

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

***“Допустити до захисту”***

Завідувач кафедри БДМБ, канд. техн. наук, професор

\_\_\_\_\_ Владислав НАСТОЯЩИЙ

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2024 р.

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

на тему:

**" Оцінка напружено-деформованого стану сталевих модульних  
будівель з жорсткими з'єднаннями "**

Виконав: здобувач групи БІ-23М-1  
спеціальності 192

“Будівництво та цивільна інженерія”

\_\_\_\_\_ Дмитро Єрошкін

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2024 р.

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи:  
канд. техн. наук, професор

\_\_\_\_\_ Володимир ЯЦУН

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2024 р.

Кропивницький – 2024 рік

Центральноукраїнський національний технічний університет

( повне найменування вищого навчального закладу )

Інститут, факультет, відділення Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра, циклова комісія Будівельних, дорожніх машин і будівництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, голова циклової комісії  
к.т.н. проф. Настоящий В.А.

“ ” 2024 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Єрошкіну Дмитру Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи

Оцінка напружено-деформованого стану сталевих модульних будівель з жорсткими з'єднаннями

керівник проекту (роботи) доцент Яцун В.В.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ” 2024 р. №

2. Строк подання студентом роботи “ 1 ” січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

Об'єкт дослідження – сталеві модульні будинки зі складених модулів з несучими кутовими колонами.

Предмет дослідження – вплив твердості внутрішньомодульних вузлів на напружено-деформований стан модульних будинків при різних силових впливах.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Науково-дослідницький розділ. 2. Охорона праці.

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

1. Мультимедійна презентація, 20 аркушів (A4).

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ                | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|-----------------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|                       |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| Науково-дослідницький | доцент Яцун В.В.                          |                |                  |
| Охорона праці         | доцент Скриннік І.О.                      |                |                  |

7. Дата видачі завдання 2.09.2024

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської роботи         | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Дослідження стану питання                 | 10.09.-15.09.2024             |          |
| 2     | Створення методики проведення випробувань | 15.09.-20.09.2024             |          |
| 3     | Проведення натурного експерименту         | 20.09.-25.09.2024             |          |
| 4     | Аналіз отриманих даних                    | 25.09.-15.10.2024             |          |
| 5     | Розробка заходів з охорони праці          | 15.10.-18.10.2024             |          |
| 6     | Оформлення альбому документів             | 18.10.-20.11.2024             |          |
|       |                                           |                               |          |
|       |                                           |                               |          |
|       |                                           |                               |          |
|       |                                           |                               |          |
|       |                                           |                               |          |

Студент

( підпис )

Єрошкін Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

( підпис )

Яцун В.В.

(прізвище та ініціали)

## Анотація

Наявні дослідження обертальної твердості внутрішньомодульних вузлів проводилися тільки закордонними авторами, при цьому вони розглядали конкретні конструкції вузлів. При зміні параметрів з'єднання, наприклад перетинів елементів, використовувати отримані результати не представляється можливим. Автори не приводять конкретних рекомендацій з конструювання рамних вузлів, тому виникає необхідність у проведенні досліджень обертальної твердості застосовуваних типів внутрішньомодульних вузлів з різними параметрами для встановлення границь рамних з'єднань.

## Annotation

Existing studies of the rotational stiffness of intramodular nodes were conducted only by foreign authors, while they considered specific node designs. When changing the connection parameters, for example, element intersections, it is not possible to use the obtained results. The authors do not provide specific recommendations for the construction of frame assemblies, therefore there is a need to conduct studies of the rotational stiffness of the applied types of intramodular assemblies with different parameters to establish the limits of frame joints.



## Вступ

Наявні дослідження обертальної твердості внутрішньомодульних вузлів проводилися тільки закордонними авторами, при цьому вони розглядали конкретні конструкції вузлів. При зміні параметрів з'єднання, наприклад перетинів елементів, використовувати отримані результати не представляється можливим. Автори не приводять конкретних рекомендацій з конструювання рамних вузлів, тому виникає необхідність у проведенні досліджень обертальної твердості застосовуваних типів внутрішньомодульних вузлів з різними параметрами для встановлення границь рамних з'єднань.

|            |           |             |        |      |                                                                                          |                      |      |        |
|------------|-----------|-------------|--------|------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------|--------|
|            |           |             |        |      | СБМ 24. ПЗ                                                                               |                      |      |        |
|            |           |             |        |      |                                                                                          |                      |      |        |
| Зм         | Лист      | № документа | Підпис | Дата |                                                                                          |                      |      |        |
| Розробив   | Єрошкін   |             |        |      | Оцінка напружено-деформованого стану сталевих модульних будівель з жорсткими з'єднаннями | Літ.                 | Лист | Листів |
| Перевірив  | Яцун      |             |        |      |                                                                                          | М                    | 1    |        |
| Н. контр.  | Дарієнко  |             |        |      |                                                                                          | ЦНТУ<br>Гр. БІ-23М-1 |      |        |
| Затвердив. | Настоящий |             |        |      |                                                                                          |                      |      |        |

## Постановка проблеми

Значний вплив на НДС модульних будинків виявляють поперечні навантаження: вітровий і сейсмічний впливи, які є динамічними. Вирішальне значення на реакцію модульних будинків мають власні частоти коливань. Незважаючи на важливість даного питання, у літературі не достатнього уваги приділено цьому питанню.

**Об'єкт дослідження** – сталеві модульні будинки зі складених модулів з несучими кутовими колонами.

**Предмет дослідження** – вплив твердості внутрішньомодульних вузлів на напружено-деформований стан модульних будинків при різних силових впливах.

**Ціль дослідження** – розвиток підходів у розрахунках і оцінці напружено-деформованого стану сталевих модульних будинків із твердими й податливими внутрішньомодульними з'єднаннями при різних варіантах силової взаємодії.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні завдання:

1. Виконати аналіз стану питання по теорії й практиці сучасних вітчизняних і закордонних досліджень, присвячених модульним будинкам зі сталевим каркасом і їх внутрішньомодульним вузлам.
2. Провести чисельні дослідження застосовуваних типів внутрішньомодульних вузлів для виявлення їх раціональних конструктивних розв'язків, у тому числі, що забезпечують тверде з'єднання.
3. Виконати фізичні випробування для підтвердження результатів, отриманих на стадії чисельних досліджень.

**Наукова новизна дослідження** полягає в наступному:

– запропонований підхід до розрахунків і оцінці напружено-деформованого стану сталевих модульних будинків при різних варіантах

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

силової взаємодії, заснований на обліку впливу обертальної твердості внутрішньомодульних вузлів;

– чисельними дослідженнями встановлене й експериментально підтверджено значний вплив розмірів ребер на обертальну твердість у середині модульних вузлів;

– показаний визначальний вплив піддатливості внутрішньомодульних вузлів на напружено-деформований стан і частоти власних коливань модульних будинків.

**Практична значимість роботи** полягає в наступному:

– розроблені практичні рекомендації у вигляді номограм для конструювання рамних внутрішньомодульних вузлів;

– запропонована методика експериментального визначення обертальної твердості внутрішньомодульних вузлів;

– адаптовані існуючі інженерні методики визначення пульсуючого і сейсмічного впливів стосовно до модульних будинків;

– розроблена програма для ЕОМ по визначенню зусиль, що дозволяє виконувати дослідження і якісний аналіз конструктивних розв'язків модульних будинків.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |

## 1. Аналіз стану питання

### 1.1. Загальні положення й основні визначення

Модульне будівництво за останні 20 років зарекомендувало себе в багатьох напрямках будівельної індустрії. Історично дана технологія в основному використовувалася для переносних або тимчасових будинків, у наш час вона застосовується в будівництві самих різних типів стаціонарних будинків: від гуртожитків, готелів, шкіл, лікарень і офісів до висотних житлових будинків. Розвиток модульного будівництва обумовлений швидкістю зведення й економічними вигодами.

Модульні будинки є на даний момент найбільш прогресивним етапом розвитку швидкобудуємих будинків. Еволюція швидкобудуємих будинків характеризується ступенем заводської готовності будівельних елементів. Можна виділити наступні основні системи швидкобудуємих будинків, застосовуваних у наш час: каркасна система з легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) (рисунки 1, а); панельна система (рисунки 1, б); об'ємно-модульна система (рисунки 1, в). Модульна технологія ґрунтується на виготовленні блоків на заводі, що дозволяє максимально скоротити час і підвищити якість будівельно-монтажних робіт на майданчику.

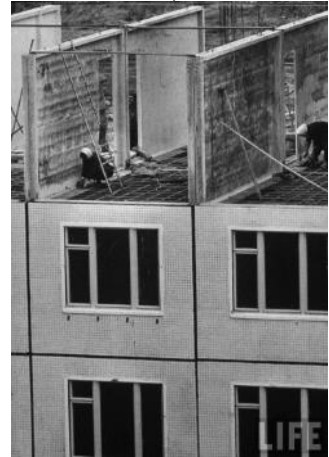
Мінімізація робіт на будівельному майданчику дозволяє робити монтаж практично всесезонно й у важких кліматичних умовах. Модульні будівлі знайшли своє застосування, наприклад, при будівництві в умовах високогір'я; в Арктичній зоні; у віддалених районах півночі; при ліквідації наслідків землетрусів і інших надзвичайних ситуаціях. Саме в подібних умовах найбільш перспективне застосування модульних будинків.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |

а)



б)



в)



Рисунок 1 – Приклади швидкобудуємих будинків: а) каркасний будинок із ЛСТК; б) панельний будинок; в) об'ємно-модульний будинок

У наш час за модульною технологією зводять не тільки тимчасові будівлі, але й довговічні стаціонарні будинки, тому до них пред'являються ті ж вимоги, що й до споруд, будуємих традиційними методами. Однак головною відмінною рисою модульного будівництва є зведення споруд з виготовлених на заводі об'ємних модулів, кожний з яких теж повинен повністю відповідати вимогам функціональної, технічної, економічної доцільності, архітектурної виразності й екологічності.

Конструктивні рішення модульних блоків повинні забезпечувати міцність, стійкість і твердість окремого модуля як у складі каркаса будинку, так і поза ним. Для забезпечення надійної роботи каркаса модульного будинку в цілому також пред'являються підвищені вимоги до точності виготовлення модулів.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

Додатковою вимогою для модульних будинків є транспортна придатність модулів. Об'ємні блоки повинні мати габарити, що дозволяють їх перевезти від заводу до будівельного майданчика. Також конструкції модулів повинні мати достатню міцність і твердість, щоб виключити пошкодження й деформації під час транспортування.

Як було відзначено вище, за модульною технологією в наш час будуються стаціонарні споруди, у будівельній практиці є безліч прикладів капітальних об'ємно-модульних будинків, тому зазначені визначення не повною мірою відповідають усьому спектру модульних будинків.

У сучасній літературі існують більш загальні визначення модульних будинків. Lawson M. приводить визначення модульної конструкції – просторові блоки, які звичайно комплектуються на заводі й доставляються на майданчик в якості основних конструктивних елементів будинку.

Lasey A.W. приводить загальне визначення: «Модульний будинок – це збірний будинок, що складається з повторюваних секцій, називаних модулями».

Модульний будинок являє собою сукупність модулів. При цьому кожан окремий модуль являє собою закінчений будівельний елемент будинку. Для більш чіткого розуміння краще виділити визначення для модульного будинку в цілому й окремого модуля.

Об'ємний модуль (модуль, блок-бокс, блок-контейнер) – це просторова конструкція, виготовлена в заводських умовах, що має несучі й огорожуючі конструкції, що забезпечують задані теплотехнічні параметри, фізико-механічні властивості конструкцій, стійкість, твердість, міцність і незмінюваність геометричних розмірів при транспортуванні, монтажі й у проектному положенні.

Основними конструкційними матеріалами модульних будинків у наш час є сталь, дерево й сталебетон. Модулі з каркасами з дерева легше сталебетонних в 1, 5 рази, що є важливим параметром, що впливають на

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |

вартість транспортування й монтажу. Також монтажні з'єднання сталевих конструкцій більш технологічні в порівнянні зі сталебетонними, що скорочує працезатрати й строки зведення будинку. Сталь має значно більш високу несучою здатністю в порівнянні з деревом, що дозволяє виготовляти модулі більшого розміру й застосовувати більш гнучкі й просторі об'ємно-планувальні рішення будинку. У даній роботі основна увага приділена модульним будинкам зі сталевим каркасом.

## 1.2. Досвід застосування й перспективність будівництва модульних будинків зі сталевим каркасом

Першим швидкобудуємим будинком з металевим каркасом вважається Crystal Palace, побудований в 1851 г. у Лондоні для Всесвітньої виставки Джозефом Пакстоном. Головною відмінною рисою будинку було те, що воно було споруджено з однотипних металевих елементів і вузлових з'єднань, виготовлених на заводі. Дана особливість дозволила надалі розібрати його й звести знову на іншому місці.

Прагнення до подальшої індустріалізації будівництва в США привело до появи в 1930-х рр. безлічі компаній, що робили швидкобудуємі будинки на основі сендвіч-панелей. Усі елементи будинку, включаючи стіни, підлога, стелю, вікна, дах і т.д., проводилися на заводі й потім збиралися разом уже на будмайданчику. У той же час компанія Pierce Foundation почала виробництво інженерних блоків кухонь і ванн, які містили в собі опалення й вентиляцію. Компанія American Houses впровадила дану розробку, як прототип, у будівництво своїх будинків. Інженерні блоки American Houses вважаються одним з перших прикладів об'ємно-модульного будівництва.

Надалі розвитком об'ємно-модульних будинків займалися багато відомих архітекторів й інженерів. Вальтер Гропіус, один із засновників школи Баухауз, і Конрад Ваксманн в 1942 р. створили Packaged House –

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |

масові будинки для ринку США (рисунок 2, а). Бакмінстер Фуллер в 1944 р. створив Wichita House, будинок виготовлявся з алюмінію, з'єднання виконувалися на заклепках (рисунок 2, б). Усі інженерні комунікації компонувалися в центрі будинку, навколо якого утворювався вільний простір. Головною особливістю Wichita House стало те, що він важив 6000 фунтів (~2700 кг) і збирався за один день.

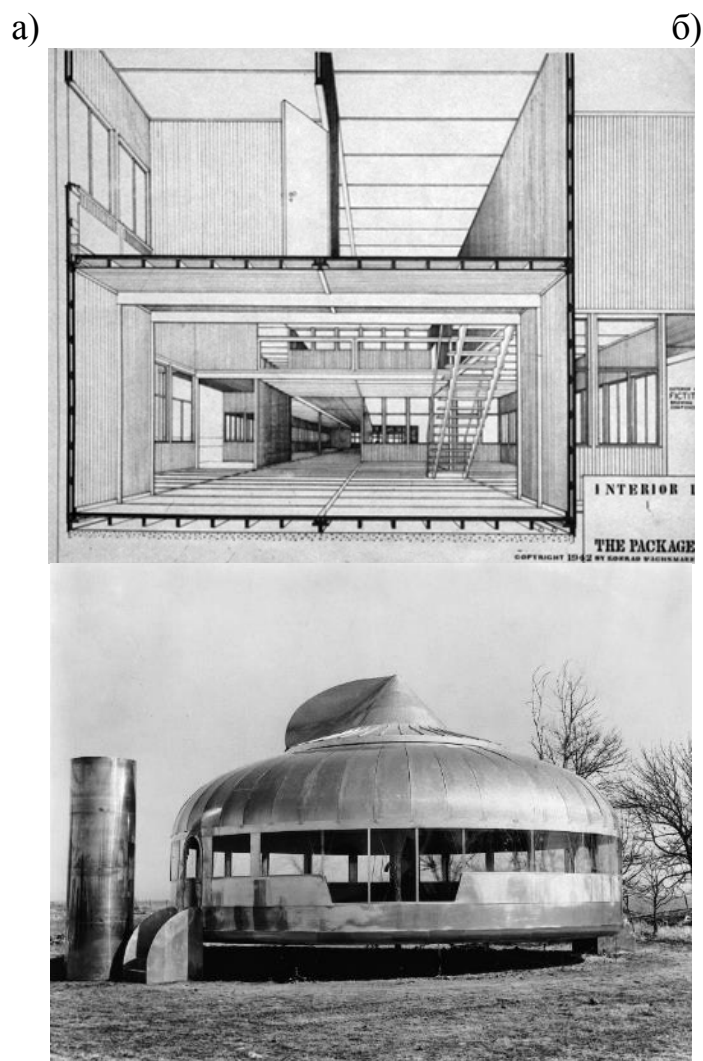


Рисунок 2 – Приклади перших модульних будинків: а) Packaged House; б) Wichita House

Основні блок-модулі, що застосовувалися в 60-х – 70-х роках, мали розмір  $3,0 \times 3,0 \times 2,83$  м і складалися зі сталевого каркаса, забитого в рамі основи, зі стіновими панелями. Дах виконувався плоским або трапецеїдальним. Загальна маса конструкцій блоку – 5650 кг. За період

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |

1978-1980 рр. блочно-комплектним методом було змонтовано 235 котелень великий потужності.

У той же час розбудовувалося будівництво інвентарних будинків контейнерного типу. Максимальні габарити одиночних контейнерів, обумовлені вимогами транспортування, становили 2,8×2,7×9,0 м. Крім застосування одиночних контейнерів, також застосовувалися контейнери з можливістю блокування за рахунок знімних стін.

В 1980-х роках почався етап активної розробки й впровадження модульних (блочно-комплектних) будинків у будівництві.

Деяка робота в цьому напрямку почала проводитися наприкінці 1980-х років: наприклад, були встановлені найбільш раціональні габаритні розміри модулів на основі модульних координативних розмірів.

З розпадом СРСР роботи з подальших розробок, досліджень і будівництву блочно-комплектних будинків зупинилися. Однак в ХХІ столітті знову відновилося впровадження модульних будинків у будівельній галузі, що підтверджує перспективність даної технології.

Об'ємно-модульні будинки в сучасному розумінні являють собою будівлю, що збирається з однотипних блок-модулів максимальної заводський готовності (до 95%). Подібний ступінь заводської готовності досягається використанням сучасного встаткування, що дозволяє у свою чергу зводити будинок із блок-модулів подібно конструкції без використання додаткових конструкцій, вузлів і укрупнення елементів на будівельному майданчику перед монтажем.

Імпульс до нового етапу застосування й будівництву модульних будинків в ХХІ столітті дала поява сучасних технологій виготовлення конструкцій і прогресивних конструктивних розв'язків, що забезпечують зниження маси блоків: сталевого каркаса, огорожень із сендвіч-панелей з високими теплотехнічними характеристиками, високоточних методів виготовлення й складання елементів на заводі.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

У наш час за модульною технологією зводять широкий спектр будівель:

- житлові (рисунок 3, а, б);
- суспільні (офіси, готелі, школи, лікарні) (рисунок 3, у, г);
- виробничі (трансформаторні підстанції).

а)



б)



в)

г)

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |            |      |



Рисунок 3 – Сучасні модульні будинки: а) будинок соціального житла в Лондоні; б) робоче селище на 4000 людей; в) будинок школи в Китаї; г) будівля лікарні

Перспективність застосування модульних будинків відзначають як закордонні дослідники, так і вітчизняні. Значна кількість авторів у своїх статтях проводять аналіз і порівняння таких будинків. Усі автори сходяться в думці, що модульна технологія є найцікавішим напрямком розвитку будівництва малоповерхових будинків, а також будинків з повторюваними об'ємно-планувальними й конструктивними рішеннями, таких як лікарні, готелі, школи й гуртожитки. Дані обставини пояснюються перевагами технології модульного будівництва:

1. Підвищений ступінь заводської готовності всіх конструктивних елементів будинку.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

2. Невелика вага конструкцій за рахунок застосування сучасних будівельних матеріалів.
3. Низька трудомісткість зведення, за рахунок мінімізації монтажних процесів.
4. Висока швидкість монтажу.
5. Більший ступінь уніфікації конструктивних елементів.
6. Висока якість і точність будівельних матеріалів і конструкцій за рахунок їх виготовлення в сприятливих заводських умовах.
7. Можливість монтажу в будь-який час року.
8. Висока енергоефективність огорожуючих композиційних конструкцій.
9. Екологічність.

Абрамян С.Г. приводить відомості про частки індустріального модульного будівництва в загальному обсязі капітального будівництва провідних світових країн. Згідно з наведеними даними, світовий ринок модульного будівництва в 2018 році оцінювався більш ніж в 5,92 трлн. грн. Найбільша частка будівництва модульних будинків припадає на країни Північної Америки, Європи й Азії (рисунок 4).

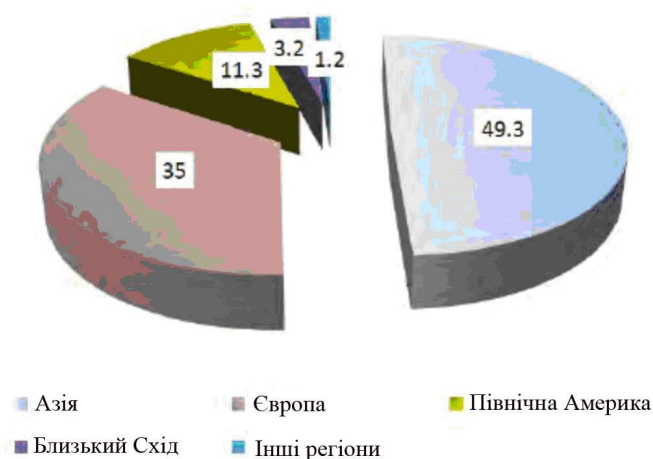


Рисунок 4 – Світовий ринок індустріального модульного будівництва, % [2]

Аналогічні тенденції мають місце й у закордонній практиці

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |

будівельництва: наприклад, приводяться відомості про зростаючі темпи зведення модульних будинків у Мумбаї, що вже становлять 25% складських будівель. Young на прикладі трьох реалізованих проектів житлових будинків у Великобританії показав, що модульне будівництво може бути дешевше на 12% і зведене швидше на 30% у порівнянні із традиційним.

У книзі під загальною редакцією професора Казакова Ю.Н. автори приводять велике дослідження швидкобудуємих будинків з погляду класифікації й технологічності модульних будинків, засноване на аналізі реальних рішень вітчизняних і закордонних компаній виробників. Ґрунтуючись на нормативній тривалості будівництва, автори оцінили ступінь «швидкості будівництва», який виражений формулою:

$$\mu x) = 0,14 \cdot x + 1, \quad (1.1)$$

где  $x$  – тривалість будівництва.

Асаул А.Н., Козаків Ю.Н. зі співавторами відзначають, що для облаштованості вахтових комплексів і селищ найбільш ефективним у більшості випадків є застосування саме об'ємно-блокових будинків. До такого ж виводу приходять Бад'їн Г.М., Тимошенко А.А. указує, що модульні будинки – найбільш кращий варіант для Арктичної зони. Застосування модульних будинків у районах із суворими кліматичними умовами вимагає приділяти особливої уваги проектуванню їх будівельних конструкцій як до всіх капітальних споруд.

Необхідність розвитку модульного будівництва обумовлюється так само потребою в ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій і природних катастроф. Кількість стихійних лих і техногенних катастроф останнім часом неухильно росте (рисунок 5). Причиною особливо сильних руйнувань найчастіше є землетруси. Тому при проектуванні модульних будинків необхідно в тому числі приділяти увагу їх роботі при сейсмічному впливі.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

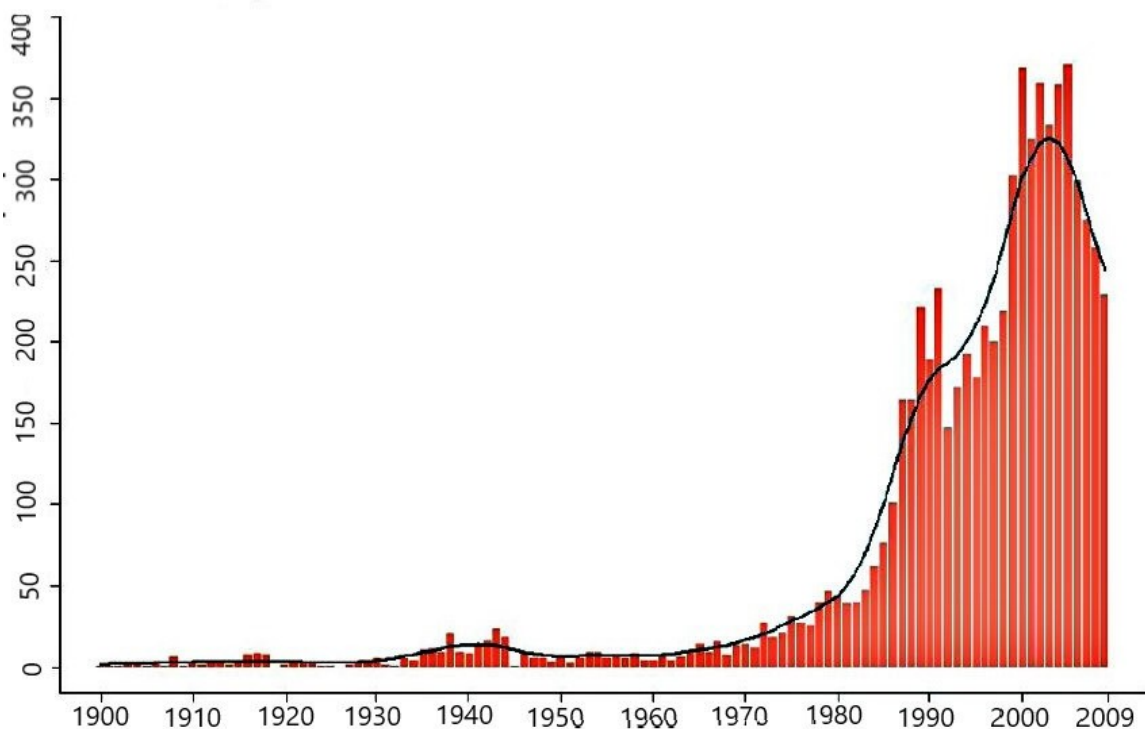


Рисунок 5 – Техногенні катастрофи 1900-2009 рр.

Надійність і довговічність модульних будинків підтверджена в роботі Адама Франка-Міхаеля, який проводив дослідження технічної діагностики й моніторингу швидкобудуємих модульних будинків з урахуванням критеріїв безпеки і якості. Автором було встановлено, що при виконанні періодичних поточних ремонтів термін служби модульних будинків може досягати 80- 90 років, що відповідає стаціонарним будівлям. При цьому досвід зведення даних будинків останнім часом показує високу якість і безпеку експлуатації при скороченні працезатрат, вартості й строків будівництва. Дана технологія дозволяє знижувати собівартість 1 м<sup>2</sup> без шкоди безпеки й довговічності будинку.

Основним недоліком модульних будинків зі сталевих конструкцій є їх вогнестійкість. При цьому вимоги по вогнестійкі до модульних будинків пред'являються ті ж, що й для традиційних споруд. Модулі з незахищеними сталевими елементами мають IV ступенем вогнестійкості. Для доведення модульних будинків до I або II ступені вогнестійкості необхідно влаштовувати вогнезахист конструкцій. Необхідну ступінь

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |

вогнестійкості можна досягти застосуванням конструктивного вогнезахисту, наприклад, обшивкою гіпсокартонними аркушами. Таким чином, застосування сучасних рішень по вогнезахисту сталевих конструкцій дозволяє забезпечити модульним будинкам необхідну ступінь вогнестійкості.

Модульне будівництво є перспективним напрямком у даний час. Дані будинки за рахунок своїх унікальних відмінних ознак мають незаперечну економічну перевагу перед традиційними методами будівництва. Особливе значення це має для важкодоступних регіонів. Незважаючи на наявну історію застосування модульних будинків, найбільше активний розвиток вони одержали саме в ХХІ столітті, що пов'язане з появою нових технологій і матеріалів. При цьому недостатньо досліджень, присвячених силовій роботі й проектуванню конструкцій модульних будинків, а також практично відсутня спеціальна нормативна база, що викликає необхідність проводити дослідження в даному напрямку.

### 1.3. Конструкції модульних будинків

У будівельній практиці сформувалася класифікація модульних будинків по наступних ознаках: за конструктивною схемою, по виконанню несучих елементів модулів, по вузлових з'єднаннях.

За конструктивною схемою модульні будинки підрозділяються на:

1. Схема зі складених модулів (рисунок 6, а).
2. Схема з ядром твердості (рисунок 6, б).
3. Схема із зовнішнім сталевим каркасом (рисунок 6, в).

У схемі зі складених модулів усі навантаження й впливу приймаються кожним блок-модулем. Міцність і стійкість забезпечується каркасом модулів, а також їх вузловими з'єднаннями. У схемі з ядрами твердості вертикальні навантаження сприймаються модулями, а горизонтальні – ядром жорсткості. Ядро твердості може бути залізобетонним або сталевим і влаштовується звичайно в місці сходово-

|      |      |        |        |      |            |      |
|------|------|--------|--------|------|------------|------|
|      |      |        |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док. | Підпис | Дата |            |      |

ліфтового вузла або коридору. У схемі із зовнішнім сталевим каркасом усі навантаження сприймаються зовнішнім кістяком. У цьому випадку модульні блок-бокси виконують по суті функції, що тільки обгороджують. Іноді виділяють схему зі стилобатною частиною. У цьому випадку влаштовується сталевий ростверк зі стійок і балок, на які потім установлюються модулі. По суті, даний розв'язок є різновидом схеми зі складених модулів.



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Конструктивні схеми модульних будинків: а) зі складових модулів; б) з ядром твердості; в) із зовнішнім каркасом

У практиці вітчизняного будівництва найбільше поширення отримала

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

схема зі складених модулів. Це пояснюється тим, що дана схема дозволяє звести до мінімуму роботи на будівельному майданчику. Тому схема зі складених модулів має найменший строк зведення і є найбільш економічно вигідною при будівництві у важкодоступних регіонах. При цьому дана схема вимагає особливої уваги до проектування з погляду силової роботи конструкцій окремих модулів.

По виду виконання несучих конструкцій модулів виділяють:

1. Модулі з опорними кутовими колонами (рисунки 7, а).
2. Модулі з несучими стінами (рисунки 7, б).
3. Ненесучі модулі.

а)



б)



Рисунок 7 – Виконання несучих елементів модулів:

а) з опорними кутовими стійками; б) з несучими стінами

Каркас модулів з несучими стінами утворюється розкісною або хрестової решіткою на зразок ферм, яка сприймає вертикальні й

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

горизонтальні навантаження. Міцність і стійкість модулів визначається саме цими ґратами, які утворюють незмінну систему при шарнірному спряженні елементів. Головним мінусом каркаса з несучими стінами є те, що розмір приміщення в готовому будинку обмежений габаритами модуля.

У модулях з опорними колонами вертикальні навантаження від балок настилу сприймаються горизонтальними рамами, які передають їх на кутові несучі стійки. Горизонтальні навантаження сприймаються колонами (рисунок 8). Балки настилу сприймають тільки навантаження від власної ваги підлоги або стелі й корисну. Стінове заповнення (при наявності) виконує тільки огорожуючі.

Звичайно опорні колони модулів виконуються із квадратних, що пояснюється зручністю кріплення до них горизонтальних балок, а також досить високою несучою здатністю. Найпоширеніші перетини квадратних труб від 100×100 мм до 150×150 мм. Також стійки можуть виконуватися з холодногнутих куточків, однак через низький опір даних перетинів вигину краще використовувати труби. Для балок застосовуються, швелери, холодногнуті с образні елементи, а також квадратні і прямокутні труби.

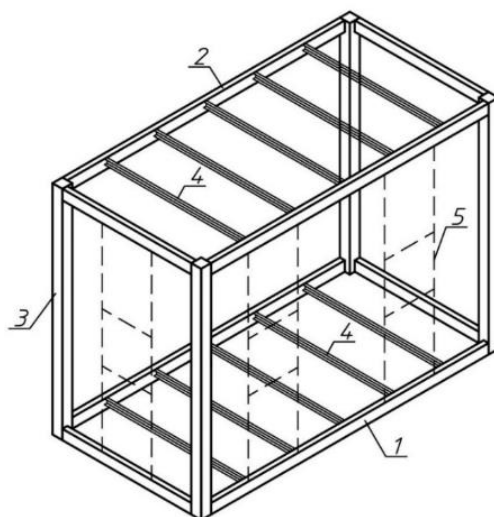


Рисунок 8 – Типовий каркас модуля з опорними колонами: 1 – нижня горизонтальна рама; 2 – верхня горизонтальна рама; 3 – колона; 4- балки настилу; 5 – стінове огороження ( при необхідності)

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

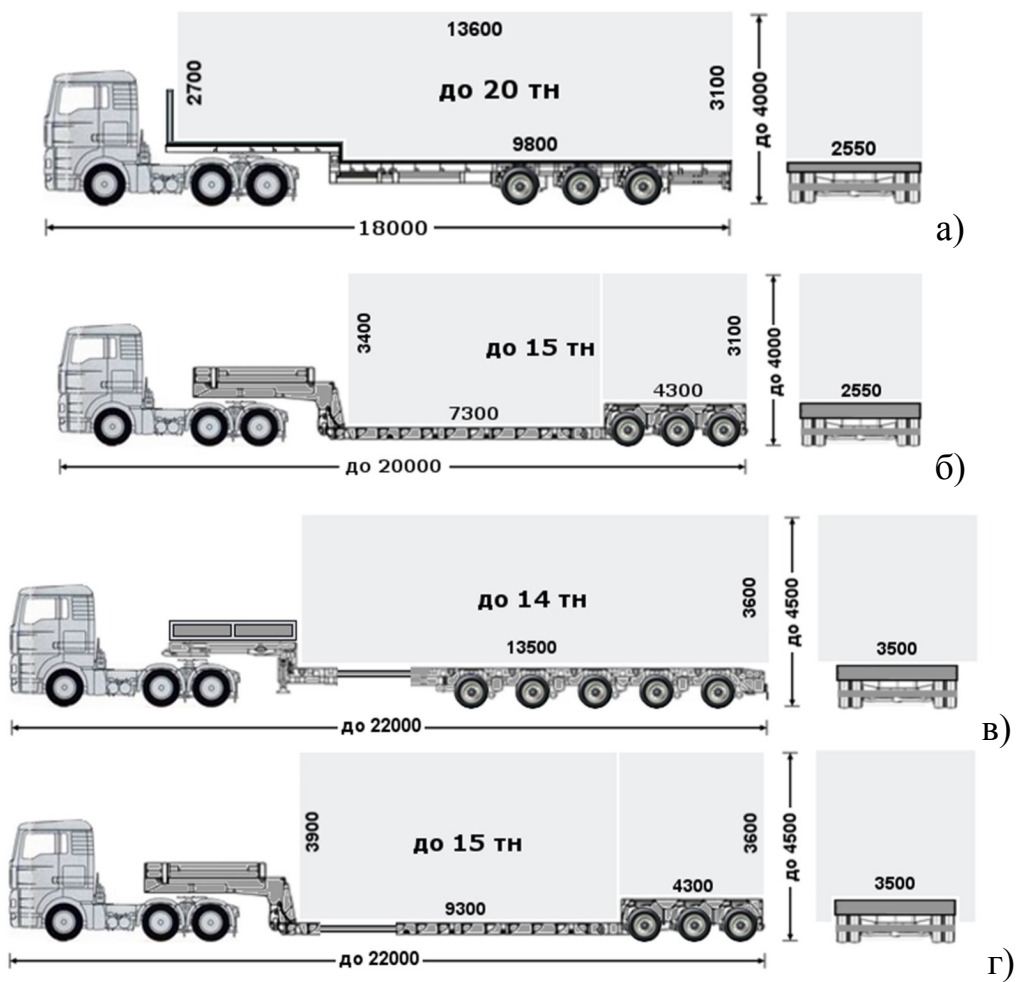


Рисунок 9 – Габарити вантажів з урахуванням розмірів тралів:

- а), б) розміщення габаритного вантажу на напівпричепі WEKON (а) і низкорамному тралі Goldhofer STZ-VL-3A (б);
- в), г) розміщення великогабаритного вантажу на низкорамних тралах Goldhofer STZ-MPA-5AA (в) і Goldhofer STZ-VL-3A (г)

Максимальні розміри модулів визначаються згідно діючих нормативів по дозволених габаритах на перевезення вантажів. Для габаритних вантажів довжина не повинна перевищувати 12 м, ширина 2,55 м, висота від проїзної частини не більш 4 м. Для великогабаритних вантажів допускається збільшення розмірів по ширині до 3,5м і висоті до 4,5 м. Виконання перевезення такого вантажу вже вимагає оформлення спеціального дозволу на перевезення великогабаритного вантажу й підвищених вимог по забезпеченню безпеки руху. З урахуванням розмірів

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

тралів (рисунок 9) можна встановити граничні габарити модулів:

- габаритні модулі: ширина 2,55 м, довжина 12 м, висота 3,4 м;
- великогабаритні модулі: ширина 3,5 м, довжина 12 м, висота 3,9 м.

Мінімальні розміри встановлюються згідно з об'ємно-планувальними розв'язками.

Найастіше застосовуються модулі з опорними кутовими колонами, тому що вони дозволяють формувати більш вільні об'ємно-планувальні рішення будинків. Однак даний розв'язок вимагає особливої уваги до вузлових з'єднань несучих елементів каркаса, тому що саме вони визначають геометричну незмінюваність модуля й стійкість споруди.

По розташуванню в просторі будинку (рисунок 10) вузлові з'єднання підрозділяються на:

1. Внутрішньомодульні з'єднання.
2. Міжмодульні з'єднання.
3. З'єднання з фундаментом.
4. З'єднання з ядром твердості (при наявності).

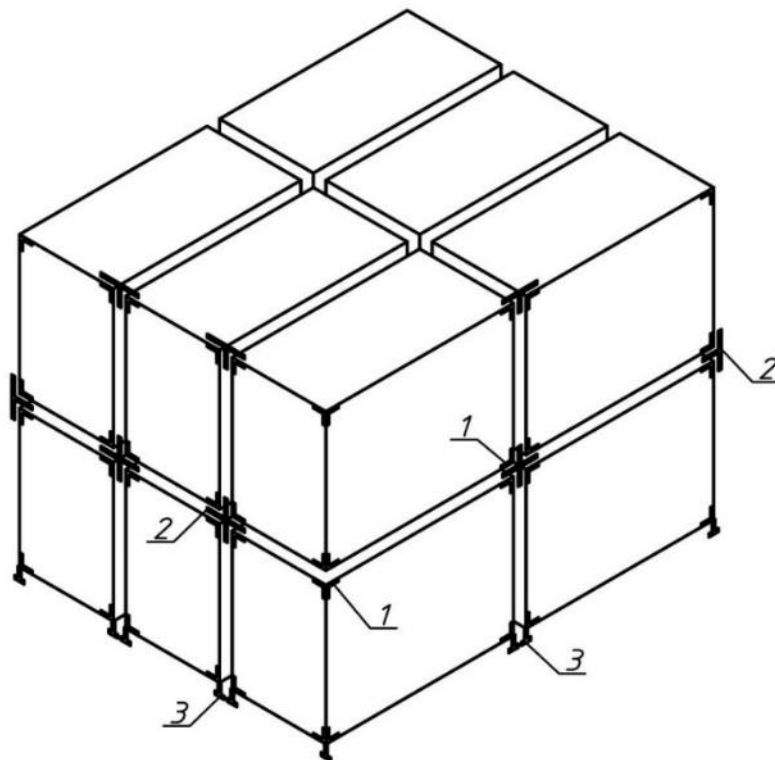


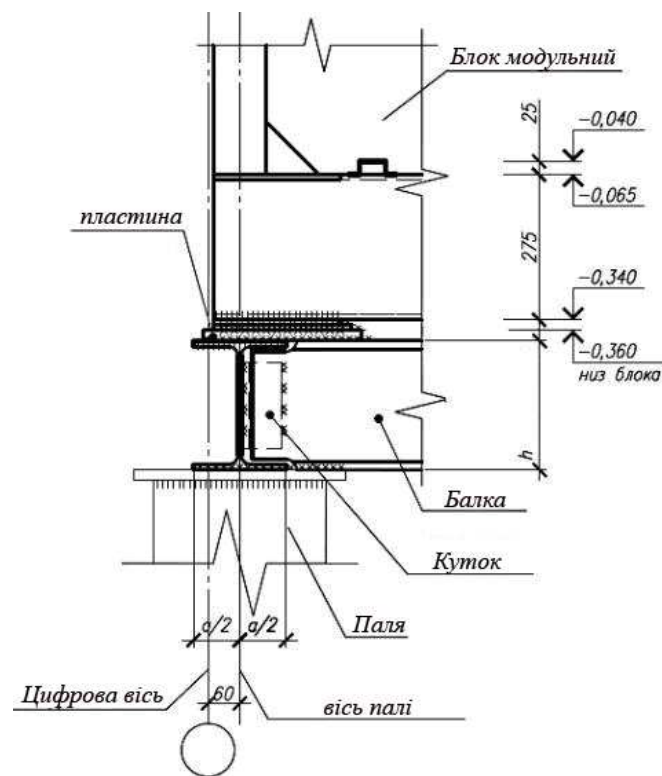
Рисунок 10 – Класифікація з'єднань у модульних будинках: 1 – внутрішньомодульні; 2 – міжмодульні; 3 – з фундаментом

Типи з'єднань із фундаментами:

1. Закладення стійки в бетон (рисунок 11, а).
2. Через анкерні болти (рисунок 11, б).
3. Приварку до сталевого ростверку або закладної деталі фундаменту (рисунок 11, в).

До вузлів кріплення модульних блоків до фундаментів пред'являються ті ж вимоги, що й до традиційних конструкцій. Кріплення повинне забезпечувати передачу навантаження й забороняти горизонтальні зсуви модулів. В вітчизняній практиці проектування перевага віддається приварці модуля через опорні пластини через свою простоту. Такий розв'язок не вимагає застосування спеціальних конекторів і має можливість компенсувати неточності влаштування фундаментів.

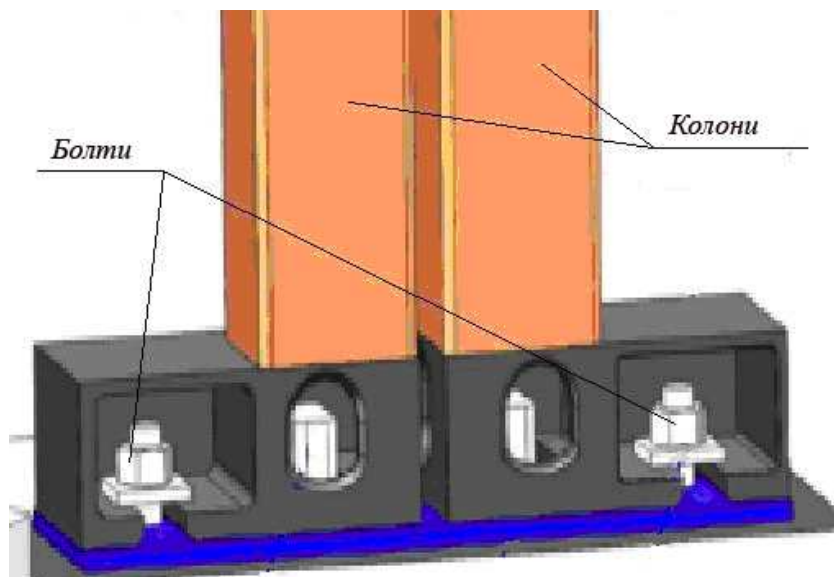
|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |



а)



б)



в)

Рисунок 11 – Варіанти кріплення модульних блоків до фундаментів: а) із заробкою у тіло фундаменту; б) на анкерних болтах; в) приварку до сталевого ростверку

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

Міжмодульні з'єднання можна розділити на наступні основні типи:

1. На болтах (рисунок 12, а).
2. На зварюванні (рисунок 12, б).
3. На конекторах (рисунок 12, в).

Міжмодульні вузли забезпечують з'єднання модулів один з одним при зведенні будинків. В іноземній літературі є значна кількість публікацій, присвячених дослідженням міжмодульних з'єднань: на болтах, на зварюванні на конекторах. Окремо можна виділити з'єднання, що напружуються.

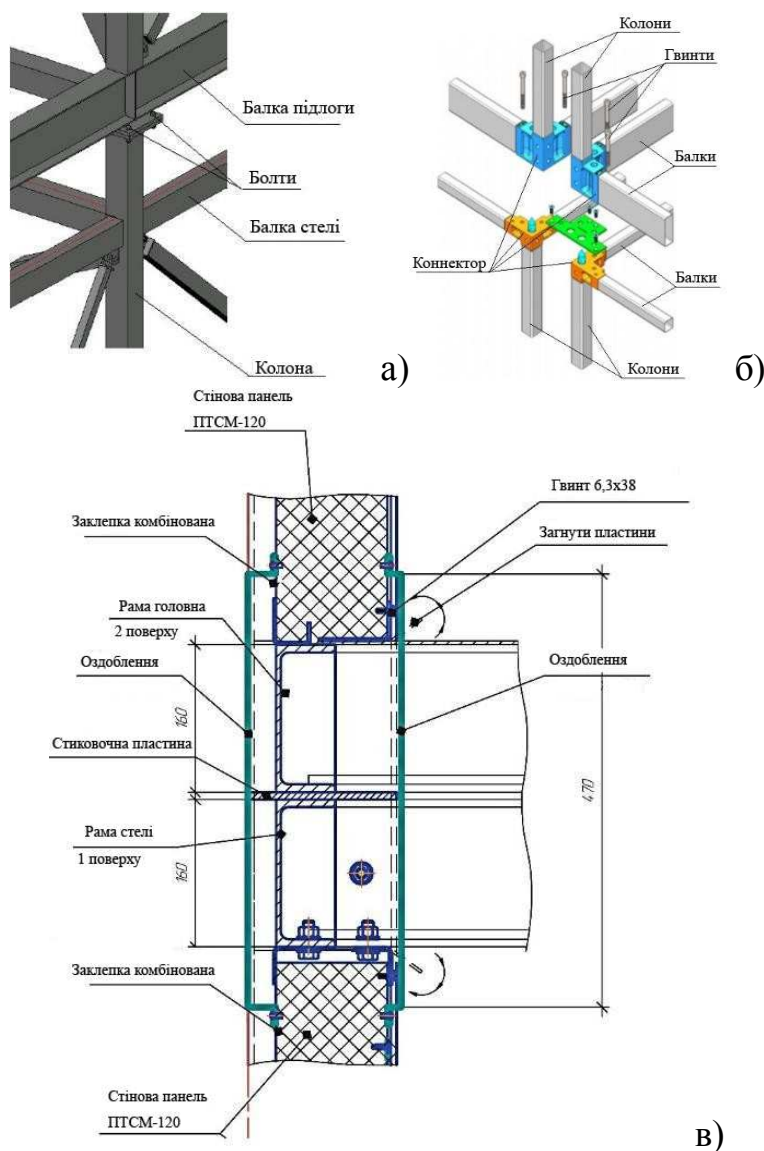


Рисунок 12 – Типи міжмодульних з'єднань: а) на болтах; б) на зварюванні; в) на конекторі (Vector Praxis)

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

У рамках досліджень міжмодульних з'єднань слід зазначити внесок Andrew William Lacey у співавторстві з Wensu Chen, Hong Hao і Kaiming Bi. Автор досліджує твердості міжмодульних з'єднань, які моделювання окремими елементами, а також їх вплив на реакцію спорудження при дії вітрового і сейсмічного навантажень. Lacey проводить чисельні й експериментальні дослідження міжмодульних з'єднань на високоміцних болтах; зі спеціальними противоздвиговими штифтами; а також пропонує нове міжмодульне з'єднання, перевагою якого є можливість регулювання натягу болтів. На основі цих моделей автором розроблені аналітичні формули для обчислення твердості з'єднань, параметри в яких необхідно визначати експериментально.

Багато з робіт з дослідження міжмодульних з'єднань проводилися для будинків з несучими стінами, при цьому колона може мати подовження, утворюючи зазор між балками стелі нижнього модуля й балками підлоги верхнього. У такому випадку при дії поперечного навантаження твердість міжмодульного з'єднання впливає на деформації будинку. У нас звичайно застосовуються міжмодульні з'єднання через прокладки. Даний тип з'єднання має дуже високу зсувну твердість і, отже, малий внесок у поперечні деформації спорудження, особливо для будинків з модулів з опорними кутовими колонами.

На підставі виконаного огляду робіт, присвячених дослідженням модульних будинків, можна зробити наступні висновки:

1. Модульне будівництво будинків зі сталевим каркасом одержало широкий розвиток і застосування на рубежі XX-XXI століть як у нас, так і за кордоном у різних природно-кліматичних і сейсмічних умовах, однак існуючу нормативну базу не можна визнати достатньою для практичного застосування.

2. У практиці вітчизняного будівництва найпоширеніше будівництво будинків зі складених модулів з опорними кутовими колонами

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

й міжмодульними з'єднаннями через прокладки, при цьому вузлові з'єднання балок з колонами виконуються на зварюванні з безпосереднім примиканням елементів.

3. Незважаючи на значний обсяг існуючих досліджень вузлів модульних будинків, дотепер накопичено недостатньо інформації з конструювання твердих внутрішньомодульних з'єднань. Для даних з'єднань необхідно проводити дослідження обертальної твердості з різними параметрами для встановлення границь твердих вузлів.

4. Відсутні аналітичні дослідження напружено-деформованого стану модульних будинків, у рамках яких установлюється прямий зв'язок між геометрією будинку, характеристиками елементів і жорсткістю вузлів. Визначення власної частоти коливань будинку є важливим параметром при вивченні НДС модульних будинків на динамічні впливи (сейсміка й пульсація вітру).

## **2. Чисельні дослідження твердості внутрішньомодульних вузлових з'єднань**

Як було відзначено в огляді, обертальна твердість внутрішньомодульних вузлів значно впливає на напружено-деформований стан модульних будинків. При цьому наявних робіт, присвячених цьому питанню, на даний момент недостатньо для виявлень рекомендацій з конструювання рамних внутрішньомодульних вузлів. Тому необхідно провести більш широкі дослідження з різними параметрами вузлових з'єднань.

### **2.1. Методологія чисельних досліджень обертальної твердості**

Проведення фізичних експериментів є дорогим і дуже

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |

працевзатратним процесом. Для класифікації по твердості типу з'єднання, а не тільки одного конкретного вузла, необхідно провести серію досліджень. Дані досліджень вимагають розгляду значної кількості з'єднань з різними параметрами, для цього зручно використовувати чисельні методи. Як відзначалося в першому розділі, найбільш зручним програмним комплексом для визначення обертальної твердості з'єднань є IDEA Statica.

IDEA Statica є верифікованим комплексом, спеціально створеним для розрахунків вузлових з'єднань. Програма виконує визначення напружено-деформованого стану вузла, розрахунки на стійкість компонентів вузла згідно Eurocode, розрахунки на граничний момент (утвір пластичного шарніра), розрахунки граничного навантаження на вузол і розрахунки твердості прикріплення елемента. У рамках даного дослідження важливий останній режим розрахунків. Програмний комплекс робить побудову графіка залежності « момент-кут повороту» і обчислення обертальної твердості згідно з деформаціями й зусиллям, обумовленим у процесі розрахунків.

Як відзначалося раніше, найпоширенішими перетинами балок модульних будинків є квадратні руби й швелери, стійок – квадратні труби. Також у вітчизняній практиці будівництва найчастіше використовуються внутрішньомодульні з'єднання на зварюванні. Тому далі будуть розглядати наступні зварені вузлові з'єднання (у дужках написано скорочене найменування):

- стійка із квадратної труби, балка із квадратної труби, без ребер жорсткості ( Тр-Тр);
- стійка із квадратної труби, балка зі швелера типу «П», без ребер жорсткості ( Тр-Шв);
- стійка із квадратної труби, балка із квадратної труби, з вертикальним ребром жорсткості ( Тр-Тр-Вр);
- стійка із квадратної труби, балка зі швелера типу «П», з

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

вертикальним ребром жорсткості ( Тр-Шв-Вр);

– стійка із квадратної труби, балка зі швелера типу «П», з горизонтальним ребром жорсткості ( Тр-Шв-Гр).

Схеми з'єднань представлено на рисунку 13.

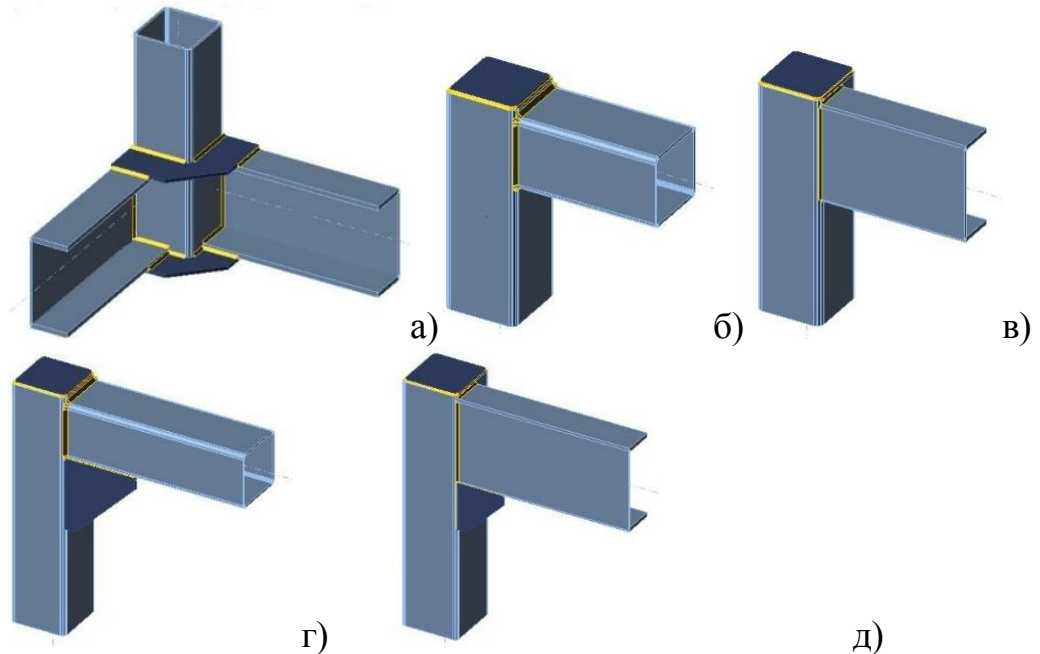


Рисунок 13 – Типи розглянутих вузлових з'єднань:  
а) Тр-Тр; б) Тр-Шв; в) Тр-Тр-Вр; г) Тр-Шв-Вр; д) Тр-Шв-Гр

Моделі вузлів без ребер і з вертикальними ребрами складаються зі стійки й одного ригеля, що примикає, тому що при визначенні обертальної твердості важлива саме конструкція примикання одного елемента до іншого. Моделі вузлів з горизонтальними ребрами включають дві балки, тому що конструкція має на увазі кріплення пластин до обох ригелів.

Довжини елементів, що входять у модель, установлюються автоматично ПК IDEA Statica, виходячи зі співвідношень: 1,5 висоти перетину швелера й 2 висоти перетину труби. Згідно із принципами режиму розрахунків на обертальну твердість розрахунковим елементом є ригель, інші елементи є опорними й закріплені по всіх шести ступеням волі. Навантаження прикладається тільки до балки у вигляді зосередженого одиничного моменту, обчислення граничного моменту  $M_{j,Rd}$  і побудова

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

залежності « $M-\varphi$ » проводиться автоматично ПК IDEA Statica. Розбивка моделей здійснена програмним комплексом на одиночні елементи розмірами в інтервалі від 10 до 50 мм. Параметри розбивки, котрі програма використовує за замовчуванням, були отримані її авторами експериментально в процесі виконання великого числа верифікаційних розрахунків, тому забезпечують достатню точність і збіжність результатів.

У моделях вузлів Тр-Тр, Тр-Шв, Тр-Тр-Вр і Тр-Шв-Вр є опорна плита зверху стійки, яка відіграє роль заглушки, а також служить для з'єднання модуля по висоті або для обпирання кроквяних конструкцій. У з'єднаннях Тр-Шв-Гр роль опорної плити виконує нижнє горизонтальне ребро.

Перетин із квадратних труб прийняті за ДСТ 30245-2003, перетин зі швелерів з паралельними гранями полиць – за ДСТ 8240-97 [31]. Для з'єднань без ребер жорсткості й з вертикальними ребрами прийнята сталь С245 для всіх елементів, катети зварених швів  $k_f=4$  мм, матеріал зварювання – Е42. Марка сталі, катети й матеріали швів не виявляють значного впливу на обертальну твердість розглянутих з'єднань, тому в даному дослідженні ці параметри незмінні. Для з'єднань із горизонтальними ребрами жорсткості силові характеристики елементів і зварених швів можуть значно впливати. Тому для даного типу вузлів розглянуто два варіанти: сталь С245, матеріал зварювання Е42, катети швів  $k_f=4$  мм; сталь С345, матеріал зварювання Е50, катети швів  $k_f=4$  мм.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |

## 2.2. З'єднання без елементів твердості

### 2.2.1. Вузли Тр-Тр

У рамках дослідження обертальної твердості з'єднань без елементів твердості розглянуті вузли з'єднання стійки із квадратної труби з балками із квадратних труб і швелерів (рисунок 14).

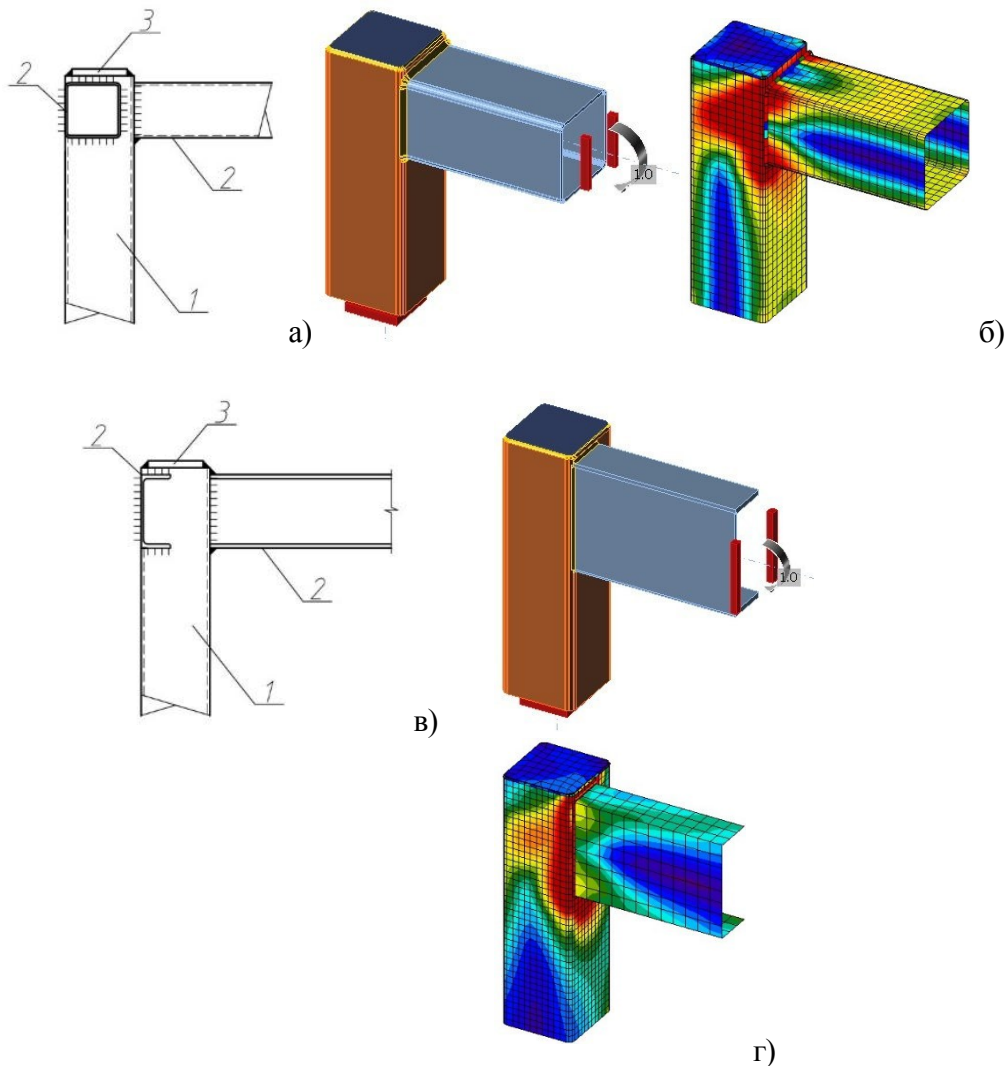


Рисунок 14 – Типи розглянутих вузлів без елементів твердості:  
а) Схема Тр-Тр; б) Розрахункова й МКЕ моделі Тр-Тр; в) Схема Тр-Шв;  
г) Розрахункова й МКЕ моделі Тр-Шв.  
1 – стійка; 2 – ригель; 3 – заглушка

У ході дослідження обертальної твердості вузлів типу Тр-Тр розрахований ряд схем з різними параметрами елементів, що з'єднуються. До стійок одного перерізу по черзі кріпилися ригелі різних перетинів

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

розмірами, що не перевищуюють габаритів стійки. При з'єднанні балки меншого перетину, ніж перетин колони, вирівнювання зроблене по зовнішній грані елементів (рисунок 14). Для дослідження прийнятий наступний набір перетинів елементів:

стійки квадратні труби: 70×4, 70×5, 70×6, 80×4, 80×5, 80×6, 90×4, 90×5, 90×6, 100×4, 100×5, 100×6, 120×4, 120×5, 120×6;

ригелі квадратні труби: 60×4, 60×5, 60×6, 70×4, 70×5, 70×6, 80×4, 80×5, 80×6, 90×4, 90×5, 90×6, 100×4, 100×5, 100×6, 120×4, 120×5, 120×6.

Результати визначення  $S_{j,ini}$  (МН□м/рад) по кожному з'єднанню наведено в таблиці 1. За отриманими даними видно, що товщина стінки ригеля незначно впливає на твердість з'єднання, а іноді може навіть знижувати її. Збільшення товщини полиці стійки приводить до збільшення твердості і самої полиці, що приводить до зменшення кута повороту й до підвищення обертальної жорсткості вузла. Найбільшу твердість мають з'єднання стійок і ригелів однакової ширини перетину, тому що в цьому випадку відсутні згинальні деформації полиці, і момент повністю передається на стінки стійок.

Значення обертальних твердостей кріплення балки із квадратної труби до стійки із квадратної труби на зварюванні без додаткових елементів твердості є досить низькими. Для оцінки границь класифікації даних вузлів побудовані графіки граничних значень  $S_{j,R}$ , при яких з'єднання можна вважати твердим. Дані графіки побудовані тільки для ригелів із труб з товщиною стінки 4 мм, тому що застосування товстостінних труб не доцільно із точки зору твердості примикання. Характер зміни обертальної твердості властивий усім розглянутим варіантам вузлів типу Тр-Тр, для аналізу в надано графік для ригеля із квадратної труби 100×4 (рисунок 15).

На рисунку 15 суцільною кривою показана обертальна твердість  $S_{j,R}$  з'єднання, при якій вузол можна вважати твердим залежно від прольоту, визначена по формулі при значенні  $kb=25$  – для рам без системи зв'язків.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |

На графіку горизонтальними лініями показані значення обертальної твердості  $S_{j,ini}$  кріплення ригеля до стійок різних перетинів. З'єднання класифікується як тверде, якщо горизонтальна лінія розташовується вище кривої  $S_{j,R}$ . Наприклад, при кріпленні балки із труби 100×4 до колони із труби 100×5 при прольоті ригеля більш 4 м вузол є твердим, при прольоті менш 3 м – напівжорстким.

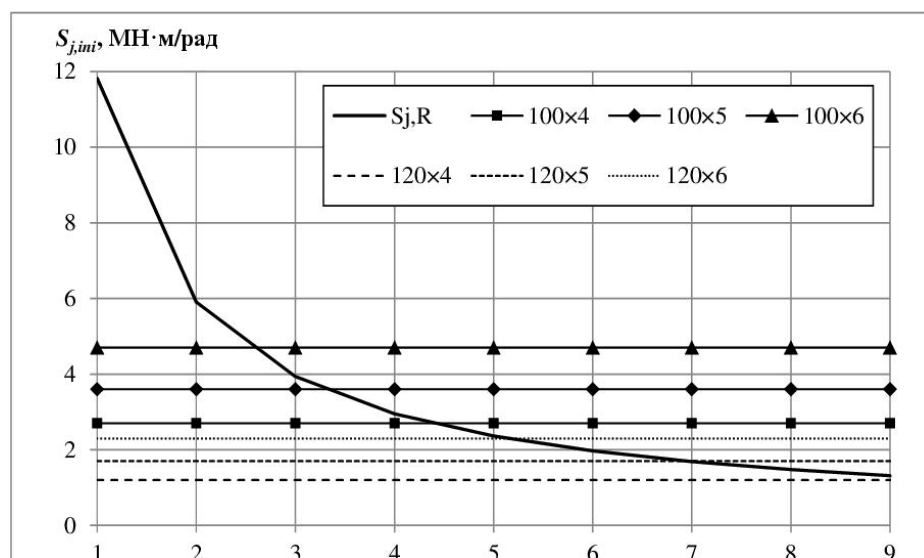


Рисунок 15 – Зміни значень  $S_{j,R}$  з'єднання -р-р для ригеля із квадратної труби 100×4

З аналізу графіків зміни обертальної твердості видно, що вузловий розв'язок при безпосередньому кріпленні ригеля до стійки може бути як жорстким, так і напівжорстким. При збільшенні перетину балки збільшується мінімальний проліт, при якому вузол можна вважати твердим. Так при сполученні зі стійкою 120×4 вузол кріплення ригеля залежно від його перетину є жорстким при наступних значеннях прольоту:

- для труб 60×4 більш 5,7 м;
- для труб 70×4 більш 7,6 м;
- для труб 80×4 більш 8,4 м;
- для труб 90×4 більш 9,5 м;
- для труб 100×4 більш 9,9 м;
- для труб 120×4 більш 5,5 м.

Тому що модулі мають поперечний розмір менш 3 м, то в загальному випадку при розрахунках модульних будинків з'єднання ригелів і стійок із квадратних труб на зварюванні без елементів твердості слід класифікувати як напівжорсткі.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

Таблиця 2.1 – Значення обертальної твердості  $S_{j,ini}$  (МН□м/рад) вузлових з'єднань -р--р

| Елемент |       | Ригель |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |
|---------|-------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         |       | 60×4   | 60×5 | 60×6 | 70×4 | 70×5 | 70×6 | 80×4 | 80×5 | 80×6 | 90×4 | 90×5 | 90×6 | 100×4 | 100×5 | 100×6 | 120×4 | 120×5 | 120×6 |
| Стойка  | 70×4  | 0,5    | 0,6  | 0,4  | 1,3  | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –     | –     | –     |
|         | 70×5  | 0,8    | 0,8  | 0,7  | 1,9  | 1,9  | 1,6  | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –     | –     | –     |
|         | 70×6  | 1,2    | 1,4  | 1,1  | 2,5  | 3,1  | 2,4  | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –     | –     | –     |
|         | 80×4  | 0,5    | 0,5  | 0,4  | 0,7  | 0,8  | 0,6  | 1,7  | 1,8  | 1,4  | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –     | –     | –     |
|         | 80×5  | 0,7    | 0,7  | 0,6  | 1,1  | 1,1  | 0,9  | 2,4  | 2,4  | 2,1  | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –     | –     | –     |
|         | 80×6  | 0,9    | 1,1  | 0,9  | 1,5  | 1,8  | 1,4  | 3,1  | 3,8  | 2,9  | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –     | –     | –     |
|         | 90×4  | 0,4    | 0,4  | 0,3  | 0,6  | 0,6  | 0,5  | 0,9  | 1,0  | 0,8  | 2,2  | 2,3  | 1,8  | –     | –     | –     | –     | –     | –     |
|         | 90×5  | 0,6    | 0,6  | 0,5  | 0,9  | 0,9  | 0,8  | 1,4  | 1,4  | 1,2  | 3,0  | 2,9  | 2,6  | –     | –     | –     | –     | –     | –     |
|         | 90×6  | 0,8    | 1,0  | 0,8  | 1,2  | 1,4  | 1,1  | 1,9  | 2,3  | 1,8  | 3,9  | 4,6  | 3,6  | –     | –     | –     | –     | –     | –     |
|         | 100×4 | 0,4    | 0,4  | 0,3  | 0,6  | 0,6  | 0,4  | 0,8  | 0,8  | 0,6  | 1,2  | 1,2  | 1,0  | 2,7   | 2,8   | 2,2   | –     | –     | –     |
|         | 100×5 | 0,6    | 0,6  | 0,5  | 0,8  | 0,8  | 0,7  | 1,1  | 1,1  | 1,0  | 1,7  | 1,7  | 1,6  | 3,6   | 3,6   | 3,3   | –     | –     | –     |
|         | 100×6 | 0,8    | 1,0  | 0,7  | 1,1  | 1,3  | 1,0  | 1,5  | 1,8  | 1,4  | 2,4  | 2,8  | 2,2  | 4,7   | 5,5   | 4,4   | –     | –     | –     |
|         | 120×4 | 0,4    | 0,4  | 0,3  | 0,5  | 0,6  | 0,4  | 0,7  | 0,7  | 0,6  | 0,9  | 0,9  | 0,8  | 1,2   | 1,2   | 1,0   | 3,8   | 4,0   | 3,2   |
|         | 120×5 | 0,7    | 0,6  | 0,5  | 0,7  | 0,7  | 0,6  | 0,9  | 0,9  | 0,9  | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,7   | 1,7   | 1,5   | 5,1   | 5,0   | 4,6   |
|         | 120×6 | 0,8    | 1,0  | 0,7  | 1,0  | 1,2  | 0,9  | 1,2  | 1,5  | 1,2  | 1,6  | 1,9  | 1,6  | 2,3   | 2,6   | 2,2   | 6,7   | 7,7   | 6,2   |

## Вузли Тр-Шв

У рамках дослідження обертальної твердості вузлів типу Тр-Шв розрахован ряд схем з різними параметрами елементів, що з'єднуються. До стійок одного перетину по черзі кріпилися ригелі різних перетинів, при цьому по конструктивним міркуванням виключені варіанти з'єднань, у яких ширина полиці швелера більше ширини перетину стійки. Вирівнювання балок і колон виконано по зовнішній грані стінки швелера (рисунок 14, в). Для дослідження прийнято наступний набір перетинів елементів:

- стійки квадратні труби: 80×4, 80×5, 80×6, 90×4, 90×5, 90×6, 100×4, 100×5, 100×6, 120×4, 120×5, 120×6;
- ригелі швелери: 12П, 14П, 16П, 18П, 20П, 22П, 24П, 27П, 30П.

Результати визначення  $S_{j,ini}$  (МН□м/рад) по кожному з'єднанню наведено в таблиці 2. За даними таблиці видно, що так само, як для вузлів -р--р, спостерігається незначне збільшення обертальної твердості при збільшенні товщини полиці стійки. Різке збільшення твердості з'єднання відбувається в випадках, коли ширина ригеля близька до ширини колони. При цьому для ряду з'єднань  $S_{j,ini}$  дорівнює нескінченності, тобто вони є рамними.

Таблиця 2 – Значення обертальної твердості  $S_{j,ini}$  (МН□м/рад) вузлових з'єднань -р-Шв

| Елемент |       | Ригель |     |     |     |      |      |      |      |     |
|---------|-------|--------|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----|
|         |       | 12П    | 14П | 16П | 18П | 20П  | 22П  | 24П  | 27П  | 30П |
| Стойка  | 80×4  | 1,6    | 2,3 | 3,0 | 5,5 | 14,2 | –    | –    | –    | –   |
|         | 80×5  | 2,2    | 3,2 | 4,6 | 8,3 | 22,9 | –    | –    | –    | –   |
|         | 80×6  | 3,0    | 4,4 | 6,5 | 8,7 | 46,1 | –    | –    | –    | –   |
|         | 90×4  | 1,5    | 2,2 | 2,6 | 3,9 | 5,9  | 11,0 | ∞    | –    | –   |
|         | 90×5  | 2,1    | 2,9 | 3,8 | 5,5 | 8,4  | 16,8 | ∞    | –    | –   |
|         | 90×6  | 2,8    | 3,9 | 5,1 | 7,4 | 11,5 | 24,2 | ∞    | –    | –   |
|         | 100×4 | 1,5    | 2,1 | 2,4 | 3,5 | 4,8  | 8,6  | 10,7 | 71,2 | ∞   |
|         | 100×5 | 2,1    | 2,9 | 3,5 | 4,8 | 6,5  | 9,1  | 16,7 | 83,1 | ∞   |

|      |      |          |        |      |            |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|--|--|--|--|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ |  |  |  |  | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |  |  |  |  |      |

|              |     |     |     |     |     |      |      |      |      |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| <b>100×6</b> | 2,8 | 3,7 | 4,6 | 6,3 | 8,7 | 11,6 | 23,6 | ∞    | ∞    |
| <b>120×4</b> | 0,6 | 2,2 | 2,4 | 3,2 | 4,2 | 5,1  | 6,1  | 9,1  | 13,6 |
| <b>120×5</b> | 1,0 | 2,9 | 3,4 | 4,4 | 5,6 | 6,9  | 8,6  | 12,9 | 20,2 |
| <b>120×6</b> | 1,4 | 3,8 | 4,4 | 5,7 | 7,1 | 8,7  | 11,3 | 16,9 | 28,7 |

Тому що класифікація типу вузла залежить від прольоту ригеля, для більшої наочності в таблиці 3 наведені мінімальні значення прольотів, при яких вузлове з'єднання можна вважати твердим, обчислені по формулі:

Таблиця 3 – Мінімальні значення прольоту (м) ригелів для твердих вузлів типу Тр-Шв

| Елемент |              | Ригель |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------|--------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|         |              | 12П    | 14П  | 16П  | 18П  | 20П  | 22П  | 24П  | 27П  | 30П  |
| Стілка  | <b>80×4</b>  | 10,1   | 11,3 | 13,2 | 10,5 | 5,7  | –    | –    | –    | –    |
|         | <b>80×5</b>  | 7,3    | 8,1  | 8,6  | 6,9  | 3,6  | –    | –    | –    | –    |
|         | <b>80×6</b>  | 5,4    | 5,9  | 6,1  | 6,6  | 1,8  | –    | –    | –    | –    |
|         | <b>90×4</b>  | 10,7   | 11,8 | 15,2 | 14,7 | 13,7 | 10,2 | 0    | –    | –    |
|         | <b>90×5</b>  | 7,7    | 9,0  | 10,4 | 10,5 | 9,6  | 6,7  | 0    | –    | –    |
|         | <b>90×6</b>  | 5,8    | 6,7  | 7,8  | 7,8  | 7,0  | 4,6  | 0    | –    | –    |
|         | <b>100×4</b> | 10,7   | 12,4 | 16,5 | 16,4 | 16,8 | 13,0 | 14,3 | 3,1  | 0    |
|         | <b>100×5</b> | 7,7    | 9,0  | 11,3 | 12,0 | 12,4 | 12,3 | 9,2  | 2,7  | 0    |
|         | <b>100×6</b> | 5,8    | 7,0  | 8,6  | 9,1  | 9,3  | 9,6  | 6,5  | 0    | 0    |
|         | <b>120×4</b> | 26,7   | 11,8 | 16,5 | 17,9 | 19,2 | 21,9 | 25,1 | 24,2 | 22,6 |
|         | <b>120×5</b> | 16,1   | 9,0  | 11,6 | 13,1 | 14,4 | 16,2 | 17,8 | 17,1 | 15,2 |
|         | <b>120×6</b> | 11,5   | 6,9  | 9,0  | 10,1 | 11,4 | 12,8 | 13,6 | 13,0 | 10,7 |

Значення таблиці 3 обчислені за результатами, наведеним у таблиці 2, тому мінімальний проліт умовно дорівнює нулю відповідає елементам, для яких було визначено нескінченно велике значення оберальної жорсткості. Більшість ригелів повинні мати проліт більш 6 м, щоб вузли можна було віднести до рамних. Виключення становлять вузлові з'єднання, у яких ширина полиці швелера близька до ширини перетину стійки, у цьому випадку вплив деформацій полиці колони малий, і момент передається відразу на стінки труб, що приводить до зменшення кутів повороту ригелів і, отже, до збільшення оберальної твердості.

Для оцінки границь класифікації даних вузлів побудовані графіки

граничних значень  $S_{j,R}$ , при яких з'єднання можна вважати твердим. При побудові графіків  $S_{j,R}$  швелерних перетинів використана логарифмічна вертикальна шкала. Характер зміни обертальної твердості властивий усім розглянутим варіантам вузлів типу -р-Шв (рисунок 16). Принцип читання рисунку 16 такий же, як для рисунку 15: суцільною кривою показана обертальна твердість  $S_{j,R}$ ; горизонтальними лініями показані значення обертальної твердості  $S_{j,ini}$  кріплення ригеля до стійок різних перетинів.

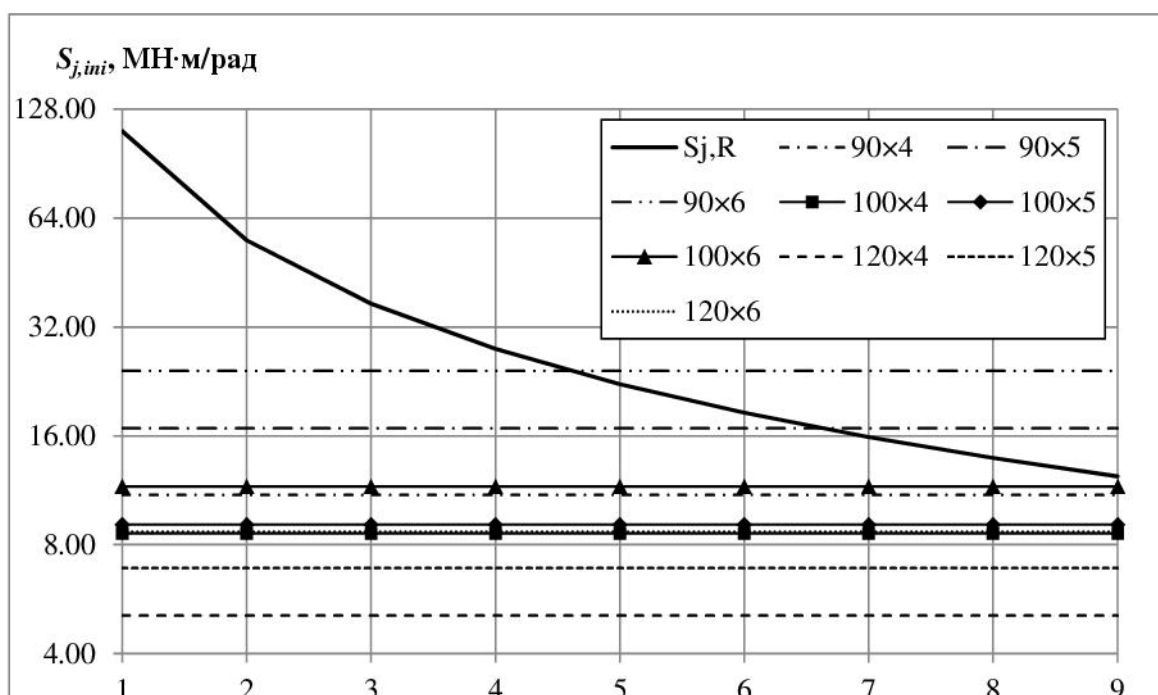


Рисунок 16 – Зміни значень  $S_{j,R}$  з'єднання -р-Шв для ригеля зі швелера 22П

З аналізу графіків зміни обертальної твердості видно, що з'єднання з безпосереднім кріпленням швелера до стійки із квадратної труби при прольотах від 1 м до 9 м найчастіше є напівжорстким. При цьому слід відмітити, що швелери мають значну згинальну твердість, тому для них потрібні високі значення  $S_{j,ini}$  або більші прольоти. Однак, у деяких окремих випадках з'єднання можна класифікувати як тверде при будь-яких прольотах. До таких вузлів відносяться з'єднання швелерів 24П зі стійками із труб 90x4, 90x5, 90x6, швелерів 27П з трубою 120x6, а також 30П з

100×4, 100×5, 100×6.

Для модульних будинків характерні прольоти ригелів близько 3 м поперек блоку й 6-9 м у поздовжньому напрямку, тому вузли примикання швелерів до стійок із квадратних труб без ребер жорсткості в загальному випадку класифікуються як напівжорсткі. Таким чином, при розрахунках модульних будинків необхідно враховувати обертальну твердість даного типу вузлів.

### 2.3. З'єднання з вертикальним ребром жорсткості

У рамках дослідження обертальної твердості з'єднань із вертикальними ребрами жорсткості розглянуті вузли з'єднання стійки із квадратної труби з балками із квадратних труб і швелерів (рисунок 17). Згідно дослідженням з'єднань без ребер, мінімальну твердість мають вузли зі стійками з найменшою товщиною стінки. Тому в рамках розгляду з'єднань із ребрами твердості розглянуті вузли кріплення до стійок з товщиною стінки 4 мм. Вертикальні ребра прийняті однобічними по зовнішніх гранях балок і стійок. Висота ( $h_p$ ) і ширина ребра прийняті рівними, підрізування під 45° з відступом 20 мм від граней несучих елементів. Товщина ребер прийнята рівною 4 мм, тому що найбільший вплив на обертальну твердість з'єднання виявляють їх габарити. При цьому з конструктивних міркувань установлений мінімальний переріз ребра  $h_p=40$  мм. Завданням досліджень є встановлення габаритів вертикальних ребер жорсткості, при яких з'єднання є твердим при будь-якому прольоті ригеля.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |

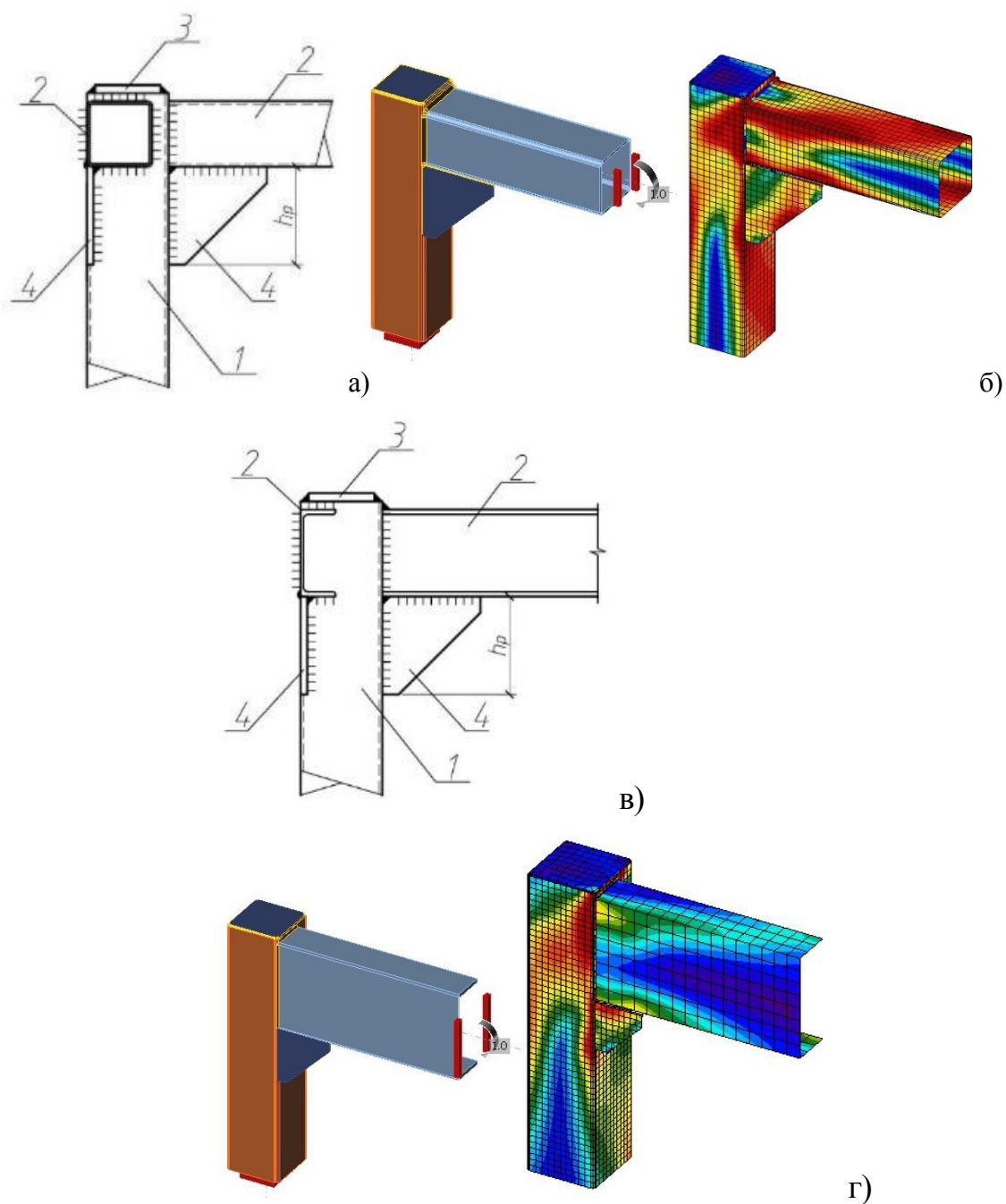


Рисунок 17 – Типи розглянутих вузлів з вертикальними ребрами жорсткості: а) Схема Тр-Тр-Вр; б) Розрахункова й МКЕ моделі Тр-Тр-Вр; в) Схема Тр-Шв-Вр; г) Розрахункова й МКЕ моделі Тр-Шв-Вр.

1 – стійка; 2 – ригель; 3 – заглушка;  
4 – ребро

### Вузли Тр-Тр-Вр

Дослідження обертальної твердості вузлів типу Тр-Тр-Вр проведені шляхом розрахунків ряду схем з різними параметрами елементів, що

з'єднуються. Змінюваним параметром була висота ребра, змінювана із кроком 10 мм. Для дослідження прийнятий наступний набір перетинів основних елементів:

- стійки квадратні труби: 80×4, 90×4, 100×4, 120×4;
- ригелі квадратні труби: 80×4, 90×4, 100×4, 120×4.

Результати визначення  $S_{j,ini}$  (МН·м/рад) по кожному з'єднанню приведені. На рисунку 18 представлений графік зміни обертальної твердості в залежності від розмірів ребра для кріплення ригеля із квадратної труби 90×4 до стійок різного перетину. Для всіх розглянутих варіантів з'єднань криві  $S_{j,ini}$  мають схожий характер зміни.

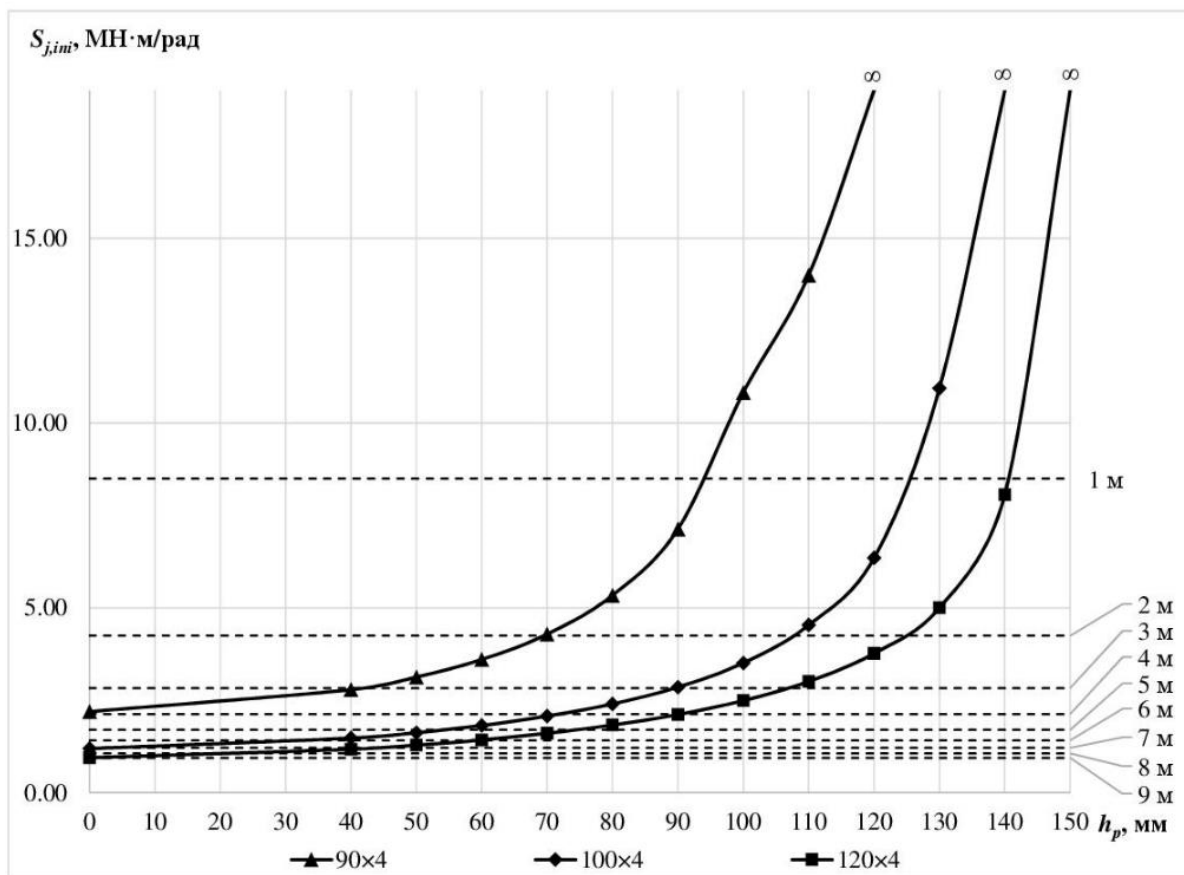


Рисунок 18 – Зміни значень  $S_{j,ini}$  з'єднання -р--р-Вр залежно від розмірів ребра ( $h_p$ ) для ригеля із квадратної труби 90×4

Горизонтальними лініями на рисунку 18 показані значення  $S_{j,R}$  для різних прольотів ригеля. Вузол є твердим у тому випадку, якщо крива  $S_{j,ini}$  розміщується вище горизонтальної лінії. Знак «∞» означає, що при даному

розмірі ребра вузол є твердим при будь-якому прольоті.

За графіком 18 видно, що обертальна твердість спочатку плавно збільшується, при цьому при прольотах балки від 3 м до 9 м  $Sj_R$  має досить низькі значення. При розмірах вертикального ребра, близьких до розмірів перетинів ригеля, виходить різке збільшення  $Sj_{ini}$ , що необхідно для твердих вузлів при прольотах менш 2 м. Таким чином, при конструюванні вузлових з'єднань типу Тр-Тр- Вр при прольотах 3÷6 м слід вибирати розміри вертикальних ребер по фактичним значенням обертальної твердості. При прольотах менш 3 м має сенс вибирати розміри ребра, відповідні до вузлів з нескінченною обертальною твердістю. На рисунку 19 наведена номограма з мінімальними розмірами  $h_p$ , при яких вузли типу -р--р-Вр є однозначно твердими.

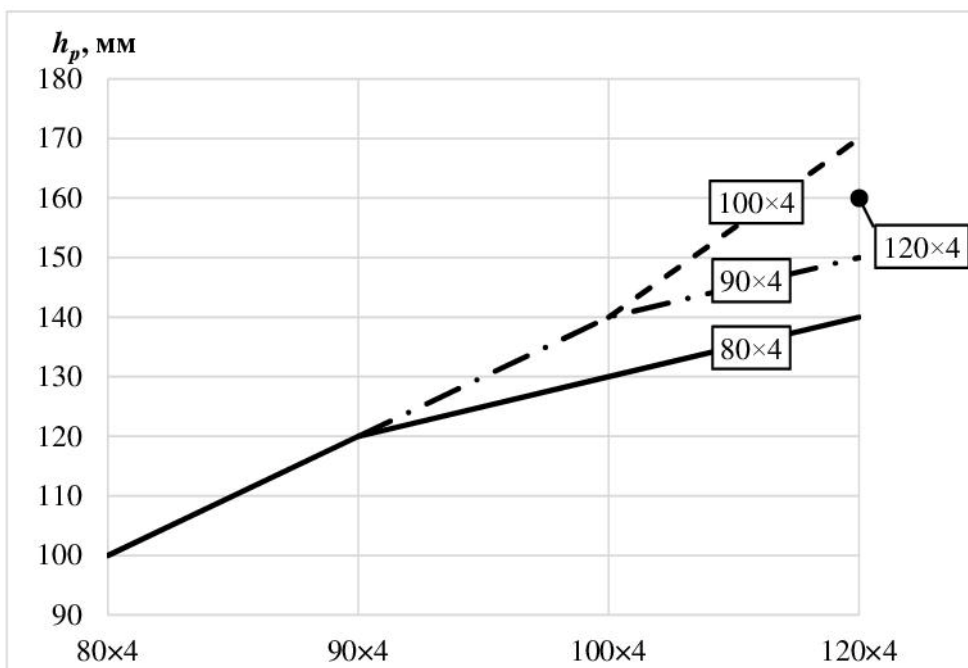


Рисунок 19 – Розміри ребер ( $h_p$ ) для твердих вузлів типу -р--р-Вр

### 2.3.1. Вузли Тр-Шв-Вр

У ході дослідження обертальної твердості вузлів типу Тр-Шв-Вр розрахований ряд схем з різними параметрами елементів, що з'єднуються. Змінюваним параметром була висота ребра, змінювана із кроком 10 мм.

Для дослідження прийнято наступний набір перетинів основних елементів:

- стійки квадратні труби: 80×4, 90×4, 100×4, 120×4;
- ригелі швелери: 12П, 14П, 16П, 18П, 20П, 22П, 24П, 27П, 30П.

Для кожного з'єднання за результатами чисельних досліджень обертової твердості побудовані графіки її зміни в залежності розмірів ребра. Криві мають схожий характер зміни, тому на рисунку 20 представлений графік для ригеля зі швелера 18П.

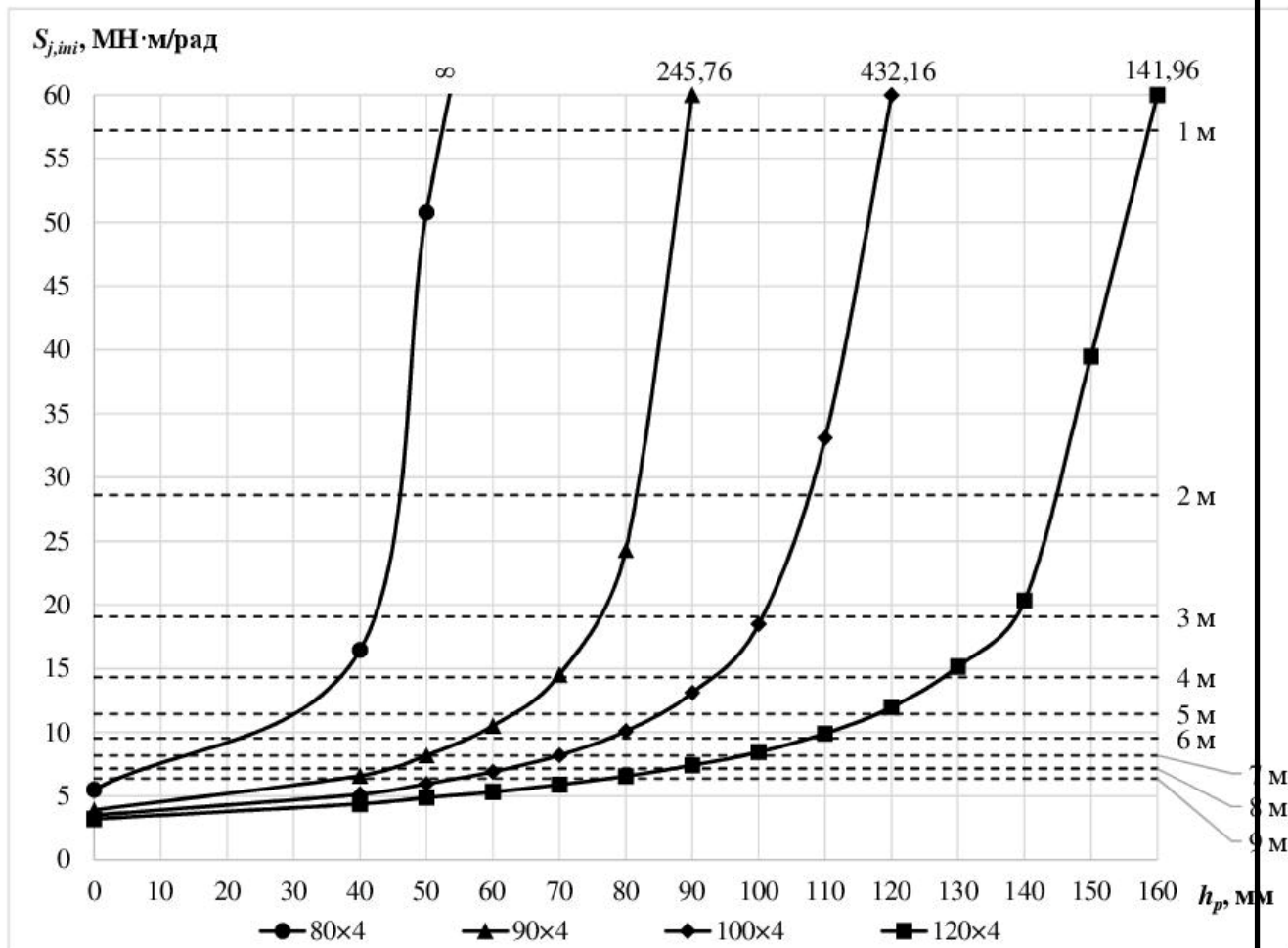


Рисунок 20 – Зміни значень  $S_{j,ini}$  з'єднання -р-Шв-Вр залежно від розмірів ребра ( $h_p$ ) для ригеля зі швелера 18П

Горизонтальними лініями на рисунку 20 показані значення  $S_{j,R}$  для різних прольотів ригеля, при яких вузол вважається твердим. Знак « $\infty$ » означає, що при даній висоті ребра вузол є твердим при будь-якому прольоті. Чисельні значення, наприклад 432,16 МН·м/рад для кріплення

до стійки із труби  $100 \times 4$  при  $h_p = 120$  мм, показують  $S_{j,ini}$  при такому розмірі ребра, даної величини досить для віднесення вузла до твердих прольотів балок менш 1 м. При збільшенні розміру ребра на 10 мм оберտальна твердість буде нескінченно великою.

З рисунку 20 видно, що зміна обертальної твердості кріплення залежно від розмірів ребра має нелінійний характер. При цьому через більш високу згинальну твердість швелерів  $S_{j,R}$  має більш високі значення порівнянні із квадратними трубами. При розмірах ребра, близьких до розмірів перетину стійки, відбувається різке збільшення  $S_{j,ini}$ . Подібний характер зміни спостерігається для всіх розглянутих варіантів перетинів ригелів. Виключення складають тільки з'єднання швелера 20П зі стійкою  $80 \times 4$  і 22П с  $90 \times 4$ , для котрих уже при мінімальному розмірі ребра 40 мм досягаються значення обертової твердості вище мінімальної, відповідної до твердих вузлів.

Для вузлів типу Тр-Шв-Вр має сенс установлювати розміри вертикальних ребер, що відповідають нескінченній обертальній твердості, при будь-яких з розглянутих прольотів ригеля. Установити аналітичну залежність між розмірами ребра й перетинами елементів для конструювання рамних вузлів важко. Тому за результатами досліджень розглянутих перетинів ригелів залежно від перетинів стійок складена номограма з мінімальними розмірами вертикальних ребер для конструювання твердих внутрішньомодульних вузлів (рисунок 21).

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

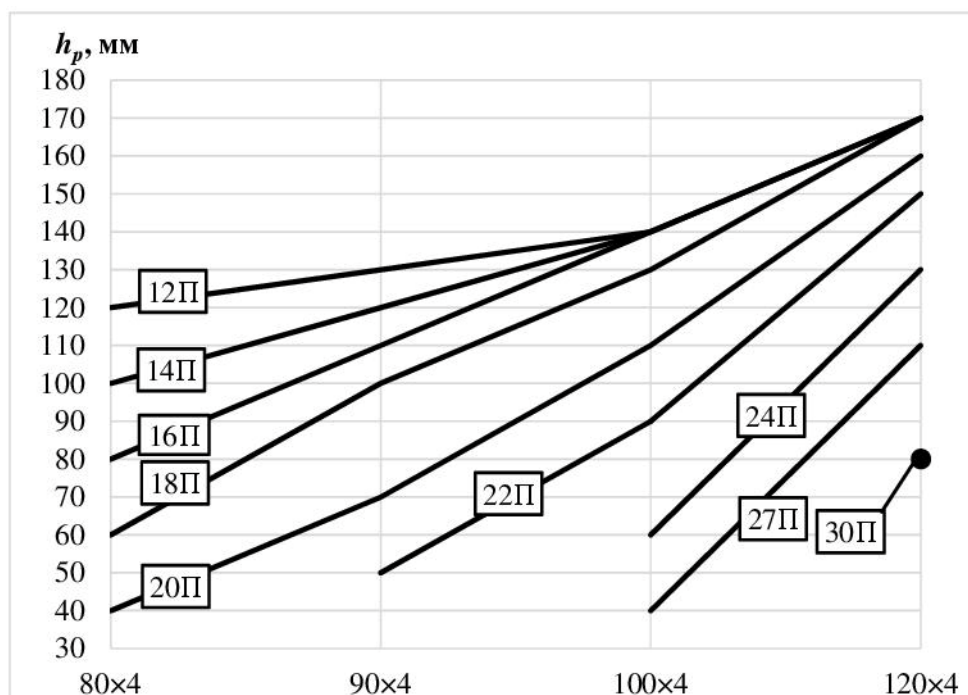


Рисунок 21 – Розміри ребер ( $h_p$ ) для твердих вузлів типу -р-Шв-Вр

#### 2.4. З'єднання з горизонтальними ребрами жорсткості

У рамках дослідження обертальної твердості з'єднань із горизонтальними ребрами жорсткості розглянуті вузли з'єднання стійки із квадратної труби з балками зі швелерів (рисунок 22). Так само, як для з'єднань типу Тр- Шв-Вр, у рамках вивчення з'єднань із горизонтальними ребрами жорсткості розглянуті вузли кріплення до стійок з товщиною стінки 4 мм. Горизонтальні пластини мають однакову товщину й розташовуються зверху й знизу ригелів. Верхнє ребро має виріз під колону й приварюється до неї. Нижнє ребро приварюється до полиць балок і торцю стійки, виконуючи при цьому також функції заглушки й стикувальної пластини. Підрізування пластин прийняте під  $45^\circ$  з початковим розміром фаски 30 мм. Мінімальний розмір ребра прийнятий на 40 мм більше розміру перетину колони.

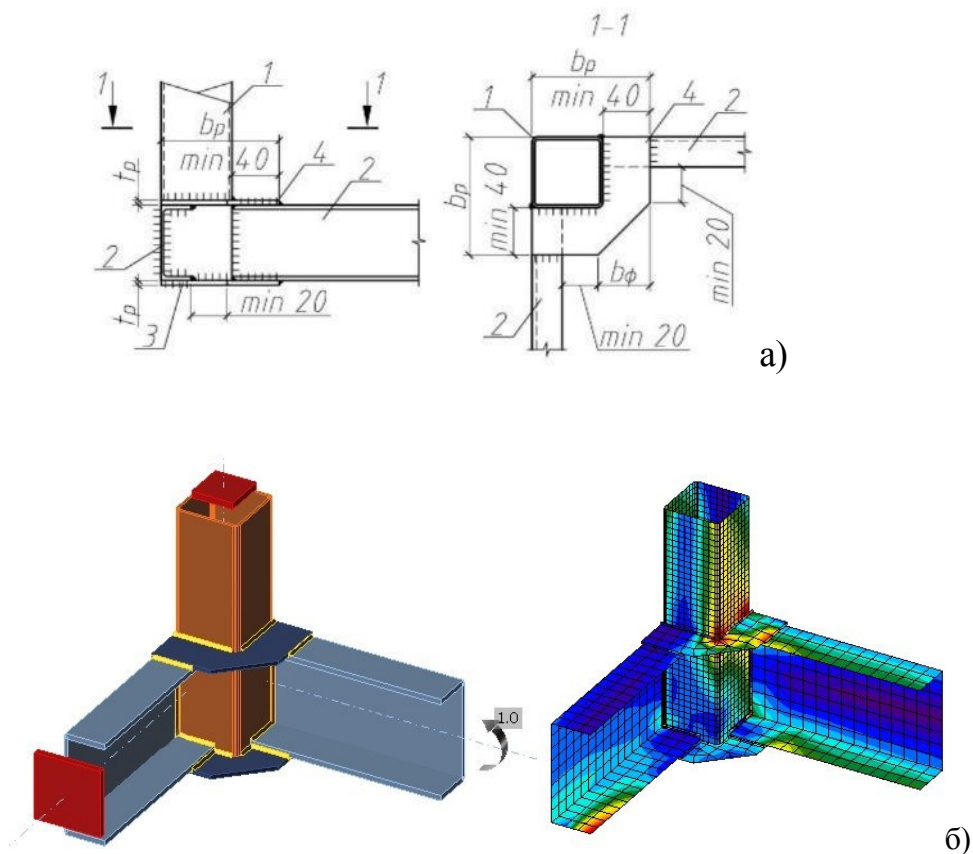


Рисунок 22 – Розглянутий тип вузлів з горизонтальними ребрами жорстко- сти: а) Схема Тр-Шв-Гр; б) Розрахункова й МКЕ моделі Тр-Шв-Гр. 1 – стійка; 2 – ригель; 3 – нижнє ребро; 4 – верхнє ребро

Вузли з горизонтальними ребрами мають більш складну конструкцію в порівнянні з вузлами з вертикальними ребрами. Тому для з'єднань -р-Шв- ГР у якості змінюваних параметрів прийняті ширина ( $b_p$ ) і товщина ( $t_p$ ) ребра, тому що обоє цих параметра впливають на обертальну твердість вузла. Розміри пластин ( $b_p$ ) змінювалися із кроком 10 мм, при цьому розмір фаски ( $b_\phi$ ) збільшувався з тим же кроком. Товщина ребра, змінювалася в інтервалі від 4 мм до 10 мм із кроком 1 мм. Для дослідження прийнятий наступний набір перетинів основних елементів:

- стійки квадратні труби: 80×4, 90×4, 100×4, 120×4;
- ригелі швелери: 12П, 14П, 16П, 18П, 20П, 22П, 24П, 27П, 30П.

Для оцінки впливу силових характеристик елементів з'єднання на твердість з'єднання також розглянуто два варіанти: сталь С245, матеріал

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |            |      |

зварювання – E42, катети швів  $k_f=4$  мм; С345, матеріал зварювання – E50, катети швів  $k_f=4$  мм. Завданням досліджень є встановлення габаритів горизонтальних ребер жорсткості, при яких з'єднання є твердим при будь-якому прольоті ригеля.

#### 2.4.1. Вузли Гр-Шв-Гр (С245, E42)

Результати визначення  $S_{j,ini}$  (МН·м/рад) для вузлів з'єднання стійки із квадратної труби й ригеля зі швелера зі сталі С3245 з матеріалом зварювання, відповідаючому електродам E42, мають схожий характер зміни, для ілюстрації на рисунку 23 представлений графік для ригеля зі швелера 16П, який кріпиться до стійки із квадратної труби 120×4.

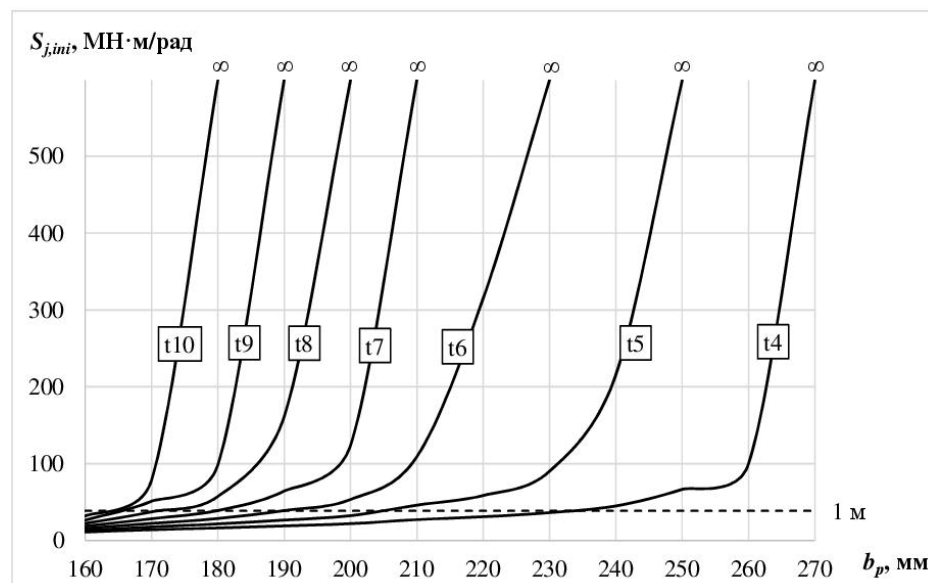


Рисунок 23 – Зміни значень  $S_{j,ini}$  з'єднання -р-Шв-Гр залежно від ширини ( $b_p$ ) і товщини ребра ( $t_p$ ) для стійки із труби 120×4 і ригеля зі швелера 16П (С245, E42)

На рисунку 23 криві лінії показують зміну обертової твердості з'єднання із пластинами різної товщини. Знак « $\infty$ » означає, що при даній ширині ребра ( $b_p$ ) вузол є твердим при будь-якому прольоті ригеля й кут повороту дорівнює нулю. Горизонтальна штрихова лінія показує значення обертової твердості  $S_{j,R}$ , відповідної до твердого кріплення балки

прольотом 1 м.

Згідно з рисунком 23 ширина горизонтальних ребер  $b_p$ , що відповідає однозначно твердим вузлам, варіюється в досить широкому діапазоні: від 180 мм для  $t_p=10$  мм до 270 мм для  $t_p=4$  мм. Для оцінки раціональних розмірів складений графік зміни обсягу  $V_p$  горизонтальних пластин, обчислений по формулі:

Для варіантів з'єднань зі стійкою із квадратної труби 120×4 графік зміни  $V_p$  представлено на рисунку 24.

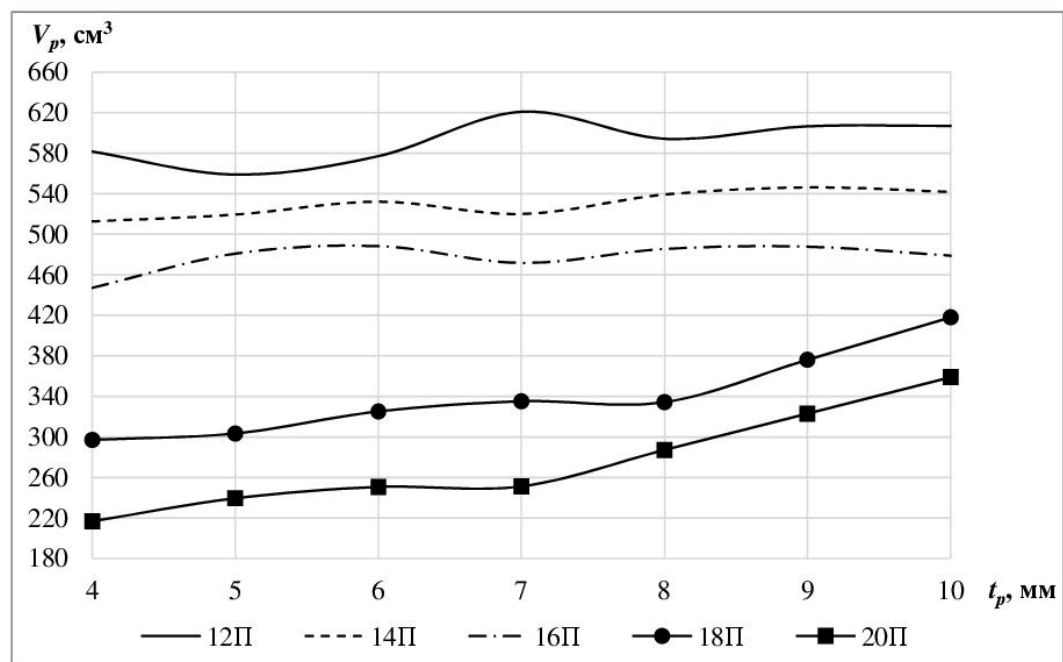


Рисунок 24 – Зміни об'єму горизонтальних ребер ( $V_p$ ) з'єднання Тр-Шв-Гр залежно від товщини ребра ( $t_p$ ) для стійки із труби 120×4 і ригеля зі швелерів 12П, 14П, 16П, 18П і 20П (С245, Е42)

За даними рисунка 24 видно, що для ригелів зі швелерів 12П, 14П і 16П обсяг пластин слабо змінюється. Для ригелів зі швелерів 18П і 20П спостерігається різкий стрибок  $V_p$  при товщинах пластин більш 8 мм. Даний ефект пояснюється тим, що нескінченна твердість з'єднання досягається при мінімальній ширині ребра з товщинами 7 і 8 мм, тобто застосування більш товстих пластин нераціонально. Для всіх розглянутих вузлів спостерігається подібний стрибок об'єма пластин при товщинах 7 і 8 мм. У такий спосіб рекомендується вибирати товщини горизонтальних

ребер в інтервалі від 4 мм до 8 мм, віддаючи переваги меншим товщинам.

Також із графіка, наведеного на рисунку 24, видно, що на відміну від з'єднань типу -р-Шв-Вр вузли -р-Шв-Гр швидше досягають значень мінімальної обертальної твердості, відповідної до твердих вузлів при прольоті ригеля менш 1 м. Однак, дотримуючись визначення твердих вузлів, прийнятому в будівельній механіці, згідно з яким кут повороту перетину повинен рівнятися нулю, у даному розділі наведені номограми для визначення розмірів ребер, при яких  $S_{j,ini}=\infty$  (рисунки 25 – 27).

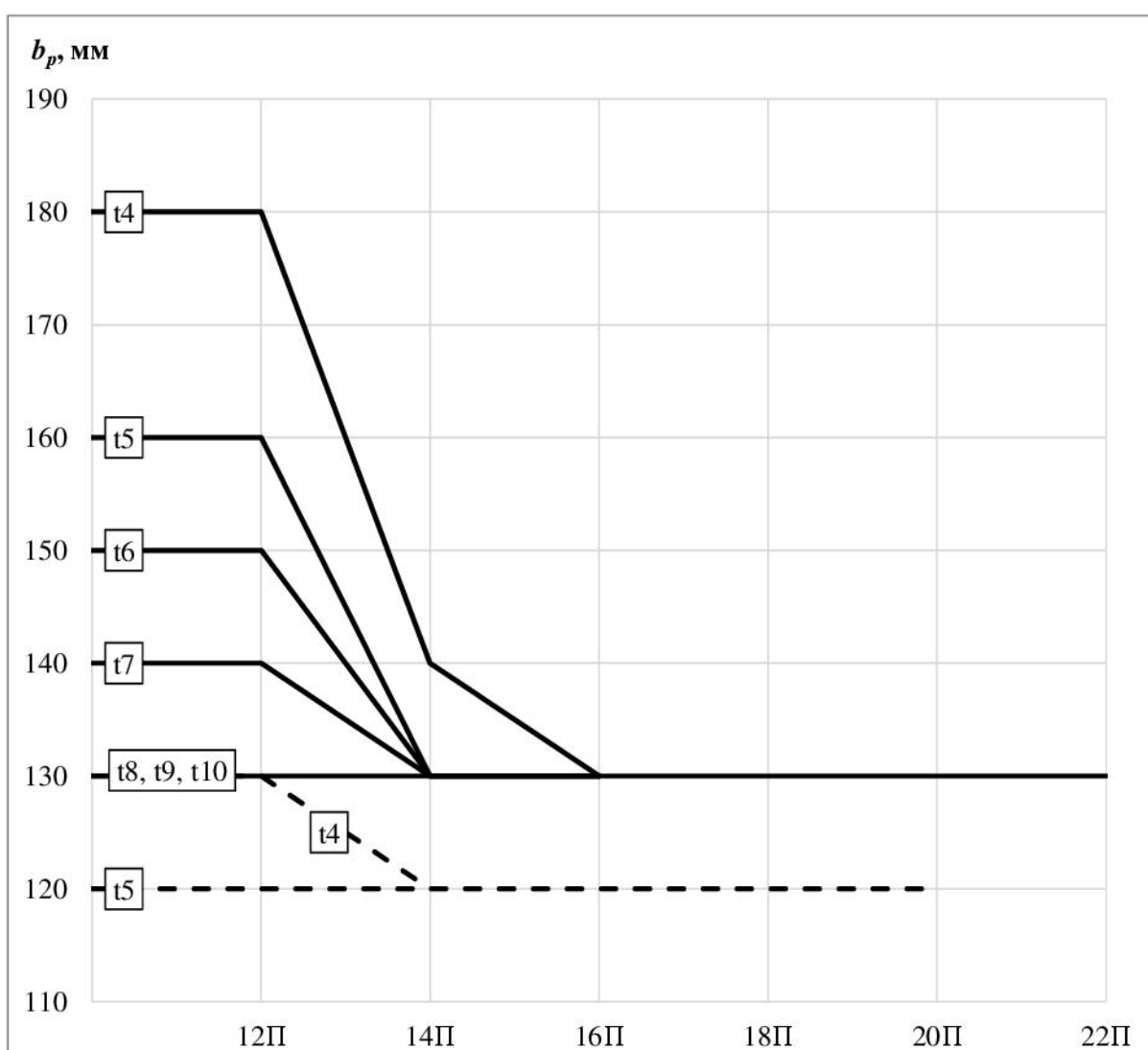


Рисунок 25 – Розміри ребер ( $b_p$ ) для твердих вузлів типу -р-Шв-Гр для стійок із квадратних труб 80×4 і 90×4 (С245, Е42)

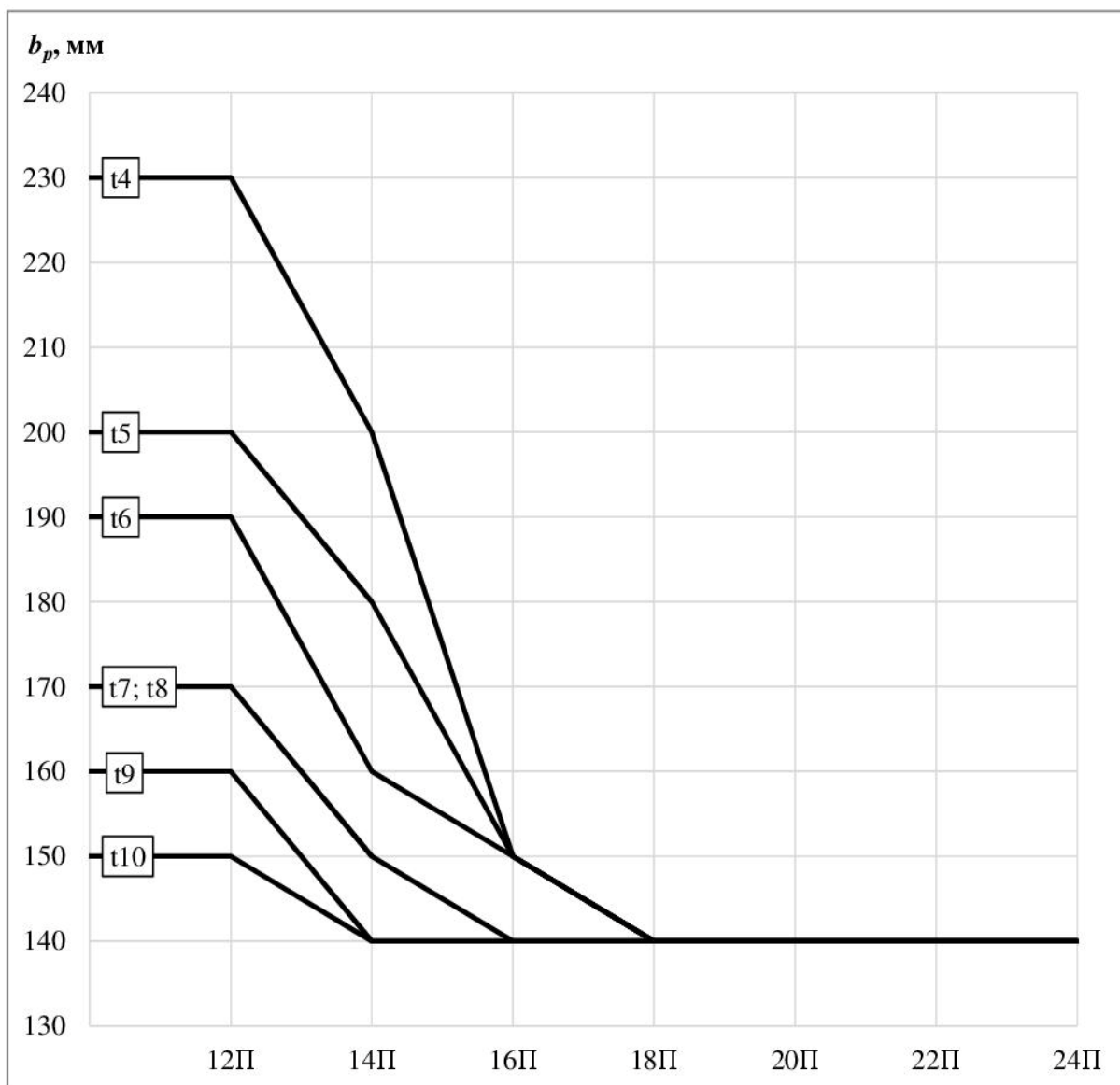


Рисунок 26 – Розміри ребер ( $b_p$ ) для твердих вузлів типу -р-Шв-Гр для стійок із квадратної труби 100×4 (С245, Е42)

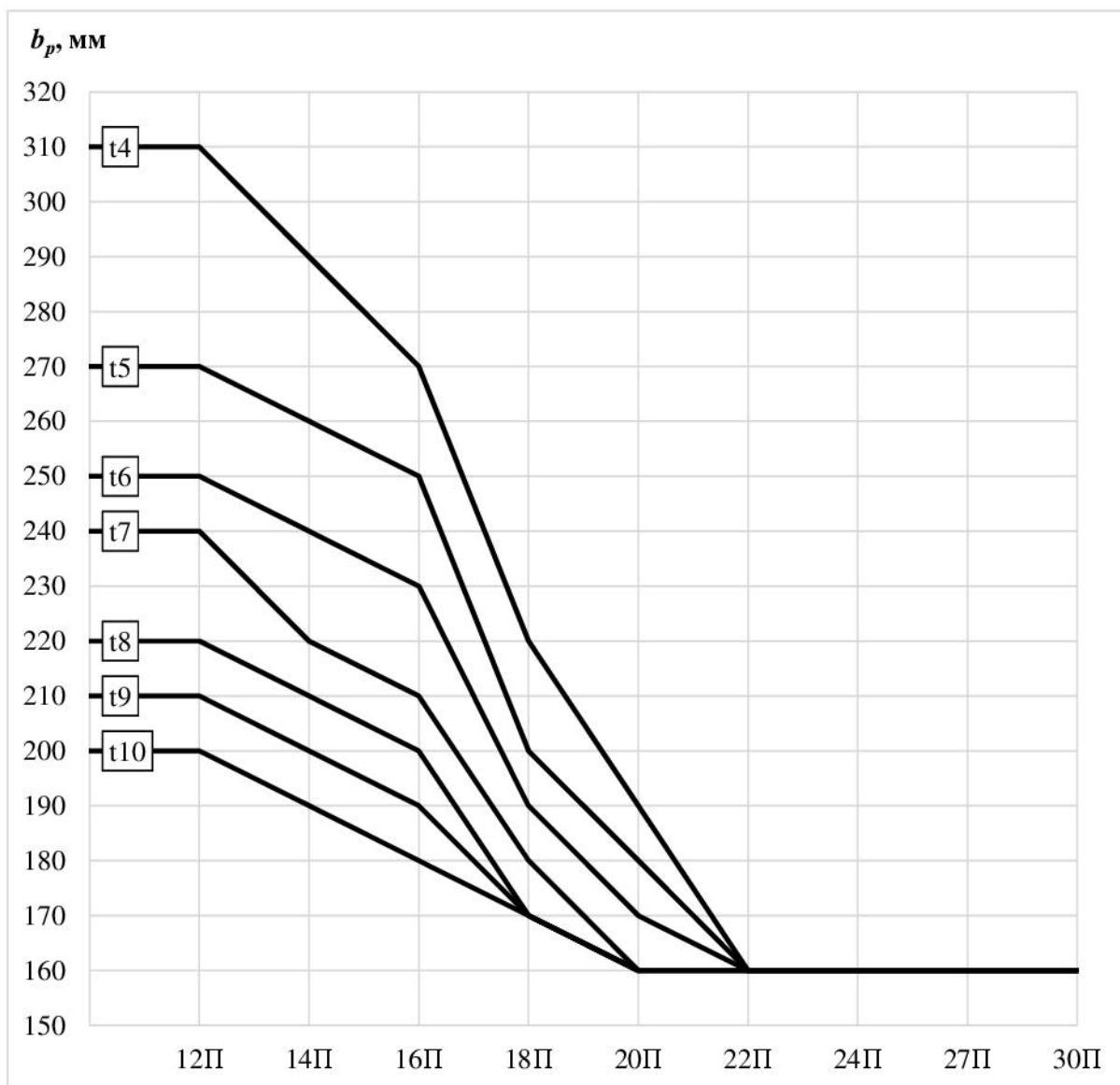


Рисунок 27 – Розміри ребер ( $b_p$ ) для твердих вузлів типу -р-Шв-Гр для стійок із квадратної труби 120×4 (С245, Е42)

Окремо слід виділити з'єднання, у яких нескінченна твердість досягається при мінімальному розмірі горизонтальних ребер, тобто при товщині 4 мм і ширині на 40 мм більшої розміру перетину колони. Список даних вузлів наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Тверді вузлові з'єднання типу Тр-Шв-Гр (С245, Е42) з мінімальними розмірами ребер

| Переріз стійки  | Перетин ригеля | $t_p$ , мм | $b_p$ , мм | $b_{\phi}$ , мм | $V_{p, c, m, 3}$ | Граничний момент $M_{j,rd}$ , кНм | $S_{j,ini}$ , МНм/рад | $\varphi$ , рад |
|-----------------|----------------|------------|------------|-----------------|------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------|
| КВ. труба 80×4  | Швелер 14П     | 4          | 120        | 30              | 86,00            | 8,23                              | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 16П     | 4          | 120        | 30              | 86,00            | 9,80                              | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 18П     | 4          | 120        | 30              | 86,00            | 11,56                             | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 20П     | 4          | 120        | 30              | 86,00            | 13,42                             | $\infty$              | 0,00            |
| КВ. труба 90×4  | Швелер 16П     | 4          | 130        | 30              | 99,20            | 9,73                              | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 18П     | 4          | 130        | 30              | 99,20            | 11,69                             | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 20П     | 4          | 130        | 30              | 99,20            | 13,36                             | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 22П     | 4          | 130        | 30              | 99,20            | 15,45                             | $\infty$              | 0,00            |
| КВ. труба 100×4 | Швелер 18П     | 4          | 140        | 30              | 113,20           | 11,60                             | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 20П     | 4          | 140        | 30              | 113,20           | 13,64                             | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 22П     | 4          | 140        | 30              | 113,20           | 15,45                             | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 24П     | 4          | 140        | 30              | 113,20           | 17,48                             | $\infty$              | 0,00            |
| КВ. труба 120×4 | Швелер 22П     | 4          | 160        | 30              | 143,60           | 15,17                             | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 24П     | 4          | 160        | 30              | 143,60           | 17,13                             | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 27П     | 4          | 160        | 30              | 143,60           | 19,98                             | $\infty$              | 0,00            |
|                 | Швелер 30П     | 4          | 160        | 30              | 143,60           | 22,92                             | $\infty$              | 0,00            |

## 2.5. Испитова установка й вимірювальна апаратура

Іспитова установка (рисунок 28) складалася з вузла з'єднання балки зі стійкою. У точках «А» і «В» крізь балку й колону пропущені шпильки. На шпильки за допомогою струбцин закріплювалися прогиноміри Аістова із ціною поділки 0,01 мм. При даній ціні поділки точність визначення кута повороту складає  $8 \cdot 10^{-5}$  рад. Вимір зміни відстані між точками «А» і «В» прогиномірами здійснювалося за допомогою сталевого дроту, закріпленого одним кінцям у точці «В», і грузик на іншому кінці. Також на шпильці балки були встановлені підшипники в місці перегину дроту для виключення тертя. Для підвищення точності на зразках установлювалося по два прогиноміри, деформація визначалася як середнє з їхніх показань.

Вимір напруг у різних точках балки й стійки проводився тензорезисторами Zemic BF120-10AA(11)-X. Зміна опору тензорезисторів знімалася мікропроцесорною багатоканальною тензометричною станцією

|      |      |          |        |      |            |  |  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|--|--|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ |  |  | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |  |  |      |

ММТС-64.01. Тензорезистори наклеювалися із двох сторін балки й стійки (верхня й нижня полки). Відстань між тензорезисторами становило 90 мм, при цьому одна з пар датчиків перебувала в перетинах точок «А» і «В», а також один датчик – у перетині точки «D». На стінку стійки в точці «О» наклеювалася розетка з тензорезисторів для визначення еквівалентних напруг.

Зразки закріплювалися на спеціально виготовленій рамі зі швелерів, котра кріпилася до силової підлоги. Навантаження зразків проводилося щаблями гідравлічним домкратом ДГ50П100Г, величина навантаження контролювалася відтарованим манометром МО-160-16 Мпа-0,4. Для збереження лінії передачі навантаження перпендикулярно осі балці зверху домкрата був установлений кульовий шарнір.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

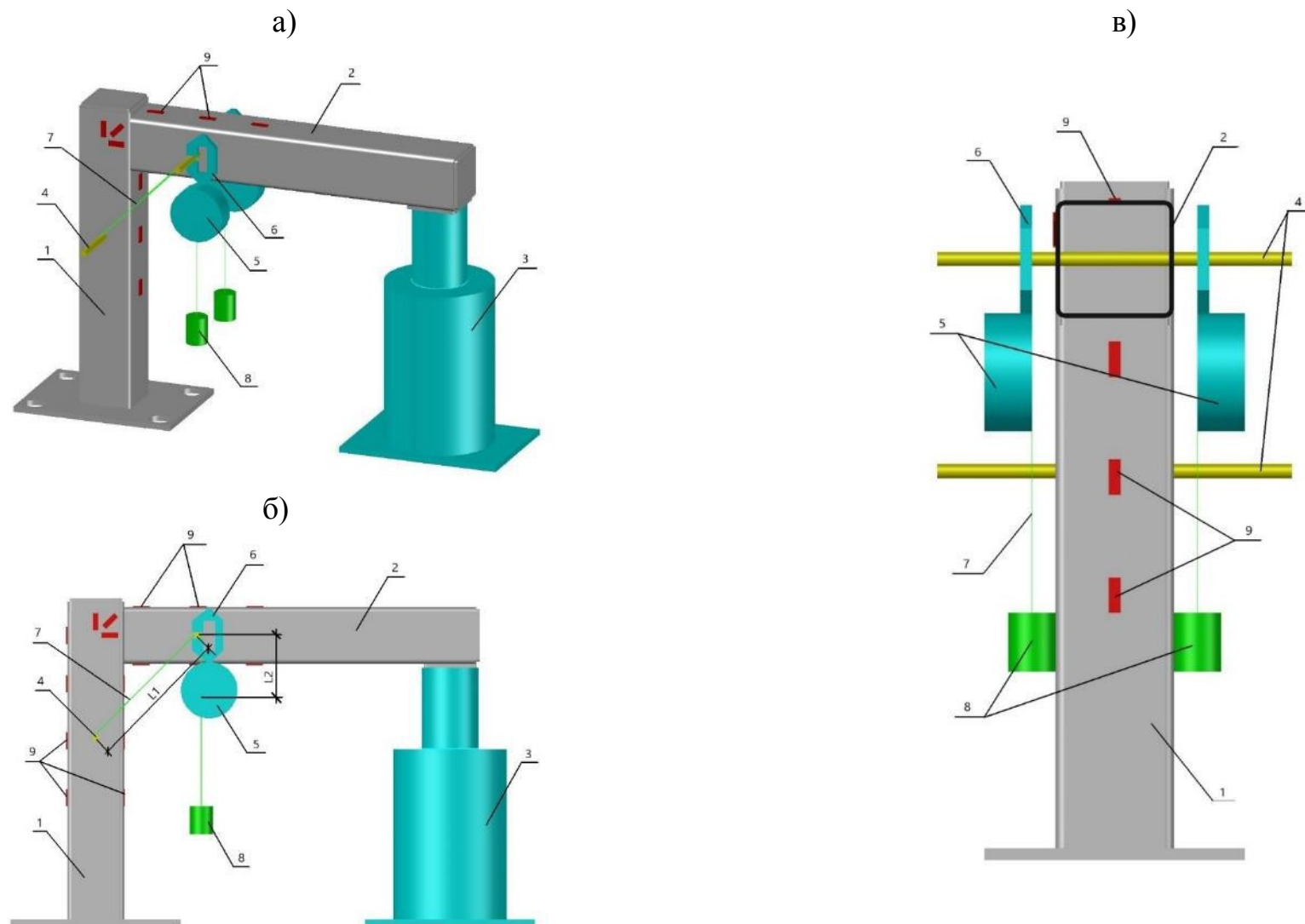


Рисунок 28 – Схема іспитової установки: а) 3Д вид; б) Вид збоку; в) Вид попереду. 1 – стійка; 2 – балки; 3 – домкрат; 4 – шпилька; 5 – прогиномір Аистова; 6 – струбцина; 7 – сталевий дріт; 8 – грузик; 9 – тензодатчики

Перед випробуванням зразки зазнали декілька етапів навантаження й розвантаження в пружній стадії роботи для прироблення елементів. На кожному кроці прикладання під час випробування навантаження витримувалося  $5 \div 10$  хвилин. Крок прикладання навантаження під час випробування становив 2 поділки манометра, що приблизно рівно  $P \approx 1,88$  кН.

Зразки, установлені на іспитову установку, представлені на рисунках 28 і 29.



Рисунок 28 – Зразок О1 в іспитовій установці

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |



Рисунок 29 – Зразок О2 в іспитовій установці

Перед проведенням випробувань було проведено тарування тензорезисторів на спеціальній металевій балці перетином  $4 \times 31$  мм, що має зону чистого вигину довжиною 200 мм (рисунок 30).

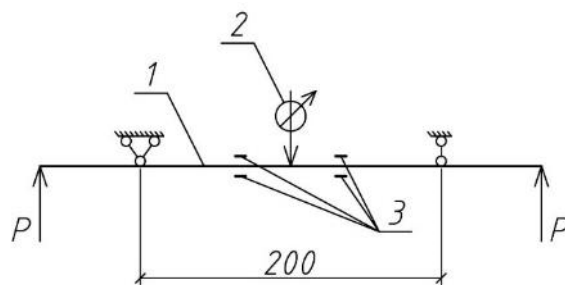


Рисунок 30 – Тарувальний пристрій: 1 – сталеві балочка; 2 – індикатор часового типу; 3 – тензорезистори

Для визначення тарувального коефіцієнта використовувалося чотири датчика: два зверху й два знизу. При цьому тарування проведене таким чином, щоб датчики перебували як у стислій, так і в розтягнутій зонах. Прогин  $f$  вимірювався індикатором годинного типу ІЧ-10 із ціною поділу 0,01 мм. Показання тензодатчиків у вигляді напруг  $\sigma_i$  по кожному

|      |      |        |        |      |            |      |
|------|------|--------|--------|------|------------|------|
|      |      |        |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док. | Підпис | Дата |            |      |

щаблю навантаження знімалися тензометричною системою ММТС-64.01 (рисунок 31). Результати тарування тензодатчиків з обчисленням наведених до нуля напруг  $\sigma_{i,0}$  наведено в таблиці 5.



Рисунок 31 – Тарувальний пристрій з підключеним ММТС-64.01

Таблиця 5 – Показання датчиків при таруванні

| Зона   | $f$ ,<br>мм | $\sigma_i$ ,<br>МПа | $\sigma_{i,0}$ ,<br>МПа | $\sigma_i$ ,<br>МПа | $\sigma_{i,0}$ ,<br>МПа | $\sigma_i$ ,<br>МПа | $\sigma_{i,0}$ ,<br>МПа | $\sigma_i$ ,<br>МПа | $\sigma_{i,0}$ ,<br>МПа |
|--------|-------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
|        |             | Датчик 1            |                         | Датчик 2            |                         | Датчик 3            |                         | Датчик 4            |                         |
| Розтяг | 0           | 1,67                | 0,00                    | -5,02               | 0,00                    | 0,00                | 0,00                    | 2,51                | 0,00                    |
|        | 0,1         | 9,20                | 7,53                    | 4,18                | 9,20                    | 8,37                | 8,37                    | 10,03               | 7,52                    |
|        | 0,2         | 19,23               | 17,56                   | 15,88               | 20,90                   | 17,57               | 17,57                   | 19,22               | 16,71                   |
|        | 0,3         | 26,76               | 25,09                   | 21,73               | 26,75                   | 25,09               | 25,09                   | 28,42               | 25,91                   |
|        | 0,4         | 36,80               | 35,13                   | 30,93               | 35,95                   | 32,62               | 32,62                   | 37,62               | 35,11                   |
|        | 0,5         | 44,33               | 42,66                   | 37,62               | 42,64                   | 40,99               | 40,99                   | 45,98               | 43,47                   |
|        | 0,6         | 55,20               | 53,53                   | 47,65               | 52,67                   | 51,03               | 51,03                   | 52,66               | 50,15                   |
|        | 0,7         | 61,89               | 60,22                   | 55,17               | 60,19                   | 57,72               | 57,72                   | 62,69               | 60,18                   |
|        | 0,8         | 71,93               | 70,26                   | 62,69               | 67,71                   | 66,08               | 66,08                   | 71,89               | 69,38                   |
| Стиск  | 0           | 0,00                | 0,00                    | 0,84                | 0,00                    | 0,00                | 0,00                    | -3,35               | 0,00                    |
|        | 0,1         | -8,37               | -8,37                   | -9,19               | -10,03                  | -8,37               | -8,37                   | -11,7               | -8,35                   |
|        | 0,2         | -16,73              | -16,73                  | -23,41              | -24,25                  | -16,73              | -16,73                  | -20,9               | -17,55                  |
|        | 0,3         | -25,09              | -25,09                  | -29,26              | -30,1                   | -25,94              | -25,94                  | -31,76              | -28,41                  |
|        | 0,4         | -31,78              | -31,78                  | -38,46              | -39,3                   | -33,47              | -33,47                  | -41,8               | -38,45                  |
|        | 0,5         | -42,66              | -42,66                  | -45,98              | -46,82                  | -42,66              | -42,66                  | -47,65              | -44,3                   |
|        | 0,6         | -50,18              | -50,18                  | -55,18              | -56,02                  | -51,03              | -51,03                  | -56,84              | -53,49                  |
|        | 0,7         | -56,87              | -56,87                  | -64,37              | -65,21                  | -58,56              | -58,56                  | -63,53              | -60,18                  |
|        | 0,8         | -67,75              | -67,75                  | -71,06              | -71,9                   | -66,92              | -66,92                  | -72,73              | -69,38                  |

На основі отриманих даних побудований графік зміни напруг по всіх датчиках (рисунок 32). На графіку також наведена теоретична пряма напруг, визначена по формулі.

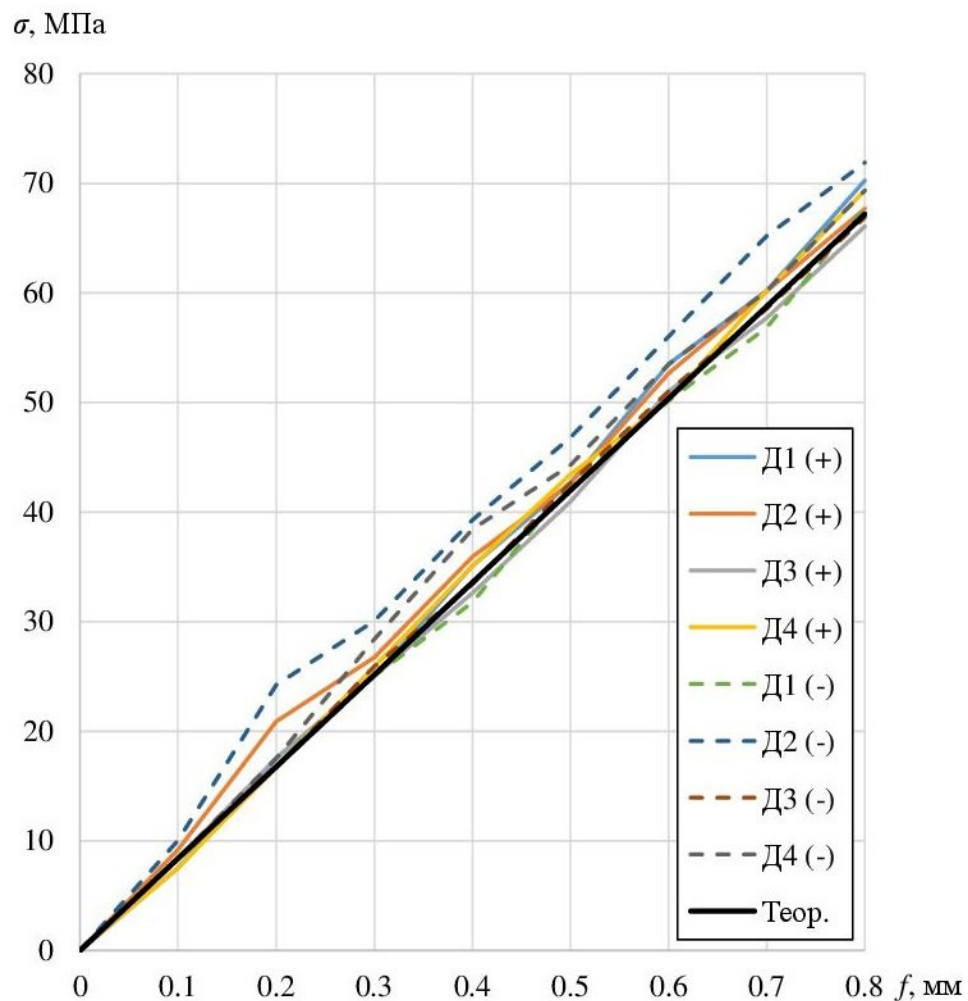


Рисунок 32 – Графік зміни напруг при таруванні

Лінійний коефіцієнт кореляції отриманих результатів рівний  $r_{xy}=0,996$ . Згідно зі шкалою Чеддока існує практично функціональна і лінійна кореляція. Середній тарувальний коефіцієнт рівний  $k=0,967$ .

## 2.6. Зразки для випробування

Для експериментального підтвердження результатів визначення обертової твердості вузлів, отриманих методом кінцевих елементів, було вибрано два зразки з перетинами стійки й балки із квадратної труби  $100 \times 4$ . Зразок О1 виконаний без ребра жорсткості, зразок О2 виконаний з ребром жорсткості.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

На рисунках 33 і 34 наведені схеми зразків з розміщенням тензодатчиків (Т1÷Т17).

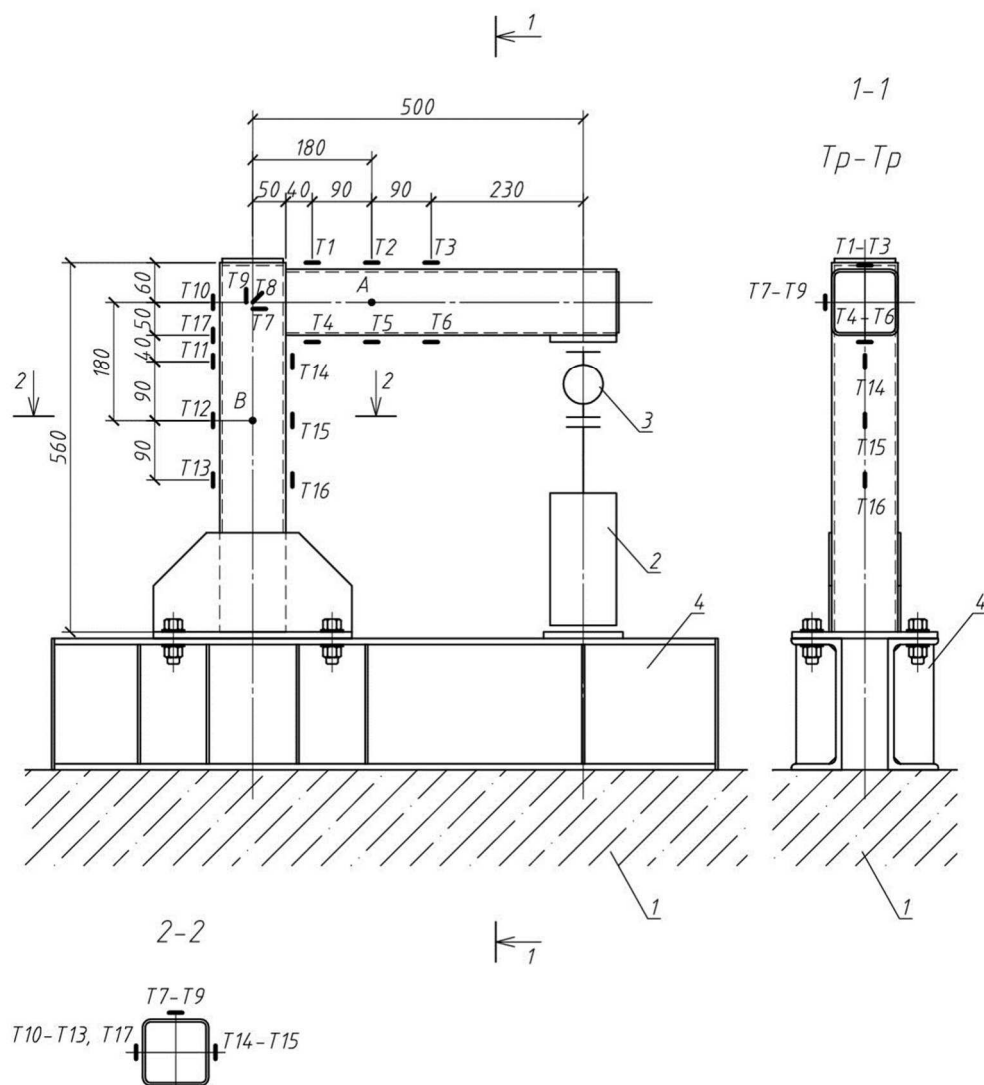


Рисунок 33 – Іспитова схема зразка О1:1 – силова підлога; 2 – домкрат; 3 – шаровий шарнір; 4 – опорна рама

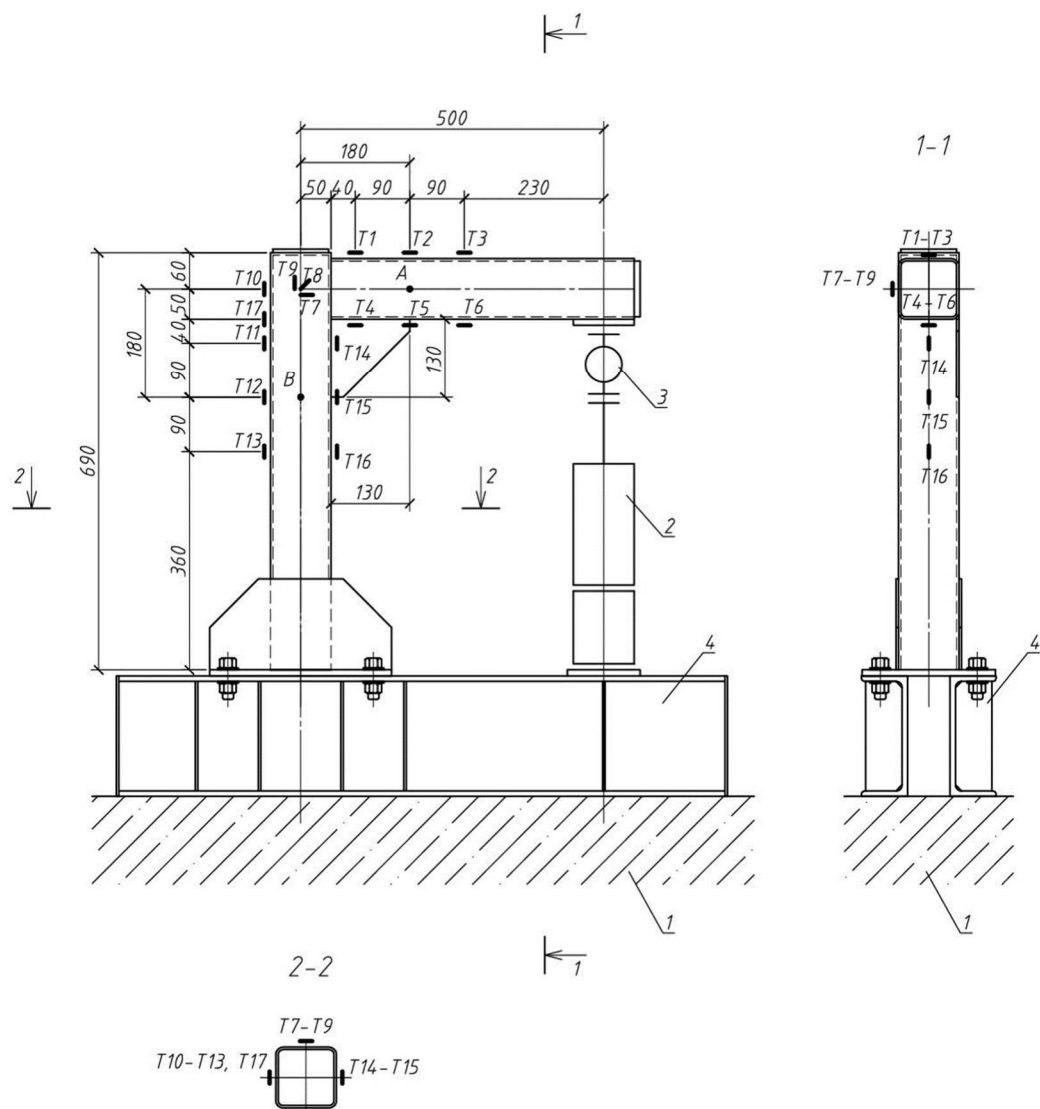


Рисунок 34 – Іспитова схема зразка O2:1 – силова підлога; 2 – домкрат; 3 – шаровий шарнір; 4 – опорна рама

Перед проведенням випробувань вузлів була визначена міцність сталі на трьох плоских зразках матеріалу, вирізаних із труби, на розривній машині Р-Р.

Сталь випробуваних зразків не мала вираженої ділянки плинності (рисунок 35). Межа пропорційності  $\sigma_{\text{пл}}$  визначена графічним методом. Результати визначення механічних характеристик сталі зразків наведено в таблиці 6.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

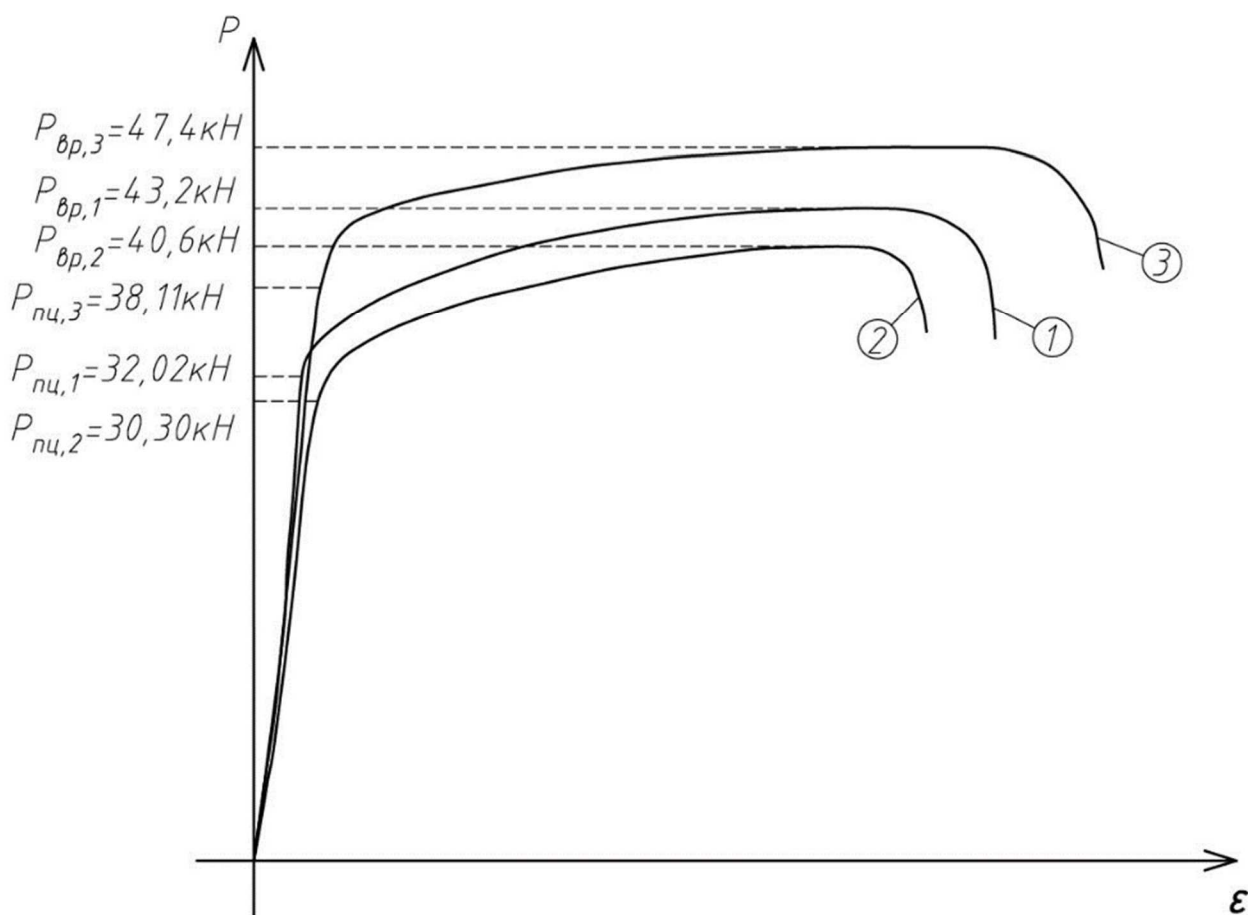


Рисунок 35 – Графіки деформування, випробуваних зразків стали

Таблиця 6 – Результати визначення механічних характеристик стали

| №<br>п.п. | $t$ ,<br>мм | $b$ ,<br>мм | $F_0$ ,<br>мм <sup>2</sup> | $P_{вр}$ ,<br>кН | $\sigma_{вр}$ ,<br>МПа | $P_{пц}$ ,<br>кН | $\sigma_{пц}$ ,<br>МПа | Середнє<br>$\sigma_{вр}$ ,<br>МПа | Середнє<br>$\sigma_{пц}$ ,<br>МПа |
|-----------|-------------|-------------|----------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1         | 3,6         | 29,4        | 105,84                     | 43,2             | 408,16                 | 32,02            | 302,57                 | 403,37                            | 308,26                            |
| 2         | 3,7         | 28,1        | 103,97                     | 40,6             | 390,50                 | 30,30            | 291,40                 |                                   |                                   |
| 3         | 3,6         | 32,0        | 115,20                     | 47,4             | 411,46                 | 38,11            | 330,80                 |                                   |                                   |

При визначенні початкової оберальної твердості вузла важливе значення має межа пропорційності, середнє значення якого по трьом зразкам становить  $\sigma_{пц}=308,26 \text{ МПа}$ .

## 2.7. Результати фізичних випробувань оберальної твердості й порівняння із чисельними дослідженнями

Випробування зразків вузлів проведене до руйнування. Руйнування зразка О1 відбулося внаслідок розриву шва кріплення балки до стійки в

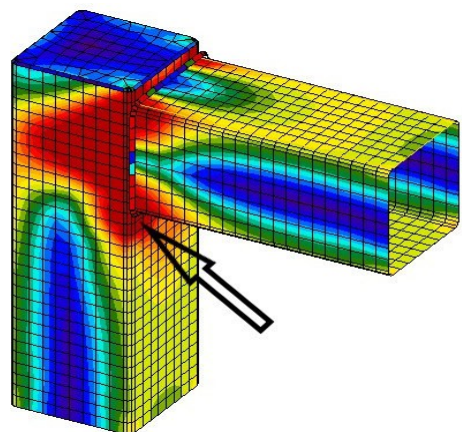
кутовій зоні. Руйнівне навантаження склало  $P_{max,1}=26$  кН, якому відповідає момент  $M_{max,1}=13$  кНм.

Руйнування зразка О2 характеризувалося місцевою втратою стійкості полки стійки. Руйнівне навантаження склало  $P_{max,2}=41,4$  кН, якому відповідає момент  $M_{max,2}=20,7$  кНм, при цьому значні пластичні деформації почали спостерігатися при навантаженні  $P=24,2$  кН.

По характеру руйнування отримані результати добре узгодяться із зонами максимальних еквівалентних напруг, обчислених по МКЕ. На рисунку 36 колом обведене місце руйнування звареного шва. На рисунку 36,а колом обведений розрив, що утворювався при втраті стійкості полки.



а)



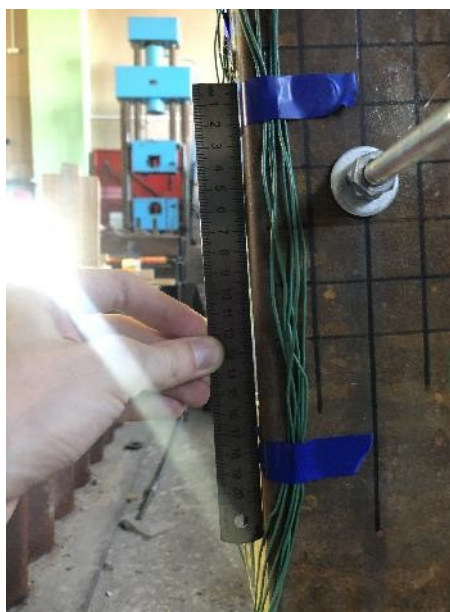
б)

Рисунок 36 – Характер руйнування зразка О1:  
а) фізичні випробування; б) еквівалентні напруги по МКЕ

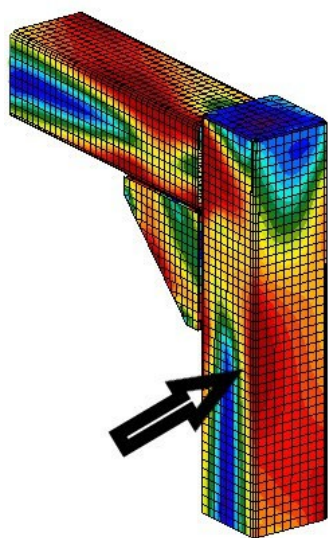
|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |



а)



б)



в)

Рисунок 37 – Характер руйнування зразка О2: а), б) фізичні випробування; в) еквівалентні напруги по МКЕ

Результати визначення кутів повороту представлено в таблицях 7 і 8.

Таблиця 7 – Результати визначення кута повороту зразка О1

| $P$ , кН | $M$ , кНм | $\varphi_{\text{общ}}$ , рад | $\varphi_b$ , рад | $\varphi_c$ , рад | $\varphi$ , рад |
|----------|-----------|------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 0        | 0         | 0                            | 0                 | 0                 | 0               |
| 2,1      | 1,05      | 0,000394                     | 0,000155          | 0,000029          | 0,000210        |
| 3,9      | 1,95      | 0,000827                     | 0,000320          | 0,000060          | 0,000446        |
| 5,6      | 2,8       | 0,001181                     | 0,000440          | 0,000071          | 0,000670        |
| 7,4      | 3,7       | 0,001535                     | 0,000625          | 0,000081          | 0,000829        |
| 9,4      | 4,7       | 0,001969                     | 0,000765          | 0,000116          | 0,001088        |
| 11,2     | 5,6       | 0,002402                     | 0,000935          | 0,000257          | 0,001210        |

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |

СМБ 24. ПЗ

Арк.

|      |      |          |          |          |          |
|------|------|----------|----------|----------|----------|
| 13   | 6,5  | 0,002796 | 0,001095 | 0,000363 | 0,001338 |
| 14,8 | 7,4  | 0,003348 | 0,001234 | 0,000481 | 0,001632 |
| 16,4 | 8,2  | 0,004136 | 0,001395 | 0,000500 | 0,002241 |
| 18,4 | 9,2  | 0,005122 | 0,001585 | 0,000530 | 0,003008 |
| 20,4 | 10,2 | 0,006504 | 0,001824 | 0,000720 | 0,003959 |
| 22,2 | 11,1 | 0,008202 | 0,002005 | 0,001198 | 0,005000 |
| 24,2 | 12,1 | 0,019893 | 0,002229 | 0,002839 | 0,014825 |

Таблиця 8 – Результати визначення кута повороту зразка О2

| <b><i>P</i>, кН</b> | <b><i>M</i>, кНм</b> | <b><i>φ</i>, рад</b> |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| 0                   | 0                    | 0                    |
| 2,1                 | 1,05                 | 0,000047             |
| 3,9                 | 1,95                 | 0,000065             |
| 5,6                 | 2,80                 | 0,000131             |
| 7,4                 | 3,70                 | 0,000159             |
| 9,4                 | 4,70                 | 0,000181             |
| 11,2                | 5,60                 | 0,000243             |
| 13,0                | 6,50                 | 0,000339             |
| 14,8                | 7,40                 | 0,000456             |
| 16,4                | 8,20                 | 0,000557             |
| 18,4                | 9,20                 | 0,000642             |
| 20,4                | 10,20                | 0,000763             |
| 22,2                | 11,10                | 0,000884             |
| 24,2                | 12,10                | 0,001175             |
| 26,0                | 13,00                | 0,003505             |
| 27,8                | 13,90                | 0,003860             |
| 29,6                | 14,80                | 0,004688             |
| 31,3                | 15,65                | 0,005517             |
| 33,1                | 16,55                | 0,007451             |
| 40,5                | 20,25                | 0,014336             |
| 41,4                | 20,70                | 0,016200             |

За результатами випробувань побудовані графіки залежності кутів повороту вузла від моменту (рисунки 38 і 39). Також на рисунках наведені графіки залежності «*M-φ*», отримані за результатами чисельних досліджень. На графіках додатково побудовані похилі лінії  $Sj_R$  і  $Sj_P$ , що відповідають межах твердих і шарнірних вузлів згідно Eurocode, у дужках наведені значення прольотів ригеля для визначення даних границь.

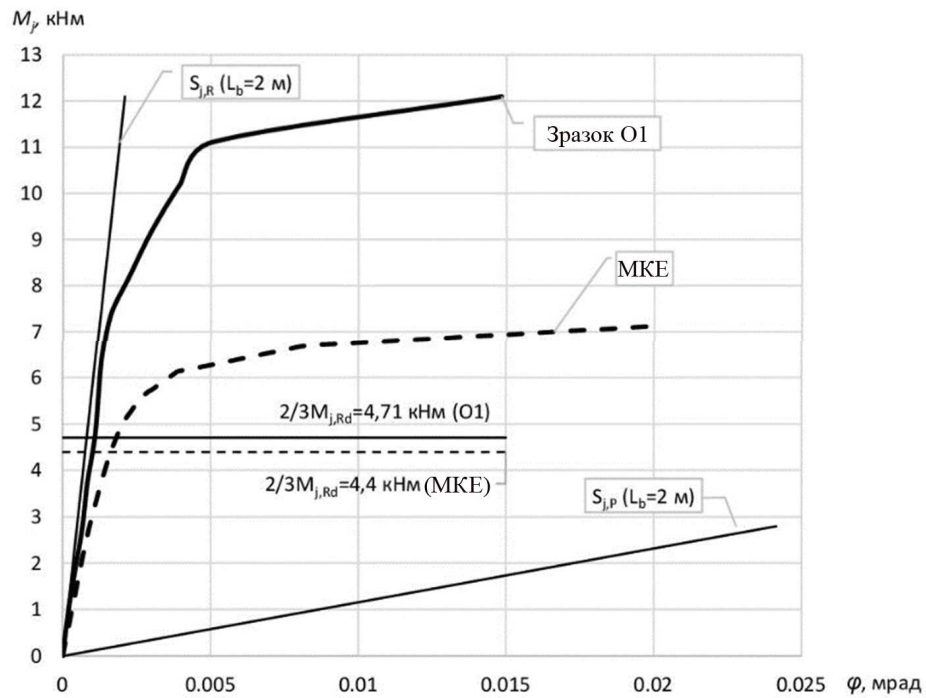


Рисунок 38 – Графіки залежності «момент – кут повороту» для зразка О1

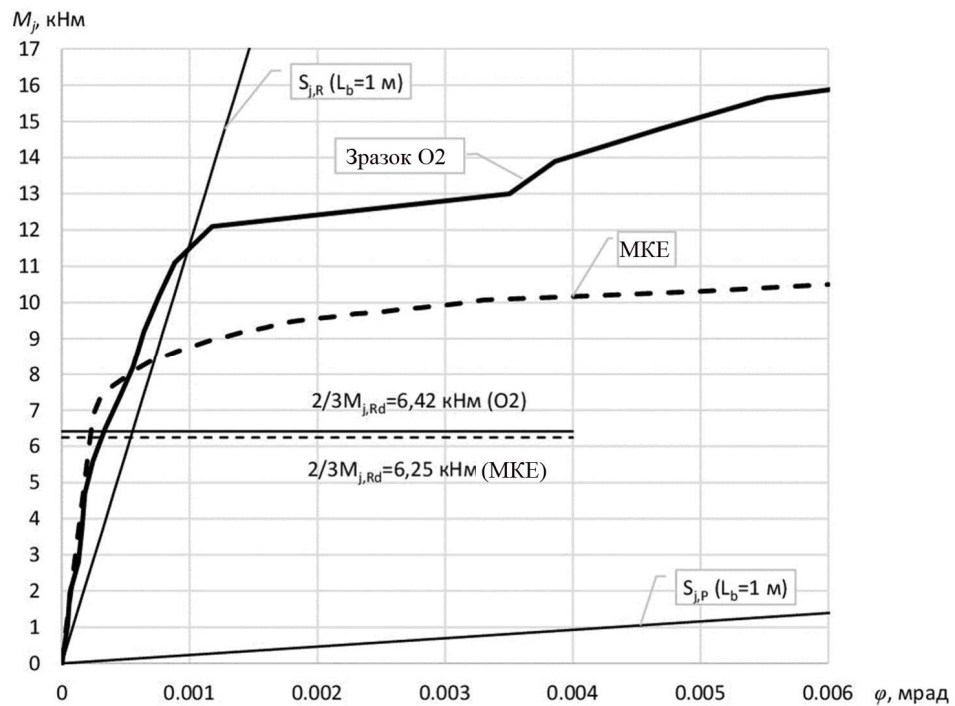


Рисунок 39 – Графіки залежності «момент – кут повороту» для зразка О2

Залежності кута повороту від моменту, представлені на рисунках 38 і 39, отримані експериментально й чисельно, змінюються якісно по схожому закону. Різниця в максимальних моментах, які витримують вузли, пояснюється відсутністю чітко вираженого майданчика плинності в зразків

при фізичних випробуваннях. У кінцево-елементній моделі сталь має майданчик плинності, який обумовлює максимальний момент зупинки розрахунків. Також при фізичних випробуваннях руйнування відбувалося після розвитку більших зон пластичних деформацій у вузлі. Однак для визначення обертальної жорсткості важливий не максимальний момент, а граничний момент, при якому у вузлі досягаються напруги плинності, у випадку з випробуваними зразками  $\sigma_{пл}$ .

На представлених графіках видно, що вузол з вертикальним ребром має набагато меншою деформативністю, ніж вузол без ребра. У пружній зоні при згинальному моменті  $M=3,7$  кНм кут повороту зразка О1 становить  $\varphi_1=0,000829$  рад, зразка О2  $\varphi_2=0,000159$  рад, тобто в п'ять раз менше.

Початкова обертальна твердість вузла визначається залежно від моменту  $M_{j,Rd}$ , при якому напруги у вузлі досягають межі плинності. Еквівалентні напруги в стінці стійки перевищили межу пропорційності, встановленого при випробуванні зразка матеріалу, на восьмому щаблі при навантаженні  $P_1=14,8$  кН для зразка О1 і на одинадцятому щаблі при навантаженні  $P_2=20,4$  кН для зразка О2. Граничні моменти  $M_{j,Rd}$  визначені за допомогою лінійної інтерполяції. З урахуванням плеча додатка навантаження  $e=0,5$  м граничний момент рівний  $M_{j,Rd,1}=7,07$  кНм для зразка О1 і  $M_{j,Rd,2}=9,64$  кНм для зразка О2.

Граничні моменти, отримані експериментальним і чисельним методами, близькі друг до друга. Для вузла без ребра жорсткості граничний момент, отриманий МКЕ, становить  $M_{j,Rd,1}=6,6$  кНм, для вузла з ребром жорсткості  $M_{j,Rd,2}=9,4$  кНм. Таким чином, розбіжність становить  $\Delta_1=6,1\%$  для вузла без ребра й  $\Delta_2=2,5\%$ .

Результати визначення початкової обертальної твердості вузлів наведені в таблиці 9.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

Таблиця 9 – Результати визначення обертальної твердості

| Вузол | Тип       | МКЕ                |                        |                             | Експеримент        |                        |                             |
|-------|-----------|--------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------|-----------------------------|
|       |           | $Mj_{Rd}$ ,<br>кНм | $2/3 Mj_{Rd}$ ,<br>кНм | $Sj_{ini}$ ,<br>кНм/ра<br>д | $Mj_{Rd}$ ,<br>кНм | $2/3 Mj_{Rd}$ ,<br>кНм | $Sj_{ini}$ ,<br>кНм/ра<br>д |
| O1    | без ребра | 6,6                | 4,4                    | 2700                        | 9,64               | 4,71                   | 4320                        |
| O2    | з ребром  | 9,4                | 6,25                   | 28000                       | 7,07               | 6,42                   | 19500                       |

Вузол без вертикального ребра при фізичних випробуваннях на всіх щаблях навантаження показав більш високу обертальну твердість, ніж при розрахунках чисельним методом. Початкова обертальна твердість, отримана експериментально, виявилася в 1,6 рази вище, чим при МКЕ. Однак порядок значень схожий. На риснку добре видно, що при прольоті ригеля 2 м, який може відповідати поперечному розміру модуля, обое графіка попадають у зону напівжорстких вузлів.

Вузол з вертикальним ребром при фізичних випробуваннях показав більш низьку обертальну твердість, ніж при розрахунках чисельним методом. При цьому до значення моменту  $M=4,7$  кНм графіки практично збігаються. Початкова обертова твердість, отримана експериментально, виявилася в 1,4 рази нижче, ніж при МКЕ. Однак на графіку добре видно, що навіть при мінімальному прольоті ригеля 1 м обидва графіки попадають у зону твердих вузлів.

### Висновки

За результатами проведених фізичних випробувань повнорозмірних зразків можна зробити наступні висновки.

1. Запропонована експериментальна методика дозволяє визначити залежність « момент-кут повороту» внутрішньомодульних вузлів, а отже визначити їхню початкову обертальну твердість.

2. По характеру руйнування експериментальні результати добре співпадають із зонами максимальних еквівалентних напруг, обчислених по МКЕ. Різниця в максимальних моментах пояснюється відсутністю вираженого майданчика плинності сталі випробуваних вузлів. При цьому

|      |      |          |        |      |            |  |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|--|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ |  | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |  |      |

розбіжність у граничних моментах, по яким визначається оберտальна твердість, становить 2,5% і 6,1% для вузла з ребром і без відповідно.

3. Графіки залежності « момент-кут повороту», отримані чисельно й при фізичних випробуваннях, змінюються якісно за схожим законом. Вузол без ребра при фізичних випробуваннях показав більш високу обертальну жорсткість, ніж при чисельних розрахунках. Вузол з ребром навпаки виявився більш податливим у порівнянні із МКЕ. Однак порядок значень отриманих чисельно й експериментально для обох вузлів близький. Також при обох методах збігається класифікація вузлів згідно Eurocode: вузол без ребра – напівжорсткий, вузол з ребром – твердий.

4. Проведені фізичні експерименти підтверджують результати, отримані методом кінцевих елементів.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.м. | Підпис | Дата |            |      |

### 3. Охорона праці

#### 3.1 Організація робіт підвищеної небезпеки

Роботи, що проводяться у зонах постійної дії небезпечних виробничих факторів, незалежно від характеру виконуваних робіт, повинні виконуватися за нарядом-допуском.

Наряд-допуск — це документ, оформлений на спеціальному бланку, який містить завдання на виконання робіт, вказує місце, час початку і закінчення роботи, умови безпеки, склад бригади та осіб, відповідальних за безпеку.

Перелік умов і видів робіт, що потребують наряду-допуску:

- Роботи з використанням вантажопідйомних кранів та інших машин у зонах повітряних ліній електропередач, складів легкозаймистих чи горючих рідин, горючих або зріджених газів.

- Роботи у колодязях, шурфах, замкнених чи важкодоступних просторах.

- Земляні роботи на ділянках із патогенним зараженням ґрунту (смітники, скотомогильники тощо), у зонах підземних електричних мереж, газопроводів та інших небезпечних комунікацій.

- Ремонтні, демонтажні та будівельно-монтажні роботи за наявності небезпечних факторів.

- Роботи на ділянках, де може виникнути небезпека від сусідніх робіт.

- Роботи поблизу дорожнього полотна чи проїзної частини автомобільних і залізничних шляхів (за вимогами відповідних нормативних документів).

- Виконання газонебезпечних робіт.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |            |      |

На підприємстві перелік таких робіт має бути розроблений і затверджений роботодавцем.

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |            |      |

## Література

1. Shirokov, V.S. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building / V.S. Shirokov, I.S. Kholopov, A.V. Solovjev // XXV Polish Slovak Seminar "Theoretical Foundation of Civil Engineering". "Procedia Engineering". 2016. V.153. P. 655-661.
2. Teribele, A. Generative model and fixing guidelines for modular volumetric architecture / A. Teribele, B. Turkienicz // Revista de la Construcción. 2018. Vol.17, No.3. Pp. 517-530. DOI: 10.7764/RDLC.17.3.517
3. Thai, H.-T. A review on modular construction for high-rise buildings / H.-T. Thai, T. Ngo, B. Uy // Structures. 2020. V.28. Pp. 1265-1290. Doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.070
4. Lawson, R.M. Design in modular construction / R.M. Lawson, R. Ogden, C. Goodier. Florida: CRC Press, 2014. 76 p.
5. Alembagheri, M. Natural dynamic characteristics of volumetric steel modules with gypsum sheathed LSF walls: Experimental study / M. Alembagheri, P. Sharafi, M. Rashidi, A. Bigdeli, M. Farajian // Structures. 2021. V.33. P. 272-282. Doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.068

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |            |      |

## Зміст

Вступ

Постановка проблеми

1. Аналіз стану питання

1.1 Загальні положення й основні визначення

1.2 Досвід застосування й перспективність будівництва  
модульних будинків зі сталевим каркасом

1.3 Конструкції модульних будинків

2. Чисельні дослідження твердості внутрішньомодульних  
вузлових з'єднань

2.1 Методологія чисельних досліджень обертальної твердості

2.2 З'єднання без елементів твердості

2.3 З'єднання з вертикальним ребром жорсткості

2.4 З'єднання з горизонтальними ребрами жорсткості

2.5 Испитова установка й вимірювальна апаратура

2.6 Зразки для випробування

2.7 Результати фізичних випробувань обертальної  
твердості й порівняння із чисельними дослідженнями

Висновки

3. Охорона праці

3.1 Організація робіт підвищеної небезпеки

Література

|      |      |          |        |      |            |      |
|------|------|----------|--------|------|------------|------|
|      |      |          |        |      | СМБ 24. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док-м. | Підпис | Дата |            |      |