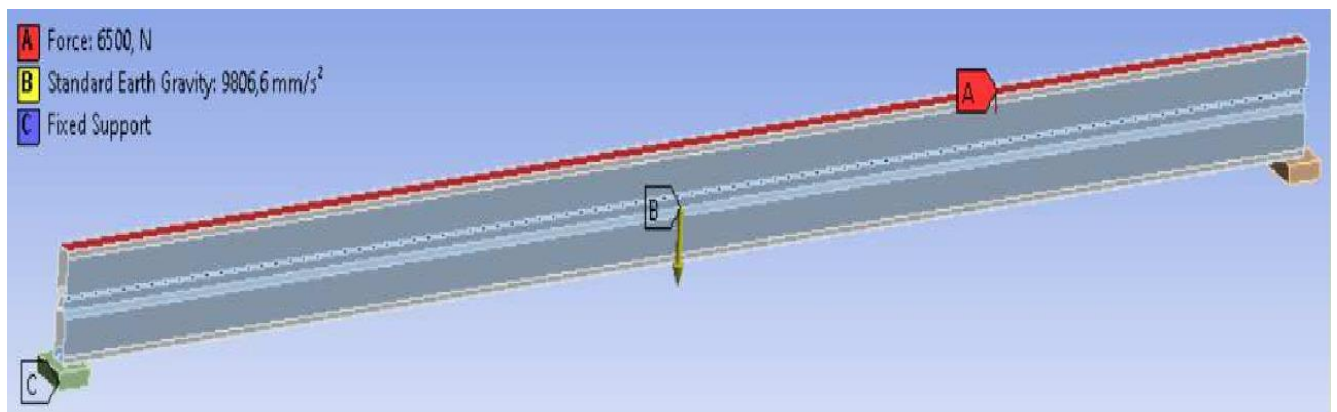


Рисунок 3.3 - Чисельна модель балки

Таблиця 3.1 - Властивості матеріалів чисельної моделі

Матеріал	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Межа плинності, МПа	Модуль пружності, МПа	Коефіцієнт Пуассона
Сталь	7850	240	2,06·10 <sup>5</sup>	0,3
Пінополіуретан	42	12	61	0,25

Результати розрахунку чисельної моделі порожнистотілої ЛСТК балки і с заповнювачем у вигляді пінополіуретану зведені в таблицю 7 і подані на рисунку 3.4.

Несуча здатність кожної балки відповідає навантаженню, за якого максимальні напруження в стінці не перевищили розрахункове критичне напруження (рисунок 3.5):  $\sigma_{\max} \leq 46,4$  МПа.

Таблиця 3.2 - Результати розрахунку чисельної моделі

Поз.	Тип зразка	Навантаженн q, кгс	Прогин, мм	Напруга, МПа	Несуча здатність, кгс
1	БП	50	1,06	6,65	650
		100	1,62	9,6	
		150	2,18	12,32	
		200	2,73	15,43	
		250	3,29	18,57	
		300	3,84	21,71	
		350	4,4	24,86	
		400	4,96	27,94	
		450	5,51	31,12	
		500	6,07	35,26	
		550	6,62	38,36	
		600	7,18	43,54	
		650	7,74	47,9	
		700	7,99	51,1	
		750	8,41	53,41	
		800	8,96	56,91	
850	9,62	59,87			
900	10,53	65,14			

Закінчення таблиці 3.2

Поз.	Тип зразка	Навантаженн $q$ , кгс	Прогин, мм	Напруга, МПа	Несуча здатність, кгс
2	БЗ	50	0.85	6.2	900
		100	1.26	9.22	
		150	1.68	12.25	
		200	2.09	15.28	
		250	2.5	18.3	
		300	2.9	21.33	
		350	3.34	24.36	
		400	3.76	27.38	
		450	4.17	30.41	
		500	4.59	33.43	
		550	5	36.46	
		600	5.42	39.49	
		650	5.84	42.51	
		700	6.25	45.54	
		750	6.6	48.57	
		800	7.08	51.59	
		850	7.5	54.62	
		900	7.9	57.64	
Збільшення несучої здатності					27,7%

\* ЗП заповнена балка; ПБ пустотіла балка.

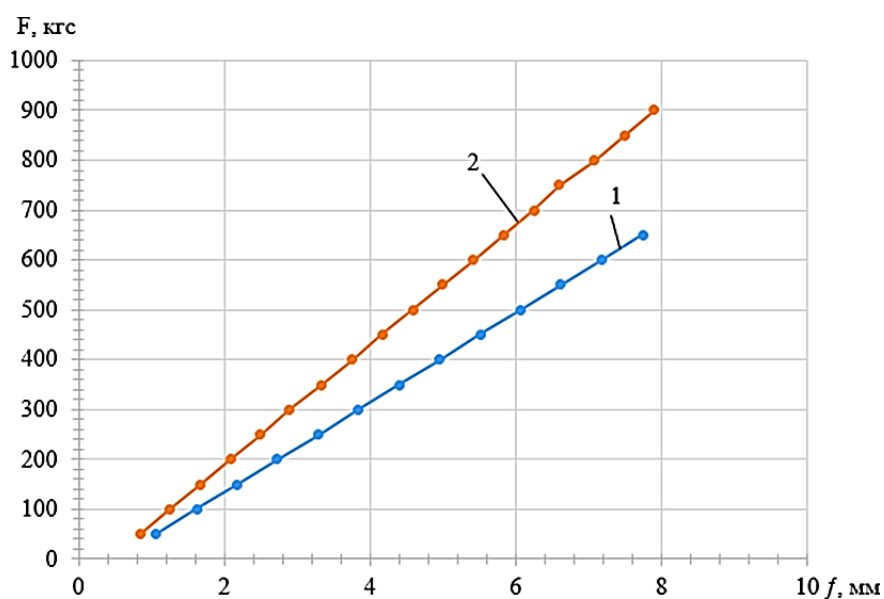


Рисунок 3.4 - Діаграма результатів чисельного розрахунку: 1- ПБ; 2- ЗБ

Теоретичне напруження втрати стійкості стінки балки склало 46,58 МПа. Методом ступеневого навантаження порожнистотілої балки при навантаженні 650 кг-м, досягнуто граничного значення втрати стійкості в центральній частині балки. Значення прогину при цьому склало 7,67 мм. За тієї ж напруги заповненої балки, навантаження становило 745 кг-м, значення прогину при цьому 6,63 мм.

Межа плинності сталі 240 МПа, що в 5 разів більше, ніж розрахункове значення втрати стійкості. Для зниження недовикористання матеріалу було ухвалено рішення довантажувати заповнену балку до значень, що дорівнюють значенням прогину порожнистої балки. Таким чином, навантаження в заповненій балці становило 880 кг-м, за напруги 57,54 МПа.

Аналіз отриманих граничних навантажень на підставі чисельного розрахунку показує, що заповнення внутрішньої порожнини замкненого перерізу балок пінополіуретаном призводить до збільшення місцевої стійкості стінок балки, а, отже, до збільшення несучої здатності на 17,78%. З рисунка 3.8, 3.9 випливає, що заповнення балки пінополіуретаном сприяє рівномірному перерозподілу напруження, тоді як пустотіла балка має нерівномірний розподіл напруження.

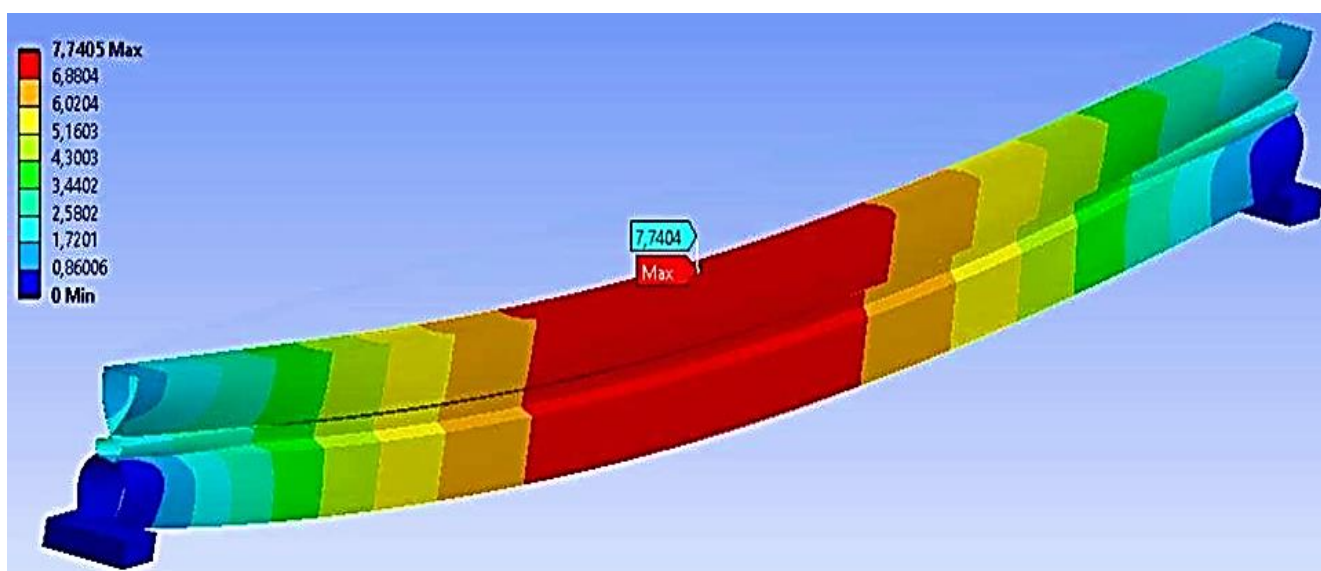


Рисунок 3.5 - Епюра деформації пустотілої балки



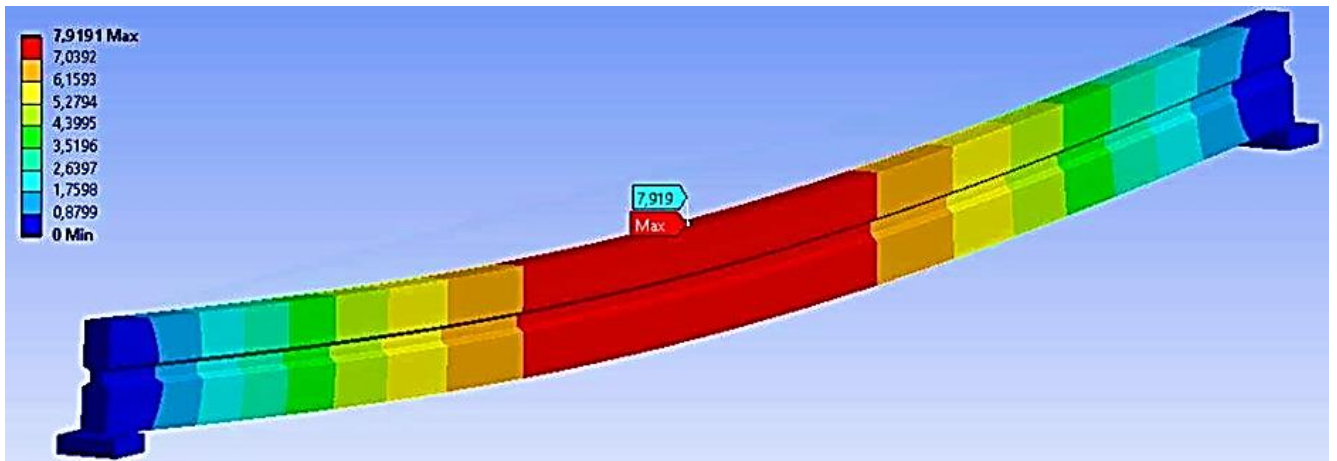


Рисунок 3.6 - Епюра деформації заповненої балки

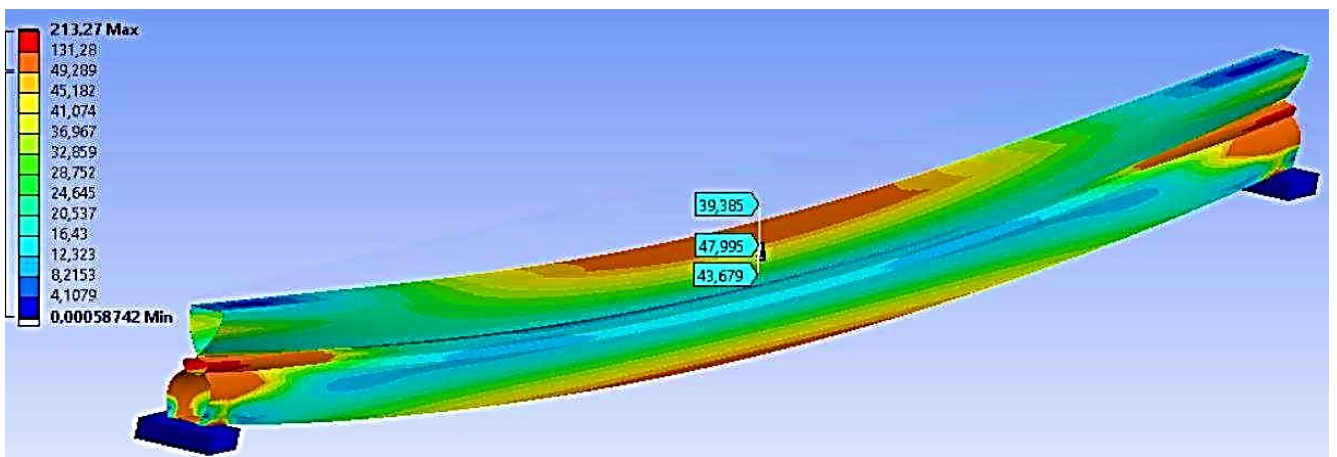


Рисунок 3.7 - Епюра напружень порожньої балки

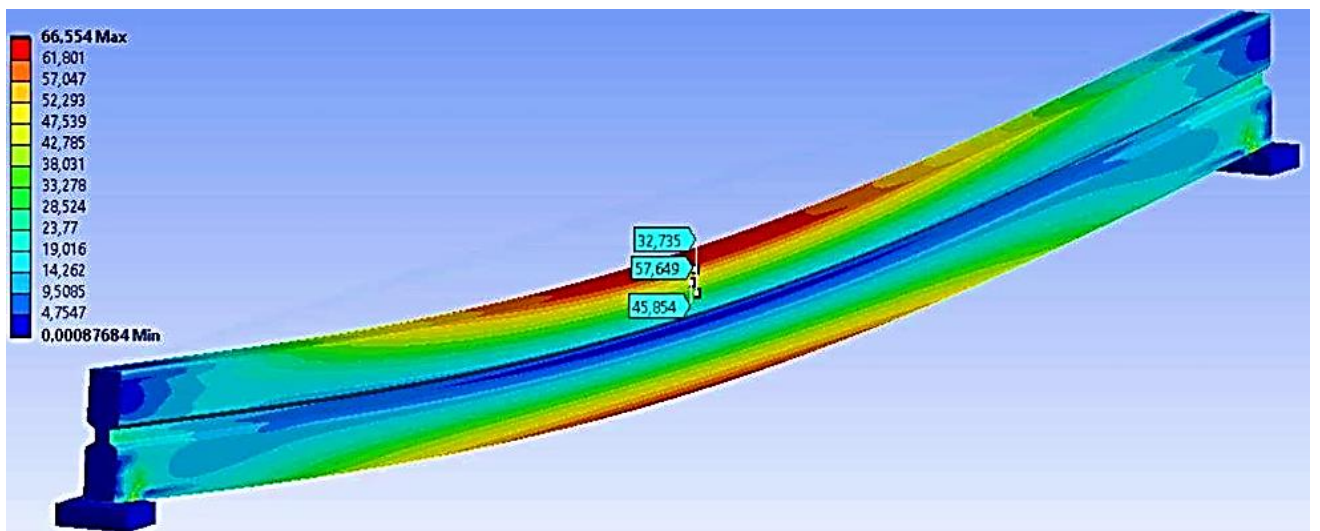


Рисунок 3.8 - Епюра напружень заповненої балки

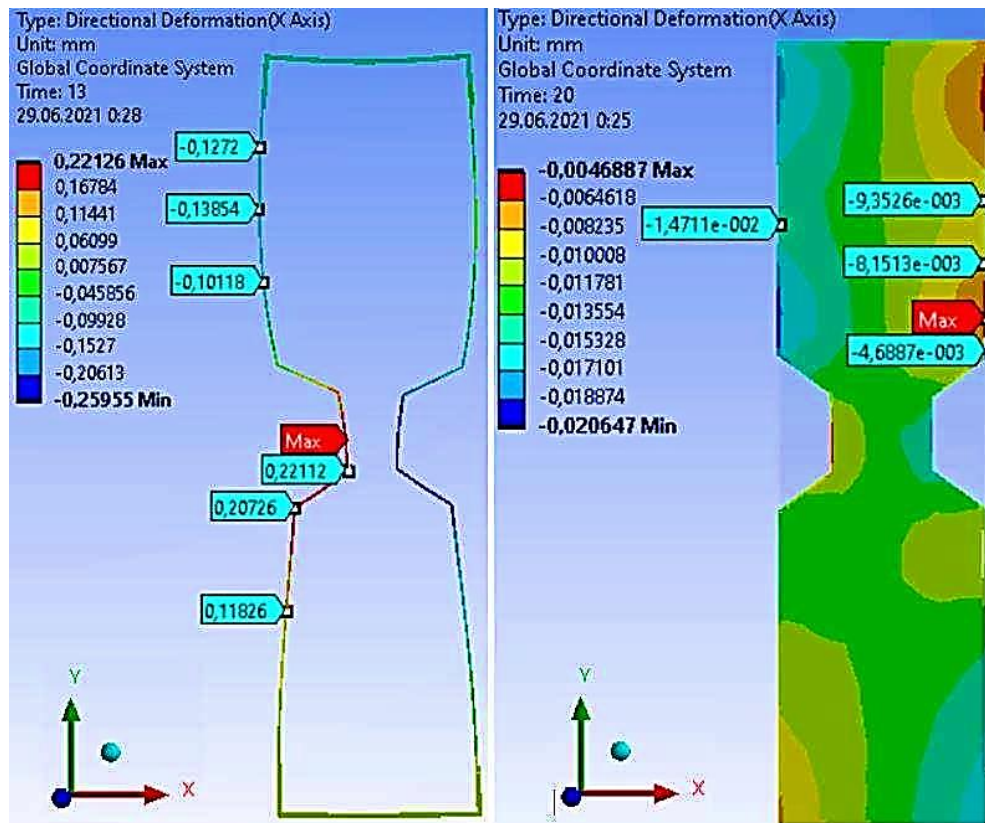


Рисунок 3.9 - Епюра деформації порожнистотілої балки та заповненої балки по осі x

### 3.4 Висновки за розділом

У цьому розділі представлено чисельні розрахунки виконані за допомогою програмного комплексу ANSYS.

Аналіз отриманих граничних навантажень на підставі чисельного розрахунку показує, що заповнення внутрішньої порожнини замкнутого перерізу балок пінополіуретаном призводить до збільшення місцевої стійкості стінок балки і, отже, до збільшення несучої здатності на 17,78%. З рисунка 3.8, 3.9 випливає, що заповнення балки пінополіуретаном сприяє рівномірному перерозподілу напруження, тоді як пустотіла балка має нерівномірний розподіл напруження.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Охорона праці

Охорона праці – це зведення законодавчих актів і правил, відповідних їм гігієнічних, організаційних, технічних та соціально-економічних заходів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я та працездатність людини в процесі праці. Організація будівельного майданчика, ділянки робіт та робочих місць повинна забезпечувати безпеку праці працюючих на всіх етапах виконання робіт.

Вирішення питань про охорону праці та здоров'я трудящих на будівельному майданчику є найважливішим завданням. При вирішенні завдань необхідно чітко представляти сутність процесів і відшукати способи (найбільш підходящі до кожного конкретного випадку), що усувають вплив на організм шкідливих і небезпечних факторів і унеможливають травматизм і професійні захворювання.

##### 4.1.1 Інженерні рішення з охорони праці

Проектом передбачені інженерні рішення з техніки безпеки будівельно-монтажних та супутніх допоміжних робіт.

При виробництві будівельно-монтажних робіт необхідно дотримуватись вимог [39]. Чинна система охорони праці (трудове законодавство, виробнича санітарія та техніка безпеки) забезпечує належні умови праці робітникам-будівельникам, підвищення культури виробництва, безпеку робіт та їх полегшення, що сприяє підвищенню продуктивності праці. Створення безпечних умов праці у будівництві тісно пов'язане з технологією та організацією виробництва. Відповідальність за безпеку робіт покладено у законодавчому порядку на технічних керівників будівель – головних інженерів та інженерів з охорони праці, виробників робіт та будівельних майстрів. Керівники будівництва зобов'язані організувати планування заходів з охорони праці та протипожежної техніки та забезпечити проведення цих заходів у встановлені терміни.

Поліпшення організації виробництва, створення на будівельному майданчику умов праці, що усувають виробничий травматизм, професійні захворювання та забезпечують нормальні санітарно-побутові умови – одне з найважливіших завдань, від успішного вирішення якого залежить подальше підвищення продуктивності праці на забудовах.

До обов'язків адміністрації будівельних організацій з охорони праці входять:

- дотримання правил охорони праці, здійснення заходів з техніки безпеки та виробничої санітарії;
- розробка перспективних планів та угод колективних договорів щодо покращення та оздоровлення умов праці;
- забезпечення працюючих спецодягом, спецвзуттям, засобами індивідуального захисту;
- проведення інструктажів та навчання робочих правил техніки безпеки;
- організація пропаганди безпечних методів праці, забезпечення будівельних об'єктів плакатами, запобіжними написами тощо;
- організація навчання та щорічної перевірки знань, правил та норм охорони праці інженерно-технічного персоналу;
- проведення медичних оглядів осіб, зайнятих на роботах із підвищеною небезпекою та шкідливими умовами;
- розслідування всіх нещасних випадків та профзахворювань, що сталися на виробництві, а також їх облік та аналіз;
- ведення документації та перевірка встановленої звітності з охорони праці;
- видання наказів та розпоряджень з питань охорони праці.

Загальне керівництво робіт з техніки безпеки та виробничої санітарії, а також відповідальність за її стан покладається на керівників (начальників та головних інженерів) будівельних організацій.

#### 4.1.2 Огородження територій

Територія будівельного майданчика має бути виділена на території огорожами:

- захисно-охоронними, призначеними для запобігання доступу сторонніх осіб на ділянки з небезпечними та шкідливими виробничими факторами та забезпечення збереження матеріальних цінностей;
- захисними, призначеними лише запобігання доступу сторонніх осіб у ділянки з небезпечними виробничими чинниками;
- сигнальними, призначеними для попередження про межі територій та ділянок з небезпечними та шкідливими виробничими факторами.

Панелі огорож повинні бути прямокутними зі стандартною довжиною  $L=1,2; 1,6; 2,0$ м. Відстань між суміжними елементами огороження заповнення полотна панелей має бути 80...100 мм. Відстань між стійками сигнальних огорож не більше 6м.

#### 4.1.3 Визначення небезпечних зон на будівельному майданчику

При організації будівельного майданчика, розміщення ділянок робіт, робочих місць, проїздів будівельних машин, транспортних засобів, проходів для людей слід встановити небезпечні для людей зони, у яких постійно діють або потенційно можуть діяти небезпечні виробничі фактори.

До ділянок небезпечних виробничих факторів відносяться зони:

- у смузі шириною до 2-х метрів по периметру від не захищених перепадів за висотою на 1,3 м і більше;
- у місцях переміщення машин та обладнання або їх робочих органів та відкритих частин, що рухаються або обертаються;
- у місцях, над якими відбувається переміщення вантажів вантажопідіймальними кранами;

- поблизу від відкритих неізольованих струмопровідних частин електроустановок та ЛЕП;
- у місцях, де рівні шуму, вібрації чи забруднення повітря робочої зони перевищують гігієнічні норми:

До зон потенційно діючих небезпечних виробничих факторів відносяться:

- монтажні зони - ділянки території поблизу будівлі або споруди, що будується;
- поверхи (яруси) будівель та споруд в одній захватці, над якими відбувається монтаж (демонтаж) конструкцій або обладнання.

#### **4.1.4 Організація безпечних умов праці земляних робіт**

Для забезпечення безпечних умов виконання земляних робіт необхідно дотримуватися наступних основних умов безпечного виконання робіт:

- Земляні роботи у зоні розташування діючих підземних комунікацій можуть проводитися лише з письмового дозволу організацій, відповідальних їх експлуатацію.
- Технічний стан землерийних машин повинен регулярно перевірятись із своєчасним усуненням виявлених несправностей. Екسкаватор під час роботи необхідно розташовувати на спланованому місці.
- Під час роботи екскаватора забороняється перебування людей у межах призми обвалення та в зоні розвороту стріли екскаватора.
- Завантаження автомобілів екскаватором проводиться так, щоб ківш подавався збоку або ззаду кузова, а не через кабіну водія. Пересування екскаватора із завантаженим ковшем забороняється.

#### **4.1.5 Організація безпечних умов праці бетонних робіт**

Для забезпечення безпечних умов виконання бетонних робіт необхідно дотримуватися таких основних умов безпечного виконання робіт:

- опалубку, що застосовується для зведення монолітних залізобетонних конструкцій, необхідно виготовляти та застосовувати відповідно до проекту виконання робіт, затвердженого у відповідному порядку.
- при встановленні елементів опалубки на кілька ярусів кожен наступний ярус слід встановлювати лише після закріплення нижнього ярусу.
- при виробництві опалубних, арматурних, бетонних та розпалубних робіт необхідно стежити за кріпленням лісів та риштування, їх стійкістю, правильним улаштуванням настилів, сходів, поручнів та огорож.
- цитову опалубку колон, ригелів, перекриттів і стін з пересувних драбин допускається встановлювати при висоті над рівнем землі або нижчим перекриттям не більше 5,5 м.
- працювати на висоті від 5,5 до 8 м дозволяється тільки з пересувних риштування, що мають нагорі майданчик з огорожами.
- при зведенні залізобетонних стін для безпечної роботи будівельників-опалубників з обох боків необхідно встановити настили з огорожами через кожні 1,8 м за висотою.
- стан зібраних панелей та блоків опалубки, робочих настилів, навісних майданчиків та сходів на захватках щодня перед початком робіт перевіряє особа, відповідальна за виконання робіт та робить відповідну запис у журналі охорони праці та протипожежної охорони.
- усі робочі настили та перехідні сходи мають бути надійно закріплені відповідно до проекту.
- роботи на незакріплених підмостках суворо заборонені.
- до монтажу не допускається опалубка з несправними замками, петлями, захватами, великими люфтами у шарнірах та замках. Виявлені несправності слід усувати негайно.
- до початку монтажу опалубки міцність нижчих несучих монолітних конструкцій повинна бути не нижче 70% проектної.
- всі прорізи повинні бути закриті інвентарними щитами або захищені.

– до початку монтажу опалубки необхідно перевірити надійність з'єднання елементів опалубки, що входять до складу вузла, що піднімається, переконатися у відсутності незакріплених предметів на елемент опалубки, що переноситься.

– підйом та переміщення до місця встановлення елементів опалубки необхідно виконувати плавно, без обертання, коригування положення елемента виконувати на відтяжки. Не допускається виконувати монтажні роботи на висоті у відкритих місцях при швидкості вітру 15 м/с і більше, при ожеледиці, грозі або тумані, що виключає видимість у межах фронту робіт. Роботи з переміщення та встановлення вертикальних панелей та подібних до них конструкцій з великою вітрильністю слід припиняти при швидкості вітру 10 м/с і більше.

– розструпування елементів опалубки проводити тільки після належного їх закріплення або установки, що виключає мимовільне переміщення.

– панелі та блоки піднімати лише після їх повного звільнення від кріпильних елементів та відриву від бетону. Окремі панелі, крім підкосів, повинні зміцнюватися ланцюговими відтяжками для запобігання перекиданню. Особливу увагу звернути на стропування та підйом блоків опалубки. Щоб уникнути заклинювання блоку при вилученні його з комірки, блок при підйомі має бути строго вертикальним.

– робочі місця мають бути огорожені інвентарними огорожами. В разі відсутності огорожі робітники повинні користуватися запобіжними поясами. Місця прикріплення поясів вказуються виробником робіт та яскраво забарвлюються.

– під час грози та при вітрі силою 6 балів і більше (тобто при швидкості вітру понад 9,9 м/с) виконувати бетонні та залізобетонні роботи із зовнішніх лісів забороняється.

– арматурні вироби слід переміщувати та встановлювати лише у рукавицях. Армований ділянки, які можуть бути під струмом, необхідно заземлити. Не дозволяється залишати без закріплення встановлену арматуру.



## 4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

### 4.2.1 Законодавча база України

Основу нормативно-правової бази в сфері цивільної оборони, захисту населення і території від наслідків надзвичайних ситуацій складають: Кодекс цивільного захисту України, закони «Про війська цивільної оборони», «Про аварійно-рятувальні служби»; укази Президента України «Про Концепції захисту населення і територій у випадку загрози і виникнення НС» і Положення «Про міністерство України з питань НС і в справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи», постанови Кабінету Міністрів України про затвердження «Положення про цивільну оборону України», «Про єдину державну систему попередження і реагування на НС техногенного і природного характерів», «Положення про керування з питань НС і цивільного захисту населення обласних і міських державних адміністрацій» та інші нормативні акти.

### 4.2.2 Стійкість будівлі від ударної хвилі

Нові об'єкти народного господарства повинні будуватися з урахування вимог, виконання яких сприяє підвищенню сталості об'єкта. Основні з них такі:

1. Будівлі і споруди на об'єкті необхідно розташовувати розосереджено. Відстані між будівлями повинні забезпечувати протипожежні розриви. При наявності таких розривів виключається можливість перенесення вогню з однієї будівлі на іншу, навіть якщо пожежу не гасять.

Ширина протипожежного розриву  $L_p$  м визначається за формулою:

$L_p = H_1 + H_2 + (15 \dots 20)$ , де  $H_1$  і  $H_2$  — висоти сусідніх будівель, м.

Будівлі адміністративно господарського та обслуговуючого призначення повинні розташовуватися окремо від основних цехів.

2. Найважливіші виробничі будівлі слід будувати заглибленими або пониженої висотності, прямокутної форми у плані. Це зменшує парусність будівель і збільшує опірність їх ударній хвилі ядерного вибуху. Належну стійкість до впливу ударної хвилі мають залізобетонні будівлі з металевими каркасами в бетонній опалубці .

Для підвищення стійкості до світлового випромінення у будівлях та спорудах, що будуються, повинні застосовуватися вогнетривкі конструкції, а також вогнетривка обробка елементів будівлі, які горять. У кам'яних будівлях перекриття повинні бути виготовлені з армованого бетону або виконані з бетонних плит. Великі будівлі повинні розділятися на секції вогнетривкими стінами (брандмауерами).

У ряді випадків при проектуванні та будівництві промислових будівель і споруд має бути передбачена можливість герметизації приміщень від проникнення радіоактивного пилу. Це особливо важливо для підприємств харчової промисловості і продовольчих складів.

3. У складських приміщеннях повинна бути мінімальна кількість вікон і дверей. Складські приміщення для зберігання легкозаймистих речовин (бензин, гас, нафта, мазут) повинні розташовуватися в окремих блоках заглибленого або напівзаглибленого типу біля меж території об'єкта чи поза нею.

4. Деякі унікальні види технологічного обладнання доцільно розміщувати у найміцніших спорудах (підвалах, підземних приміщеннях) або у будівлях з легких вогнетривких конструкцій павільйонного типу, під накриттям чи без нього. Це обумовлюється тим, що у багатьох випадках обладнання може витримати набагато більший тиск ударної хвилі, ніж будівлі, в яких воно знаходиться, а при зруйнуванні будівель в результаті падіння конструкцій встановлене в них обладнання виходитиме з ладу.

5. На підприємствах, що виробляють або використовують сильнодіючі отруйні та вибухонебезпечні речовини, при будівництві і реконструкції необхідно

передбачати захист ємностей та комунікацій від зруйнування ударною хвилею чи конструкціями, що падають, а також заходи, що виключають розливання отруйних речовин і вибухонебезпечних рідин.

6. Душові приміщення необхідно проектувати з урахуванням використання їх для санітарної обробки людей, а місця для миття машин — з урахуванням використання їх для знезараження автотранспорту.

7. Шляхи на території об'єкта повинні бути з твердим покриттям і забезпечувати зручне і найкоротше сполучення між виробничими будівлями, спорудами і складами; в'їздів на територію об'єкта має бути не менше двох з різних напрямків. Внутрізаводські залізничні шляхи повинні забезпечувати найпростішу схему руху, займати мінімальну площу території об'єкта та мати обгінні ділянки. Вводи залізничних ліній в цехи повинні бути, як правило, тупикові.

8. Системи побутової та виробничої каналізації повинні мати не менше двох випусків у міській каналізаційній мережі та пристрої для аварійних скидів у котловани, яри, траншеї тощо.

Дія ударної хвилі на об'єкт характеризується складним комплексом навантажень: надлишковим тиском, тиском відбиття, тиском швидкісного напору, тиском затікання, навантаження від сейсмовибухових хвиль і т.д. Значення їх залежить в основному від виду і потужності вибуху, відстані до об'єкта, конструкції і розмірів елементів об'єкта, орієнтації щодо епіцентру вибуху, місця розташування будинків і споруджень у загальній забудові об'єкта й окремих елементів виробництва в приміщеннях будинків, рельєфу місцевості і деяких інших факторів. Врахувати їх у сукупності для кожного елемента об'єкта, як правило, неможливо. Тому можливість елементів опиратися дії ударної хвилі характеризують тільки надлишковим тиском у її фронті, вважаючи, що масштаби руйнувань не залежать від потужності і висоти найбільш ймовірних ядерних вибухів.

Для визначення ступеня руйнувань чи ушкоджень:

- вивчають вихідні дані і розраховують параметри ударної хвилі на відповідних відстанях;
- для розрахованих значень надлишкових тисків оцінюють ступінь руйнування розглянутих елементів;
- оцінюють можливість виникнення вторинних вражаючих факторів;
- з огляду на ступінь руйнувань найслабших елементів об'єкта, визначають ступінь руйнування об'єкта в цілому.

Вихідними даними для оцінки фізичної стійкості є: конструктивні особливості елемента, його форма, вага, габарити, характеристики міцності.

Оцінка ступеня руйнувань будинків і споруд, сховищ і ПРУ, енергетичного устаткування і мереж, верстатного і технологічного устаткування, вимірювальної апаратури, засобів зв'язку й оповіщення, транспортних та інших засобів може здійснюватися або методом порівняння наявних довідкових даних для розглянутого виду чи аналогічного йому елемента, або методом розрахунку впливу ударних навантажень і сил зсуву на елемент.

Для порівняльної оцінки необхідно мати відповідні таблиці можливих руйнувань елементів об'єкта в залежності від надлишкового тиску у фронті ударної хвилі: будинків, споруд, транспорту, устаткування, енергетичних споруд і мереж. Ці таблиці складаються на основі статистичних даних, отриманих при аналізі руйнувань у Хіросімі й Нагасакі та при проведенні випробувальних ядерних вибухів на полігонах, і можуть поповнюватися результатами розрахунків при конструюванні нових елементів.

Метод розрахунку передбачає визначення динамічних навантажень, створюваних надлишковим тиском у фронті ударної хвилі, і реакції елемента на ці навантаження. Вихідними даними при використанні цього методу є: надлишковий тиск у фронті ударної хвилі і характер його зміни в часі (протягом фази стискання), тривалість фази стискання і швидкість руху фронту ударної хвилі. У

більшості випадків дію ударної хвилі оцінюють питомим імпульсом — добутком надлишкового тиску на час його дії. Оскільки  $\Delta P_\phi$  залежить не тільки від часу, а й від відстані до епіцентру, і від потужності джерела ПУХ, розрахунок імпульсу з використанням інтегрального числення ускладнений. Тому звичайно використовують кусково-лінійну апроксимацію кривої  $\Delta P_\phi$  як функції часу.

Таким чином, дія ударної хвилі на об'єкт характеризується складним комплексом навантажень: надлишковим тиском, тиском відбиття, тиском швидкісного напору, тиском затікання, навантаження від сейсмовибухових хвиль і т.д. Значення їх залежить в основному від виду і потужності вибуху, відстані до об'єкта, конструкції і розмірів елементів об'єкта, орієнтації щодо епіцентру вибуху, місця розташування будинків і споруджень у загальній забудові об'єкта й окремих елементів виробництва в приміщеннях будинків, рельєфу місцевості і деяких інших факторів. Врахувати їх у сукупності для кожного елемента об'єкта, як правило, неможливо. Однак ряд таких заходів як розосередження нових будівель та споруд, забезпечення протипожежних розривів, наявність в будівлі залізобетонного каркасу та шляхів із твердим покриттям, запроектовані брандмауери істотно підвищують шанси людей вижити під час катастрофи, а також зменшують ризик отримання травм чи пошкоджень, сприяють швидшому доступу рятувальних служб до місця трагедії.

#### **4.2.3 Заходи при землетрусі**

Землетруси починаються раптово і охоплюють значні території. Руйнування будівель, зсуви і обвали крутих схилів є головними причинами людських жертв і великих матеріальних збитків при сильних землетрусах. Сейсмічними вважають райони, де зареєстровані або теоретично очікувані землетруси у 6 балів та вище. Основні вимоги до будівництва у сейсмічних районах зведено до вжиття таких заходів:

1. Вибір ділянки для будівництва.
2. Вибір конструктивного рішення (КР) та об'ємно-планувального рішення (ОПР).
3. Забезпечення високої якості будівництва.
4. Поділ будівель і споруд антисейсмічними швами.

Будівельні майданчики під населені пункти і споруди обираються з урахуванням геологічних даних, якнайдалі від можливих або явних розривних порушень, далеко від крутих схилів, що загрожують обвалами і зсувами. Неприятливими для будівництва вважають пухкі ґрунти і тріщинуваті породи. При виборі ділянки для забудови враховують такі поняття як сейсмостійкість будівельних об'єктів та сейсмічність будівельного майданчика. Сейсмостійкістю називають здатність ґрунтів, будівель і споруд протистояти сейсмічним впливам. Заходи з підвищення сейсмостійкості будівель застосовуються у районах із сейсмічністю у 7 балів і вище. Нормативне обґрунтування цих заходів здійснюється за «ДБН В.1.112:2006. Будівництво у сейсмічних районах України». За сейсмічності більше 9 балів зведення капітальних будівель заборонено.

#### **4.2.4 Системи сейсмозахисту будівель і споруд**

Загальна класифікація систем сейсмозахисту споруд представлена на рис. 4.1. Вона складається з традиційних методів забезпечення сейсмостійкості та спеціальних засобів сейсмозахисту.

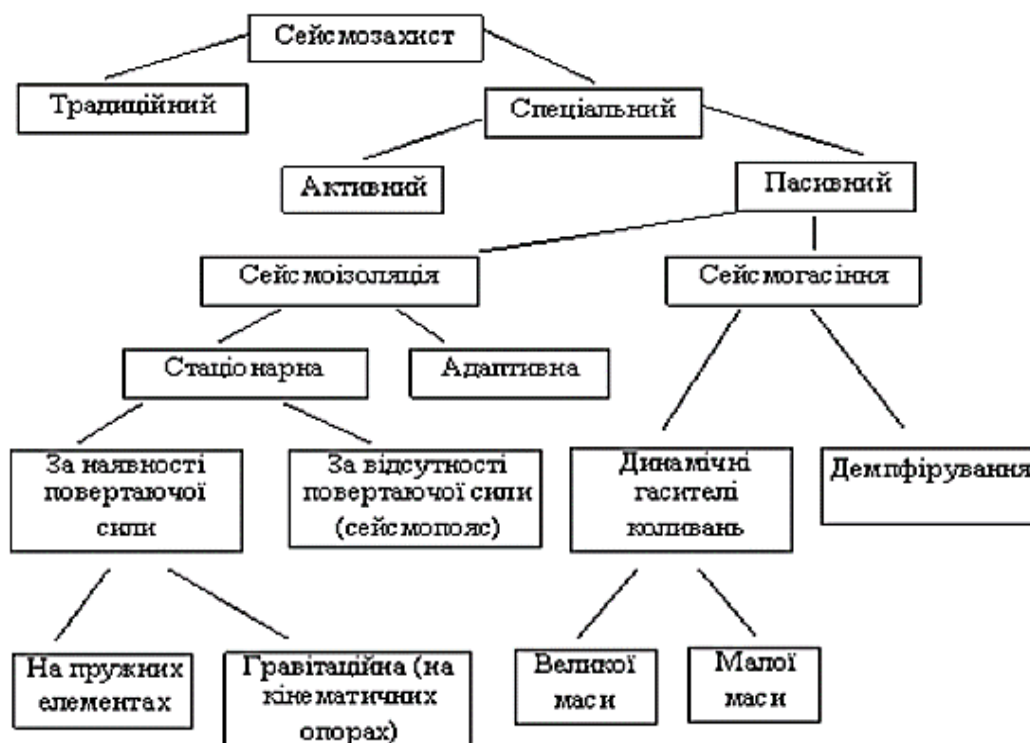


Рисунок 4.1 - Загальна класифікація систем сейсмосахисту споруд

#### 4.2.5 Заходи щодо підвищення стійкості об'єкта

Одне з основних завдань в області цивільного захисту ЦЗ - проведення заходів, спрямованих на підвищення стійкості роботи об'єктів в умовах надзвичайних ситуацій мирного і воєнного часу. Під стійкістю функціонування будівельного об'єкта розуміють здатність його в надзвичайних ситуацій виконувати покладену на нього функцію, а при отриманні слабких і середніх руйнувань або порушенні зв'язків з постачання, відновлювати виконання покладеної функції в мінімальні терміни.

Розглянутий об'єкт будівництва є нестійким до дії ударних хвиль, тому що розглянуті мною безкаркасні арочні ангари мають невелику товщину стінки і власну вагу, що не забезпечує належної стійкості будівлі, отже, необхідно розробляти низку заходів щодо підвищення його стійкості.

Для цього необхідно зробити наступне:

1. Підвищити стійкість промислової споруди шляхом встановлення більш міцного металевого каркасу, встановлення більш міцних рам для дверей і вікон, зменшення прольоту несучих конструкцій, а також зміцнення стін будівлі більш міцними матеріалами.

2. Для підвищення стійкості кранів та кранового обладнання до впливу ударної хвилі доцільно забезпечити їх жорстку фіксацію на міцному фундаменті, розташовувати устаткування за міцними елементами будівлі і споруд на ймовірному напрямку дії ударної хвилі, забезпечити додаткові точки фіксації і кріплення. Також необхідно встановлювати контрфорси, що підвищують стійкість обладнання до дії швидкісного напору ударної хвилі.

3. Для підвищення стійкості кабельних наземних ліній слід помістити їх під землю, також можливе їх зміцнення за рахунок укладання їх всередину, а також за рахунок застосування броньованих кабелів.

#### **4.3 Висновки до розділу 4**

У цьому розділі було розглянуто безпеку в надзвичайних ситуаціях з фокусом на землетрусі.

Оскільки, землетруси є однією з найбільш небезпечних природних катастроф, які можуть призвести до значних матеріальних збитків та загибелі людей. Однак, певні заходи можуть бути прийняті, щоб зменшити ризик втрати життя та матеріальних збитків.

Було розглянуто заходи, які можуть бути прийняті в разі землетрусу. Вони включають в себе пошук безпечного місця, прикриття голови та шиї твердим предметом, уникнення ліфтів та швидкого виходу з будівлі.

Було також розглянуто заходи підвищення стійкості будівлі при землетрусі. Вони включають в себе правильне планування будівель, використання стійких матеріалів, які можуть поглинати енергію землетрусу, та використання підсилюючих конструкцій для підвищення стійкості будівлі.



Нарешті, було розглянуто системи сейсмозахисту будівель, які можуть допомогти зменшити ризик матеріальних збитків та загибелі людей. Ці системи включають в себе ізолятори, амортизатори та інші системи, які можуть допомогти зменшити вібрації та поглинати енергію землетрусу.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Легкі сталеві тонкостінні конструкції мають низку переваг перед традиційними конструкціями з гарячекатаного прокату:

- зниження витрати металу, ефективне використання сталей підвищеної міцності;
- зниження витрат на влаштування фундаментів завдяки зниженню ваги конструкцій;
- зниження трудовитрат, можливість монтажу без застосування кранів та інших вантажопідйомних механізмів;
- зменшення термінів монтажу;
- економія витрат на транспортування конструкцій, як завдяки полегшенню конструкцій, так і завдяки їхній компактності.

Невелика вага ЛСТК дає основну перевагу порівняно з іншими будівельними конструкціями. На підставі цього, в даній роботі було розглянуто можливість збільшення несучої здатності ЛСТК без істотного збільшення ваги самої конструкції в цілому.

Як об'єкт дослідження було обрано балку зі сталевих тонкостінних різносмугових  $\Sigma$ -профілів замкнутого перерізу із заповненням внутрішньої порожнини пінополіуретаном. Були проведені чисельні дослідження балки на вигин з використанням програмного комплексу ANSYS.

Для досягнення поставленої мети було вирішено такі завдання:

- провести аналіз матеріалу для створення комбінованого елемента зі сталевих тонкостінних профілів замкнутого перерізу із заповненням внутрішньої порожнини.
- визначити адгезію піни до металу.
- виконати чисельні дослідження балок зі сталевих тонкостінних профілів замкнутого перерізу як пустотілих, так і із заповненням внутрішньої порожнини

спіненим матеріалом.

– провести аналіз чисельних результатів для подальшого випробування конструкції зі сталевих тонкостінних профілів замкнутого перерізу як порожнистих, так і із заповненням внутрішньої порожнини спіненим матеріалом і оцінити ефективність прийнятого конструктивного рішення.

Виконані дослідження дають змогу зробити такі висновки:

– заповнення сталевих тонкостінних конструкцій різними спіненими матеріалами активно застосовують у сфері авіаційного та автомобільного машинобудування, з метою підвищення жорсткості та міцності конструкцій, але є невивченим питанням у сфері будівельних конструкцій. Під час досліджень, виконаних у цій роботі, встановлено залежності, що підтверджують ефективність застосування спінених матеріалів у галузі ЛСТК, які потребують подальших досліджень.

– у результаті аналізу отриманих граничних навантажень на підставі чисельного розрахунку показано, що заповнення внутрішньої порожнини замкнутого перерізу балок пінополіуретаном густиною  $40 \text{ кг/м}^3$  призводить до збільшення місцевої стійкості стінок балки, а, отже, до збільшення несучої здатності на 17,78%. Заповнення балки пінополіуретаном сприяє рівномірному перерозподілу напруження, тоді як пустотіла балка має нерівномірний розподіл напруження. Крім того, відомі теоретичні та експериментальні передумови свідчать про підвищення несучої здатності аналогічних балок за рахунок підвищення стійкості стінок, однак ці положення майже не піддаються надійному чисельному дослідженню без експериментальних даних. Тому, подальші дослідження та верифікацію отриманих результатів планується здійснити натурними випробуваннями конструкцій.

**БІБЛІОГРАФІЯ**

1. Ковальчук Я. О. Методичний посібник для виконання кваліфікаційної роботи магістра за спеціальністю 192 “Будівництво та цивільна інженерія” / Я. О. Ковальчук, Г. М. Крамар, О. М. Мещерякова. - Тернопіль: ТНТУ, 2020. – 56 с.
2. Schafer, B.W. and Peköz, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses // *Journal of Constructional Steel Research*, 47(3), 1998. pp.193-210
3. Weng, C.C., Peköz, T., Teoman. Residual stresses in cold-formed steel members // *Journal of structural engineering* New York, N.Y., 116 (6), 1990, pp
4. Hancock, G.J. Cold-formed steel structures // *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 59, Issue 4, April 2003. pp. 473-487.
5. Kwon, Y. B. and Hancock, G. J. Tests of cold-formed channel with local and distortional buckling // *Journal of structural engineering*, 118(7), 1992. pp. 1786-1803.
6. Lau, S.C.W., Hancock, G. J. Distortional buckling formulas for channel columns // *Journal of structural engineering*, New York, N.Y., 113 (5), 1987, pp. 1063-1078.
7. Schafer, B.W. Cold-formed steel behavior and design: analytical and numerical modeling of elements and members with longitudinal stiffeners, PhD dissertation, Cornell Univ., Ithaca, N.Y., 1997.
8. Papangelis, J.P., Hancock, G.J. Computer analysis of thin-walled structural members // *Computers and Structures*, №56 (1), 1995, pp. 157-176.
9. Ungermann D., Lübke S., Brune B. Tests and design approach for plain chnels in local and coupled local-flexural buckling based on Eurocode 3 // *Thin-Walled Structures*. 2014. Vol. 81. Pp. 108–120.
10. Moen C.D., Schafer B.W. Experiments on cold-formed steel columns with holes // *Thin-Walled Structures*. 2008. No.46. Pp. 1164–1182.
11. Tarigopula V., Langseth M., Hopperstad O.S., Clausen A.H. Axial

crushing of thin-walled high-strength steel sections // International Journal of Impact Engineering. 2006. No.32. Pp. 847–882.

12. M. Mohammadreza and Sanjay R. A. Improving buckling response of the square steel tube by using steel foam, 2014.
13. Damodar Goud Tankara. Study of energy absorption characteristics of a thin walled tube filled with carbon nano polyurethane foam, 2011.
14. Steeve Chung Kim Yuen, Gerald N. Nurick, Sylvester Piu and Gadija Ebrahim. Response of filled thin-walled square tubes to axial impact load, 2014.
15. David Camenish Gelder. Buckling and Crippling of Square Steel ThinWalled Tubes Fabricated with Symmetrically Overlapping U-Channels and Foam, 2012.
16. EN 1993–1–3:2009 EuroCode 3. Design of Steel Structures. Suplemantery rules for cold–formed members and sheeting.– CEN.– 2009.– 125 p.
17. Moen, Cristopher & Schafer, Benjamin. (2008). Experiments on cold-formed steel columns with holes. Thin-walled Structures - THIN WALL STRUCT. 46. 1164-1182. 10.1016/j.tws.2008.01.021.
18. Rhodes, Jim & Schneider, Falk. The Compressional Behaviour of Perforated Elements.
19. Casafont, M. & Pastor-Artigues, Maria & Roure, Francesc & Peköz, Teoman. (2011). An experimental investigation of distortional buckling of steel storage rack columns. Thin-Walled Structures. 49. 933–946. 10.1016/j.tws.2011.03.016.
20. Silvestre, N. & Camotim, D.. (2004). Distortional buckling formulae for cold-formed steel C- and Z-section members: Part II—Validation and application. Thin-Walled Structures. 42. 1599–1629. 10.1016/j.tws.2004.05.002.
21. Zhang, Peng & Alam, M. Shahria. (2022). Accuracy of Buckling Strength Curves in The Direct Strength Method in Estimating the Axial Strengths of Thin-Walled, Cold-Formed Steel Members.
22. Anbarasu, M. & K S, Vivek & Dar, Mohammad Adil. (2024). Inelastic stability of axially compressed CFS hollow stub columns with edge-stiffened

perforations.

23. Miyazaki, João & Carvalho, Adriano & Martins, Carlos & Rossi, Alexandre. (2023). Evaluation of the interaction between distortional-global buckling in perforated cold-formed steel rack sections. *Structures*. 54. 808-824. 10.1016/j.istruc.2023.05.105.

24. Neiva, Luiz & Sarmanho, Arlene & Faria, Vinícius & Souza, Flávio & Starlino, Juliane. (2018). Numerical and experimental analysis of perforated rack members under compression. *Thin-Walled Structures*. 130. 176-193. 10.1016/j.tws.2018.05.024

25. Elias, Guilherme & Neiva, Luiz & Sarmanho, Arlene & Alves, Vinicius & Castro, Ana. (2018). Ultimate load of steel storage systems uprights. *Engineering Structures*. 170. 53-62. 10.1016/j.engstruct.2018.05.078.

26. Martins, André & Camotim, Dinar & Dinis, Pedro. (2018). On the distortional-global interaction in cold-formed steel columns: Relevance, post-buckling behaviour, strength and DSM design. *Journal of Constructional Steel Research*. 145. 449-470. 10.1016/j.jcsr.2018.02.031.

27. Camotim, Dinar & Dinis, Pedro & Martins, André & Young, Ben. (2017). Review: Interactive behaviour, failure and DSM design of cold-formed steel members prone to distortional buckling. *Thin-Walled Structures*. 128. 108-125. 10.1016/j.tws.2017.07.011.

28. Fratamico, David & Schafer, Benjamin. (2014). Numerical Studies on the Composite Action and Buckling Behavior of Built-Up Cold-Formed Steel Columns. 22nd International Specialty Conference on Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction.

29. K S, Vivek & Baskar, R.. (2021). Global Buckling of CFS Complex Angle Columns.

30. Govindan, Aruna & Sukumar, S. & Velayutham, Karthika. (2015). Study on cold-formed steel built-up square sections with intermediate flange and web stiffeners. *Asian Journal of Civil Engineering*. 16. 919-931.

31. Garstecki, Andrzej & Kąkol, Witold & Rzeszut, Katarzyna. F Classification of local-sectional geometric imperfections of steel thin-walled cold-formed sigma members.

32. B.W. Schafer, Computational modeling of cold-formed steel" steel, in: Proceedings of the Fifth International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, Sydney, Australia, 23-25 June, 2008.

33. G.J. Desalvo, R.W. Gorman, ANSYS, Version 12, Swanson Analysis Systems, Houston, PA, 2010.

34. M.A. El Aghoury, M.T. Hanna, E.A. Amosh, Effect of initial imperfections on axial strength of cold-formed steel single lipped sigma section, EUROSTEEL, Naples, Italy, September 10-12, 2014

35. ПОЛІТОВ, Л. Л.; КОВАЛЬ, І. В. Принципи проектування сейсмостійких будівель. Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 2020, 1: 115-115.

36. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи / Мінбуд України. К: Сталь, 2006. – 70 с.

37. ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво в сейсмічних районах України

38. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

39. Методичні вказівки для написання розділу дипломного проекту з дисципліни «Охорона праці в галузі» / В. Б. Каспрук. - Тернопіль: ТНТУ, 2017. - 14 с.