

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

Факультет інженерії машин, споруд і технологій
(повна назва факультету)
Будівельної механіки
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістра

(назва освітнього ступеня)

на тему: Вплив розмірів і форм вузлової фасонки на тримкість зварної ферми

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МБ_{нм}-61
спеціальності 192

Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

| | | |
|-------------------|-------------------------------------|---|
| | <u>Рябоконт П.О.</u> (підпис) | <u>Рябоконт П.О.</u> (прізвище та ініціали) |
| Керівник | <u>Ковальчук Я.О.</u> (підпис) | <u>Ковальчук Я.О.</u> (прізвище та ініціали) |
| Нормоконтроль | <u>Данильченко С.М.</u> (підпис) | <u>Данильченко С.М.</u> (прізвище та ініціали) |
| Завідувач кафедри | <u>Ковальчук Я.О.</u> (підпис) | <u>Ковальчук Я.О.</u> (прізвище та ініціали) |
| Рецензент | <u>Лупійчук С. І.</u> (підпис) | <u>Лупійчук С. І.</u> (прізвище та ініціали) |

Тернопіль
2020

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1 ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ НА

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ФЕРМ 7

1.1. Типи зварних ферм і особливості їх експлуатації..... 7

1.2. Напружено-деформований стан в конструктивних елементах ферм та зварних з'єднаннях 8

1.3. Вплив фасонки на параметри НДС зварних ферм 14

1.4. Аналіз літературних даних і постановка задач для власних досліджень..... 18

1.5. Висновок за розділом 1..... 19

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТРИСМКОСТІ

ФЕРМИ 21

2.1 Нормативні вимоги до проектування зварних будівельних ферм 21

2.2 Сучасні програмні комплекси для проектування й дослідження вузлів зварних ферм..... 25

2.3. Методика дослідження параметрів НДС ферми комп'ютерним моделюючим експериментом в ПК SolidWorks 29

2.4. Висновок за розділом 2..... 32

РОЗДІЛ 3 ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ ФАСОНКОВИХ ВУЗЛІВ НА

ТРИМКІСТЬ ФЕРМИ 33

3.1 Вибір зварної ферми для дослідження..... 33

3.2 Схема базування і навантаження ферми..... 37

3.3 НДС в елементах зварної ферми 38

3.3.1 Виявлення місця локалізації найбільших напружень в елементах ферм 38

3.4 Вибір фасонки для дослідження зварної ферми..... 39

3.5 Вплив розмірів прямокутної фасонки на тримкість зварної ферми..... 41

3.5.1 Критерії вибору розмірів прямокутної фасонки 41

| | | |
|--|---|-----------|
| 3.5.2 | Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою розміром 375×800 м | 43 |
| 3.5.3 | Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою розміром 375×700 м | 44 |
| 3.5.4 | Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою розміром 375×600 м | 45 |
| 3.5.5 | Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою розміром 375×500 м | 46 |
| 3.6 | Вплив розмірів трапецевидної фасонки на тримкість зварної ферми..... | 47 |
| 3.6.1 | Критерії вибору розмірів трапецевидної фасонки | 47 |
| 3.6.2 | Визначення тримкості зварної ферми з фасонковою довжиною 900 мм | 47 |
| 3.6.3 | Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою довжиною 830 мм | 48 |
| 3.6.4 | Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою довжиною 720 мм | 49 |
| 3.6.5 | Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою довжиною 600 мм | 50 |
| 3.6.6 | Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою довжиною 500 мм | 51 |
| 3.7 | Узагальнення отриманих результатів досліджень для прямокутної фасонк | 53 |
| 3.7.1 | Залежність тримкості ферми від довжини фасонкових зварних швів | 53 |
| 3.7.2 | Залежність тримкості ферми від довжини фасонки | 54 |
| 3.8 | Узагальнення отриманих результатів досліджень для трапецевидної фасонки..... | 55 |
| 3.8.1 | Залежність тримкості ферми від довжини фасонкових зварних швів | 55 |
| 3.8.2 | Вплив площі фасонки на тримкість досліджуваної ферми | 57 |
| 3.8.3 | Вплив довжини фасонки на тримкість досліджуваної ферми..... | 58 |
| 3.9 | Висновки за розділом 3..... | 59 |
| РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯ.. | | 60 |
| 4.1 | Техніка безпеки при реконструкції та демонтажу металевих конструкцій... | 60 |
| 4.2 | Небезпеки і шкідливості, які супроводжують зварювання та різання металів | 62 |
| 4.3 | Безпека в надзвичайних ситуаціях при виникненні пожеж і вибухів | 63 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВОКИ | | |
| БІБЛІОГРАФІЯ | | |

ВСТУП

Застосування фермових конструкцій у будівництві відомо з давніх давен. Поєднання низької матеріаломісткості таких стержневих конструкцій з їх високою несучою здатністю не знижує інтерес до них і на сучасному етапі розвитку будівельної галузі. Найбільше застосування отримали ферми при великих віддальх між опорами. Саме за таких умов балки стають неспроможними забезпечити необхідні міцність і жорсткість.

Серед ферм, які зараз використовуються найчастіше, це зварні металеві ферми різних конструкцій, розмірів і профілів стержнів. Саме такі ферми є досить технологічними у виконанні, дають можливість їх виготовляти індустріальним методом до транспортних розмірів, з'єднувати до проектних розмірів на будівельному майданчику і монтувати на об'єкті.

Актуальність теми зумовлена тим, що міцність ферм у багатьох випадках визначає несучу здатність будівель і споруд в цілому. Не дивлячись на те, що ферми використовуються у будівництві вже дуже давно, їх розрахунок за класичними методиками був досить наближеним зі значними запасами міцності. Лише тепер появилася можливість детального розрахунку конструкцій такого типу з врахуванням комплексного багатопараметричного впливу на них різноманітних чинників (конструктивних, технологічних, експлуатаційних, аварійних). Застосування прикладних програмних пакетів і сучасної комп'ютерної техніки з високою вірогідністю наближують результати комп'ютерного моделюючого експерименту до показників, отриманих при натурних випробуваннях ферм. Таким чином можна не лише визначити показники напружено-деформівного стану (НДС) в елементах фермових конструкцій, але й оптимізувати їх за рахунок зміни конструктивних чи технологічних параметрів. За результатами дослідження ферм виявлено, що максимальні показники НДС формуються у вузлах конструкції. Для зниження цих показників застосовують вузлові фасонки, однак там виникають складні нелінійні процеси, зумовлені неоднорідністю властивостей матеріалів в ділянці зварного шва і навколо шовної зони. Дослідження впливу конструктивних

особливостей вузлів на тримкість зварних ферм дають можливість з високою точністю передбачити поведінку ферми при дії різноманітних силових чинників.

Мета й задачі роботи. Мета роботи – запропонувати таку форму і розміри вузлової фасонки для найнавантаженого вузла зварної ферми, які забезпечать максимальну тримкість всієї конструкції при статичних навантаженнях.

Для досягнення мети поставлено такі задачі:

- вибрати конфігурацію типової зварної ферми для дослідження;
- запропонувати схему її базування і місця прикладання зовнішніх навантажень;
- визначити тип і величину сумарного зовнішнього навантаження;
- виконати проектний розрахунок з використанням сучасних методик комп'ютерного моделюючого експерименту;
- порівняти отримані результати, визначити вузли, де формуються максимальні значення НДС;
- визначити величину зовнішнього навантаження, яке формує в конструкції параметри НДС на рівні граничного стану;
- змінюючи геометричні розміри фасонки, визначити їх вплив на тримкість зварної ферми;
- змінюючи форму фасонки, визначити її вплив на тримкість зварної ферми;
- оптимізувати конструкцію ферми за розміром і формою фасонки для отримання максимальної тримкості.

Об'єктами дослідження є розміри і форма вузлової фасонки, в якій формуються найвищі показники НДС і яка визначає тримкість зварної ферми в цілому.

Предмет дослідження є тримкість зварних ферм з фасонками різних форм і розмірів.

Методи дослідження – огляд і аналіз результатів досліджень, виконаних іншими авторами, використання чинної нормативної бази щодо проектування зварних ферм, комп'ютерний моделюючий експеримент з використанням методу скінченних елементів, реалізованому у прикладному програмному комплексі SolidWorks.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано за напрямком наукових досліджень кафедри будівельної механіки ТНТУ.

Наукова новизна отриманих результатів:

- виявлено форму і розміри фасонки зварної ферми, яка забезпечує максимальну тримкість констукції;
- отримав подальший розвиток метод комп'ютерного моделювання для визначення НДС у вузлах зварних ферм з використанням програмного пакету SolidWorks.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в роботі результати досліджень можуть бути використані при проектуванні зварних ферм.

Результати роботи схвалено і впроваджено в ТОВ «Електропром» (м. Тернопіль), що засвідчено Актом впровадження від 12.05.2020 р.

Апробація результатів здобувача. Результати роботи оприлюднені на III Міжнародній студентській науково-технічній конференції ТНТУ «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання», 23-24 квітня 2020 р., м. Тернопіль.

Публікації. Результати роботи опубліковано в збірнику тез доповідей III Міжнародної студентської науково-технічної конференції ТНТУ «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання», 23-24 квітня 2020 р., м. Тернопіль, П.Рябокоть, «Вплив форми фасонки на тримкість зварної ферми».

Ключові слова: вузол зварної ферми, фасонка, тримкість ферми, зварні шви.

РОЗДІЛ 1

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ФЕРМ

1.1. Типи зварних ферм і особливості їх експлуатації

Ферма – це ґратчаста несуча конструкція, призначена, зазвичай, для сприйняття згинальних навантажень (рис. 1.1). Ферма утворюється з окремих прямолінійних стержнів, зв'язаних між собою у вузлах (теоретично шарнірно) у геометрично незмінну систему, до якої навантаження, як правило, прикладається тільки у вузлах [1].

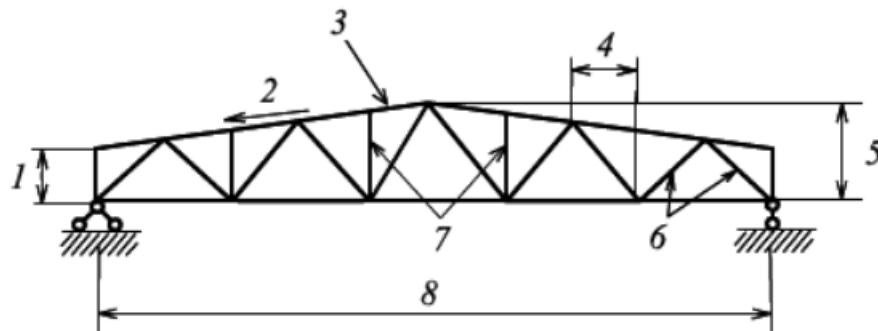


Рисунок 1.1 – Конструкція ферми, її розміри та елементи:

1 – висота на опорі; 2 – нахил поясу; 3 – верхній пояс; 4 – панель верхнього поясу; 5 – висота в прогоні; 6 – розкоси; 7 – стійки; 8 – прогін ферми

Згідно класичних підходів до проектування ферм передбачено, що зовнішні навантаження прикладаються у вузлах, а в елементах ферм виникають тільки поздовжні зусилля стиску або розтягу [1]. Однак в реальних умовах експлуатації в елементах ферми і у з'єднаннях виникає складний напружений стан, який в значній мірі можна врахувати при використанні прикладних програмних інженерних комплексів.

Ферми мають меншу матеріаломісткість у порівнянні з балками, але вони трудомісткіші у виготовленні. Ферми доцільніше застосовувати, ніж балки, при великих прольотах конструкцій.

Ферми класифікують за такими критеріями:

а) за призначенням – мостові, кроквяні, підкроквяні, для підіймальних кранів, опор ліній електропередач і т. д.;

б) за обрисом поясів – з паралельними поясами, трапецеїдальні одно- або двосхилі, трикутні. Вибір обрису поясів залежить від призначення ферм, структури навантаження, а також виходячи з економічних розрахунків.

в) за типом ґратки – розкісна, якщо вона утворена безперервним зигзагом розкосів та стояків, причому всі розкоси однієї половини ферми спрямовані в один бік, трикутна, якщо зигзаг утворений одними розкосами, спрямованими поперемінно в різні сторони.

Конструктивно ферми виготовляють дерев'яними, металевими (зварними, клепанними, з різьбовими з'єднаннями, литими), залізобетонними, пластмасовими, комбінованими. Найбільше застосування знаходять зварні ферми з типових вальцьованих металевих профілів.

Ферми експлуатуються при різному характерові силових (статичні, динамічні, циклічні, комбіновані) температурних (низькі, високі, кімнатні) та корозійних (атмосферне чи агресивне середовище) впливів.

Таке різноманіття ферм і їх важливе значення в міцності будівлі чи споруди в цілому ставить багато проблем до проектування ферм. При цьому важливо врахувати якнайбільше параметрів впливу і визначити такі конструктивні й технологічні параметри, які забезпечать експлуатаційну придатність ферми при її мінімальній вартості.

1.2. Напружено-деформований стан в конструктивних елементах ферм та зварних з'єднаннях

Напружено-деформований стан (НСД) в конструктивних елементах ферм та в зварних з'єднаннях між ними визначає тримкість ферми в цілому. Саме тому дослідження цих параметрів є актуальним для інженерів при проектуванні нових зварних ферм та при експертному оцінюванні тримкості існуючих конструкцій.

На жаль, нормативні методики проектування зварних ферм [2] передбачають проектні розрахунки в ручному режимі за класичними аналітичними

залежностями, які не передбачають оцінювання НДС за умов багатопараметричного впливу на ферму конструктивних, технологічних, експлуатаційних і аварійних чинників.

Дослідженням параметрів НДС зварних ферм та їх поведінки конструкцій при цьому присвячені роботи [3-37]. Натурні дослідження повздовжньої деформації нижнього пояса зварної підкроквяної ферми 2000x400 мм за умов статичних навантажень виконано в роботі [10] (рис. 1.2).

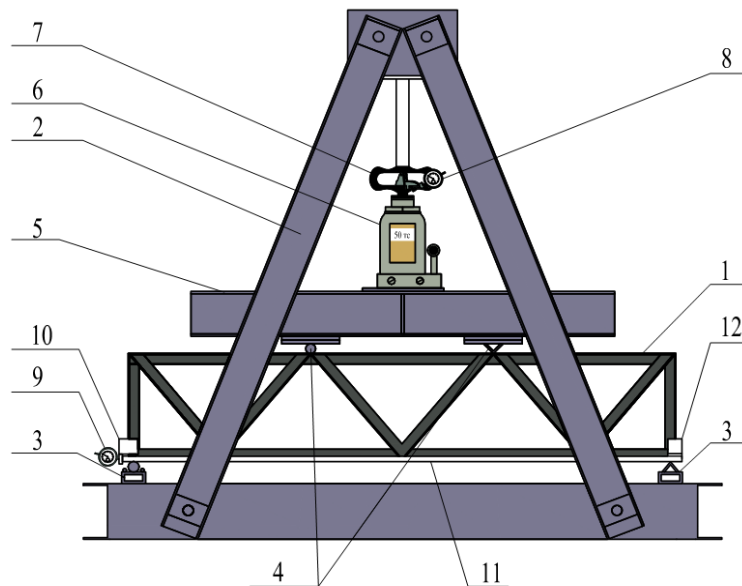


Рисунок 1.2 – Натурні дослідження зварної ферми при дії статичних навантажень
 1 – дослідний зразок; 2 – випробувальний стенд; 3 – нижні опори; 4 – верхні опори; 5 – траверса; 6 – домкрат 50 тс.; 7 – відліковий пристрій динамометра; 8 – динамометр; 9 – індикатор повздовжньої деформації; 10 – затискач для індикатора; 11 – вимірювальний шток; 12 – затискач вимірювального штока

Аналогічний експеримент виконано за методикою комп'ютерного моделювання з використанням прикладного програмного комплексу ANSYS. Проведено порівняння отриманих результатів натурних досліджень з аналогічними показниками комп'ютерного моделювання (рис.1.3) [14].

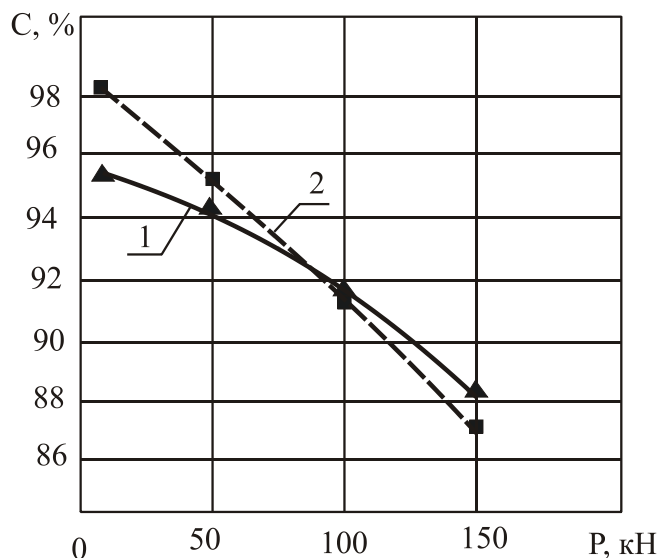


Рисунок 1.3 – Зведений графік співпадання C деформацій зварної ферми під дією статичного навантаження за результатами комп'ютерного моделюючого та натурального експериментів [14]

1 – для видовження нижнього пояса; 2 – для прогину нижнього пояса

Такою верифікацією виявлено ступінь співпадання показників для видовження нижнього пояса та для його прогину на рівні 0,871...0,982 [35], що свідчить про високу достовірність результатів комп'ютерного моделюючого експерименту [14]. Досягається це за рахунок того, що комп'ютерний моделюючий експеримент забезпечує можливість комплексно враховувати багатопараметричний вплив на конструкцію зовнішніх і внутрішніх чинників та оцінювати поведінку зварної ферми в широкому діапазоні параметрів НДС.

Натурні випробування повномасштабних зварних ферм утруднені через високу вартість дослідних зразків, значні розміри і енергомісткість випробувального обладнання. Тому в багатьох дослідженнях зварних ферм використана методика натурних досліджень фізичних моделей (напівнатурні дослідження) [5, 9, 11, 12, 35] або методика комп'ютерного моделюючого експерименту із застосуванням сучасних прикладних програмних комплексів.

В роботі [35] описано напівнатурні дослідження серії зразків фізичної моделі зварної ферми 600x120 мм за умов зовнішнього циклічного силового впливу (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Зразок зварної ферми на випробувальному комплексі СТМ-100 перед навантаженням (а) та після руйнування (б) [35]

Для виконання експерименту використано оригінальне базуюче пристосування [36]. В процесі виконання експерименту візуально оцінено поведінку фізичної моделі при дії циклічного навантаження, а саме місця зародження втомних тріщин, їх поширення впродовж збільшення кількості циклів навантаження, характер деформування і руйнування конструкції при досягненні тріщиною критичного значення. Крім того апаратно визначалися показники зовнішнього силового впливу і величина поперечної деформації зразків від такого впливу.

Виконано статистичне опрацювання результатів досліджень і побудовано гістограми щільності пошкодження і руйнування дослідних зразків зварних ферм (рис. 1.5).

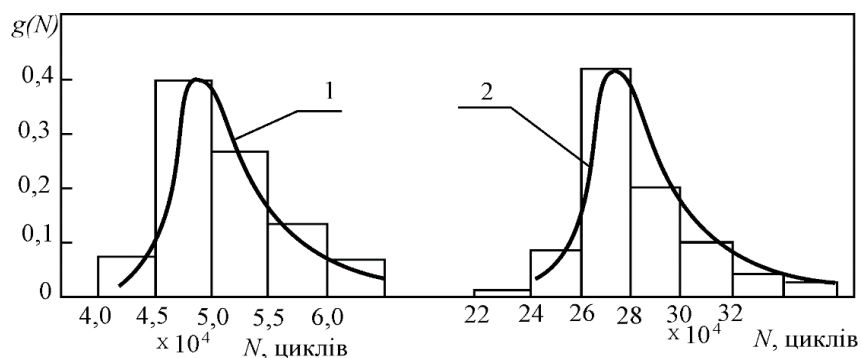


Рисунок 1.5 – Гістограми щільності пошкодження (1) і руйнування (2) зварних ферм за результатами при дії циклічних навантажень за результатами натурального дослідження [35]

Сучасні комп'ютерні технології дають можливість оцінювати показники НДС в елементах зварної ферми як за візуалізованим (рис. 1.6), так і за графічно-чисельним поданням (рис. 1.7, 1.8).

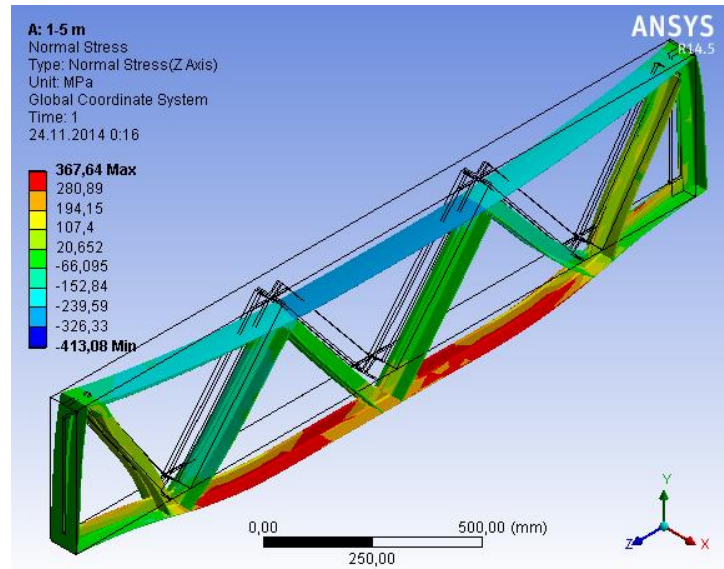


Рисунок 1.6 – Візуалізація деформування зварної ферми, отримана комп'ютерним моделюючим експериментом, при навантаженнях на рівні граничного стану [18]

Аналізуючи показники НДС в елементах досліджуваних ферм, можна зробити висновок, що вузли для зварної ферми є тим місцем, де локалізуються максимальні напруження і визначають настання граничного стану конструкції при її навантаженні.

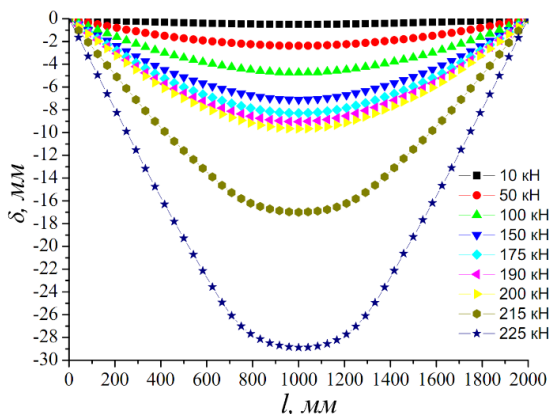


Рисунок 1.7 – Діаграма прогину нижнього пояса ферми при різних рівнях навантаження [18]

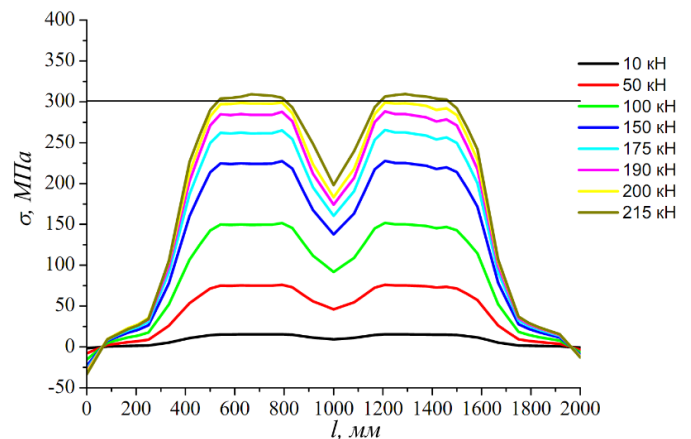


Рисунок 1.8 – Діаграма напружень вздовж нижнього пояса ферми при різних рівнях навантаження [18]

Аналогічний висновок отриманий за результатами експертного оцінювання зруйнованих ферм внаслідок пошкодження вузлів (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Пошкодження у вузлах, які зумовили руйнування безфасонкової ферми (а) і ферми з фасонками (б)

Саме тому для підвищення тримкості таких конструкцій необхідно детальніше вивчити можливості зниження показників НДС у вузлах зварних ферм.

Нормативні вимоги до конструкції вузлів ферм з безпосереднім прикріпленням елементів решітки до поясів (безфасонкові вузли) подано в [2] для ферм із гнuto-зварних профілів, круглих труб, двотаврів. Подано рекомендації до конструктивного виконання таких вузлів та комплекси аналітичних залежностей для визначення несучої здатності елементів і міцності зварних швів.

Безфасонкові вузли конструктивно і технологічно простіші, ніж фасонові, але їх експлуатаційні показники є нижчими. Тому їх використання у зварних фермах обмежене.

Фасонкове виконання вузлів для зварних ферм забезпечує вищу несучу здатність конструкції при однаковій стержневій конструкції. Одним із чинників, які визначають НДС у вузлах зварних ферм є розміри і форма вузлових фасонок.

1.3. Вплив фасонки на параметри НДС зварних ферм

Фасонка – деталь у вигляді невеликої пластинки з листового металу, який має таку форму і розміри, щоб скріпити декілька елементів металевої конструкції. Для зварних ферм фасонки встановлюють у вузлах і вони поєднують стрижні решітки і пояси (рис. 1.10) [1].



Рисунок 1.10 – Розміщення фасонки у зварній фермі

Конструктивні форми фасонки надзвичайно різноманітні і визначаються на етапі проектування ферми [1] (рис. 1.10).

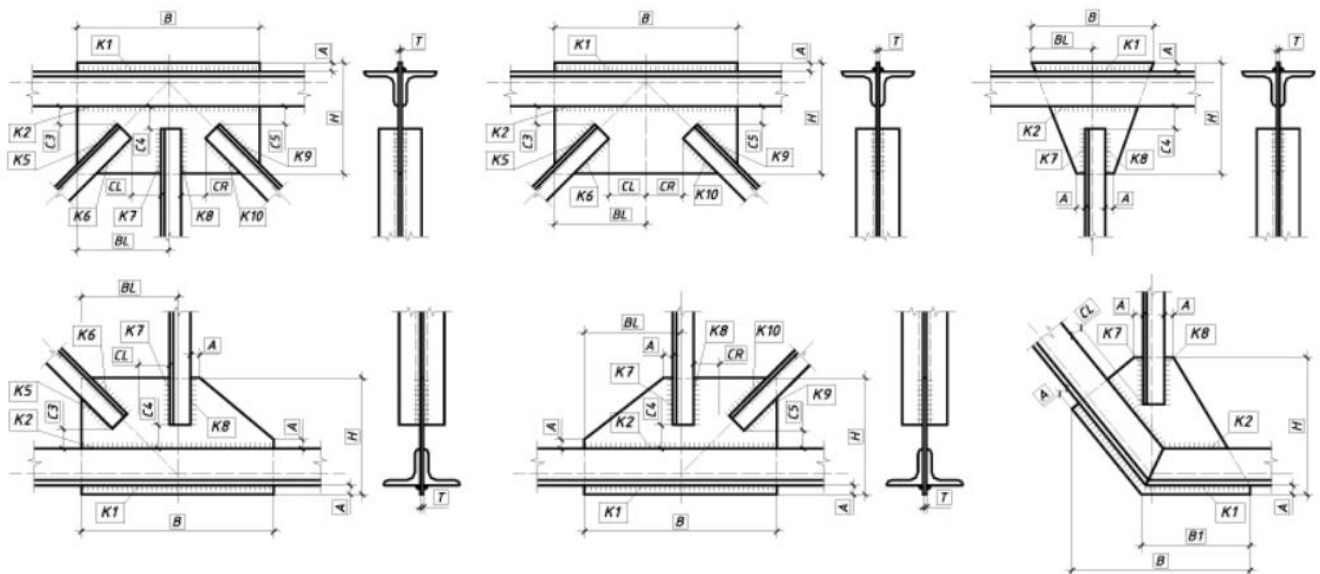


Рисунок 1.10 – Приклади конструктивного виконання вузлів зварних ферм з фасонками [1]

Конфігурація фасонок визначається конструктивною схемою стержнів у фермі, умовами розміщення зварних швів, їх довжиною, урахуванням проміжків між елементами, що сполучаються, 40...50 мм. Необхідно прагнути до простих контурів фасонок, щоб спростити їх виготовлення. Найтехнологічнішою формою фасонки є прямокутна [1] (рис. 1.10).

Як варіант часто використовують фасонки у вигляді прямокутної трапеції. Такі фасонки вирізують з листа з мінімальним числом обрізків і при найменшій протяжності зрізів. Оскільки у фермі число однакових фасонок майже завжди парне (унаслідок симетрії більшості ферм), то дві фасонки трапецоїдального контуру вирізуються з листа одним косим зрізом, і в цьому випадку теж обрізків металу не виходить [1] (рис. 1.10).

З метою забезпечення міцності фасонки повинні мати такі розміри поперечного перерізу, які забезпечують рівну міцність з перерізом стрижньових елементів від зусиль, що передаються прикріпленими до фасонки елементами. Товщину фасонок вибирають залежно від величини діючих зусиль і розмірів зварних швів. Товщину фасонки зазвичай у всіх вузлах ферми приймають однаковою.

Стижні з кутників або з швелерів рекомендується приварювати до фасонок з кожного боку двома фланговими швами і виведенням кожного шва на торець на довжину не менше 20 мм для зниження концентрації напружень [1].

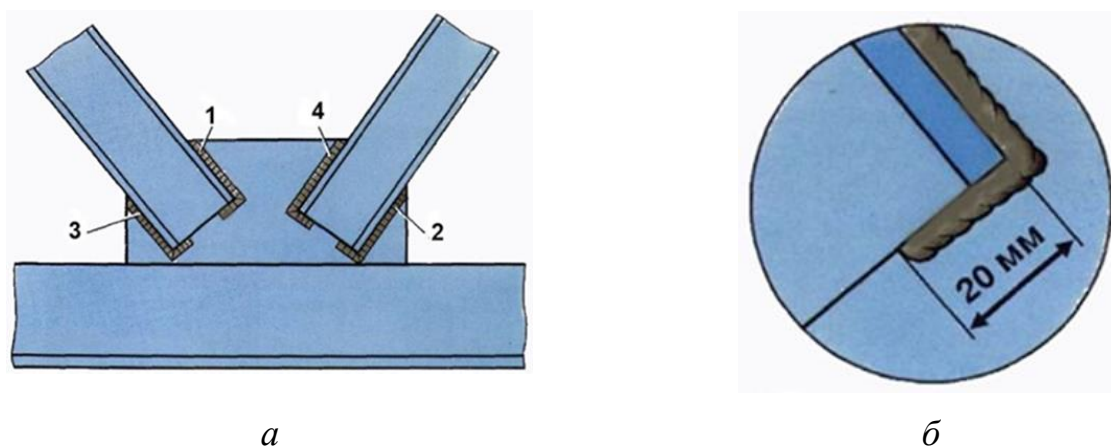


Рисунок 1.11 – Послідовність приварювання до фасонки стержнів фланговими швами (а) з виведенням кожного шва на торець (б) [1]

Інколи стрижні приварюють додатково і лобовим швом повністю. Лобові шви розподіляють силовий потік передачі зусилля на фасонку рівномірніше, проте їх не рекомендується ставити у важких фермах з крупними профілями і великими зварними швами: після накладення великих зварних швів на поясні кутники і розкоси розвиваються великі усадкові напруження, які викликають розтягування у фасонці між кутниками, сприяючи розвитку тріщин [1].

Щоб зменшити зварювальні напруження у фасонках, кінці стрижнів грат не доводять до поясів. Відстань між краями гратки і поясом у вузлах зварних ферм з фасонками слід приймати не менше $a=(6t - 20)$ мм, але не більше 80 мм. Тут t – товщина фасонки, мм. [1].

Різання стрижнів гратки (кутників, швелерів) виконують, зазвичай, нормально до осі. Для крупних стрижнів допускають косе різання з метою зменшення розмірів фасонок [1].

Не рекомендується приймати переривисті шви, шви завтовшки менше 5 мм і завдовжки менше 60 мм [1].

До поясу фасонки прикріплюють також фланговими швами. Прикріплювати фасонки до поясних кутників слід з двох сторін (з боку обушка і пера), оскільки інакше поясні кутники можуть легко відгинатися, наприклад, при транспортуванні. Для цього фасонки, зазвичай, випускають за обушки кутників на 10...20 мм (рис. 1.12, 1.13) [1].

НДС у вузлах зварних ферм з фасонками при дії як статичного, так і циклічного навантаження розглянуто у роботах [6...8, 13...17, 20, 21, 23...30, 33].

Крім вище розглянутих робіт Ковальчука Я.О., Шингери Н.Я., Басари М.А., вивчені результати досліджень інших вітчизняних (Пічугін С.Ф. [40, 41], Корх О.О. [40...42], Колесніченко С.В. [44...48], Миронов А.М. [44...47, 49], Зинькова В.А. [50]) та зарубіжних (Bruno, R. J [51], Khdeir A. A. [52], Lin T.J, Huang C.W, and Yang, Y.B. [53], Chen L.-W. ,Chen L.-Y. [54], Rand O., Givoli D. [55]) вчених.

Виявлено, що максимальні напруження, які спричиняють пошкодження і руйнування конструкцій, локалізуються на початку зони термічного впливу від зварного шва [32].

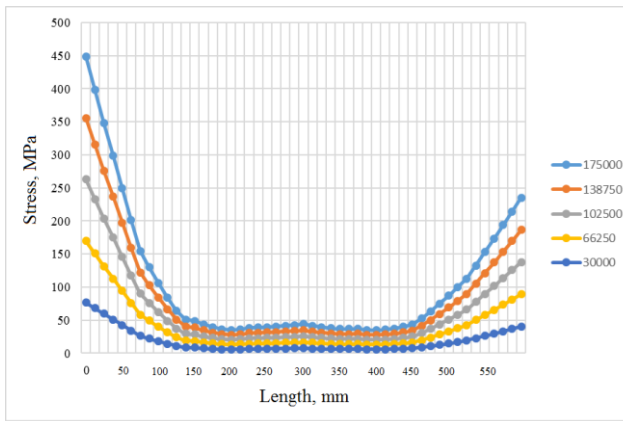


Рисунок 1.12 – Діаграма напружень вздовж зварного шва при різних рівнях навантаження (Н) [32]

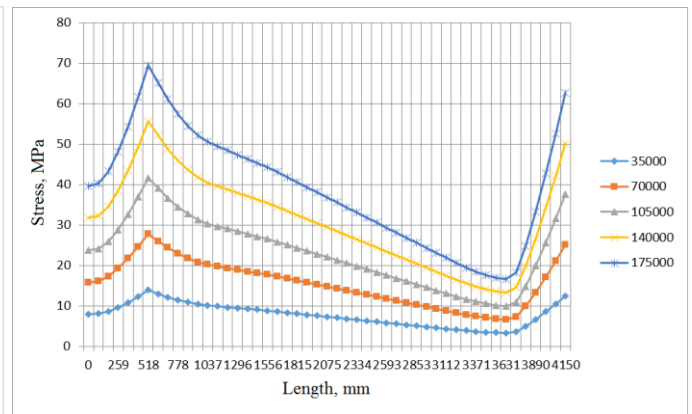


Рисунок 1.13 – Діаграма напружень в правому розкосі при різних рівнях навантаження (Н) [32]

Для зменшення напружень у фасонках запропоновані оригінальні конфігурації цих деталей з U-подібними вирізами [38, 39]. Таким чином кутова жорсткість фасонки зменшилася і знизилася напруження в місцях приєднання пояса і розкосів. Це дало можливість підвищити експлуатаційні показники відповідних ферм без зміни інших елементів конструкцій.

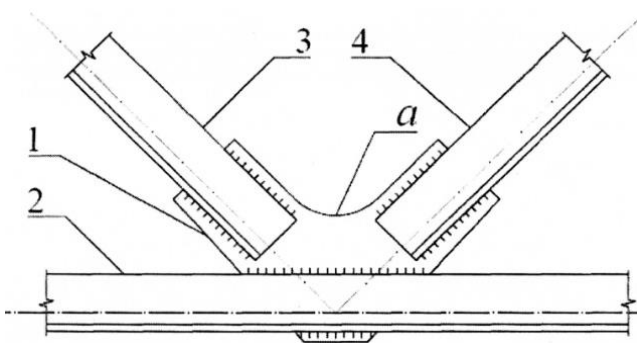


Рисунок 1.14 – Конфігурація фасонки з одним U-подібним вирізом [38]

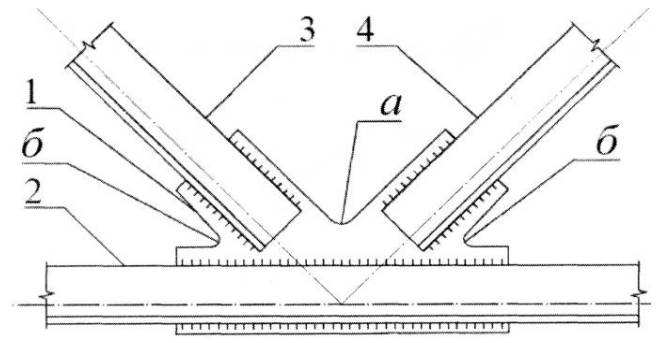


Рисунок 1.15 – Конфігурація фасонки з трьома U-подібними вирізами [39]

Однак питання зниження напружень у вузлах зварних ферм ще не вивчено в повній мірі й підлягає подальшим дослідженням як за методикою комп'ютерного моделюючого, так і натурного чи напівнатурного експериментів.

1.4. Аналіз літературних даних і постановка задач для власних досліджень

За результатами аналізу конструкторських та технологічних особливостей фасонкових вузлів зварних ферм, результатів досліджень, виконаних іншими авторами виявлено:

1. Багатофакторний вплив на показники НДС у фасонкових вузлах зварних ферм унеможливають розрахунок тримкості зварних ферм за класичними аналітичними розрахунковими методиками.

2. Значні розміри зварних ферм, необхідність значних матеріальних і енергетичних витрат стримують розвиток експериментальних досліджень натурних зразків для формування бази даних з метою верифікації розрахункових методик.

3. Розвиток сучасних засобів обчислювальної техніки і прикладного програмного забезпечення створюють можливості їх адаптації для дослідження НДС у фасонкових вузлах зварних ферм за умов комплексного впливу на них різноманітних чинників.

Аналіз конструктивних форм та технологічних чинників, що впливають на НДС у фасонкових вузлах зварних ферм, показує, що результатами раніше проведених експериментальних і теоретичних досліджень є:

Аналіз конструктивних форм та технологічних чинників, що впливають на НДС у фасонкових вузлах зварних ферм, показує, що результатами раніше проведених експериментальних і теоретичних досліджень є:

1. Запропоновані емпіричні залежності, графіки і номограми для визначення несучої здатності типових вузлів, встановлено основні параметри, від яких залежить міцність з'єднань.

2. Комп'ютерними моделюючими експериментами визначено тримкості досліджуваних ферм при статичному навантаженні.

У той же час, при визначенні НДС у зварних вузлах не враховували вплив їх конструктивних та технологічних особливостей тримкості зварної ферми.

На основі огляду літератури і проведеного аналізу виконаних раніше досліджень сформульовано задачі для власних досліджень:

- вибрати конфігурацію типової зварної ферми для дослідження;
- запропонувати схему її базування і місця прикладання зовнішніх навантажень;
- визначити тип і величину сумарного зовнішнього навантаження;
- виконати проектний розрахунок конструктивних елементів ферми за класичними інженерними методиками;
- виконати проектний розрахунок з використанням сучасних методик комп'ютерного моделюючого експерименту;
- порівняти отримані результати, визначити вузли, де формуються максимальні значення НДС;
- визначити величину зовнішнього навантаження, яке формує в конструкції параметри НДС на рівні граничного стану;
- змінюючи геометричні розміри фасонки, визначити їх вплив на тримкість зварної ферми;
- змінюючи форму фасонки, визначити її вплив на тримкість зварної ферми;
- оптимізувати конструкцію ферми за розміром і формою фасонки для отримання максимальної тримкості.

Вирішення поставлених задач дасть можливість розкрити тему роботи і її мету.

1.5. Висновок за розділом 1

1. Розглянуто зварну металеву ферму як важливий об'єкт сучасного будівельного виробництва. Охарактеризовано її переваги і недоліки, доцільність застосування з точки зору техніко-економічних показників.

2. Виявлено, що класичні аналітичні розрахункові залежності не дають можливості врахувати комплексний багатопараметричний вплив на конструкцію, а отже отримати достовірні результати проектування ферм.

3. Розглянуто підходи вітчизняних і зарубіжних авторів, які за різними методиками досліджували параметри НДС у вузлових фасонках зварних ферм і виявлено, що за рахунок зміни розмірів і форми фасонки можна підвищити тримкість зварних ферм зі збереженням без змін всіх решти конструктивних елементів. .

4. За результатами аналізу літературних даних, присвячених виявленню параметрів НДС у вузлах зварних ферм, сформовано задачі для власних досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТРИСМКОСТІ ФЕРМИ

2.1 Нормативні вимоги до проектування зварних будівельних ферм

Згідно чинних Державних будівельних норм [2, 56] при проектуванні ферм повинні бути забезпечені експлуатаційна придатність і безпека протягом строку експлуатації, визначеного у завданні на проектування. Надійність конструкцій повинна бути забезпечена згідно вимог [57].

При конструюванні зварних ферм слід мінімізувати вплив залишкових деформацій і напружень, у тому числі зварних, за рахунок раціональних конструктивних (відсутність різких перепадів перерізу, концентраторів напружень) та технологічних (послідовність зварювання, попередній вигин, зачистка абразивним кругом тощо) заходів.

При проектуванні зварних будівельних ферм рекомендується:

- обирати оптимальні за техніко-економічними показниками конструктивні схеми ферм, а також перерізи елементів конструкцій з урахуванням їх призначення та умов експлуатації;
- дотримуватися однотипності конструктивних елементів та вузлів, що досягається застосуванням уніфікованих рішень;
- передбачати мінімальну трудомісткість виготовлення конструкцій; враховувати виробничі можливості підприємств-виробників;
- виконувати розділення конструкцій на відправні елементи з урахуванням виду транспорту та габаритів транспортних засобів, підіймально-транспортного та іншого устаткування монтажних організацій;
- в конструкції передбачати найменшу трудомісткість монтажу;
- встановлювати показники довговічності з урахуванням конструктивних, технологічних та експлуатаційних обмежень згідно з паспортними характеристиками режимів експлуатації будівель і споруд.

Розрахункові схеми й основні передумови розрахунку повинні відображати дійсні умови роботи ферм.

Сталеві конструкції необхідно, як правило, розраховувати як єдині просторові системи з урахуванням чинників, що визначають напружений і деформований стан за потреби з урахуванням нелінійних властивостей розрахункової схеми.

Вибір розрахункових схем, а також методів розрахунку сталевих конструкцій рекомендується здійснювати з використанням комп'ютерної техніки і прикладних програмних пакетів.

Для зварних будівельних ферм слід застосовувати сталевий прокат загального призначення і прокат для зварних конструкцій, гнуті профілі і труби з низьковуглецевих і низьколегованих сталей.

Основні фізичні властивості матеріалів для конструкцій слід приймати згідно з їх стандартами та сертифікатами якості.

При виборі сталі для конструкцій слід враховувати:

- клас відповідальності будівель і споруд згідно до вимог [2];
- призначення конструкцій та елементів;
- можливі наслідки досягнення граничних станів;
- характер діючих напружень (статичне, динамічне) та їх рівень;
- вид напруженого стану (одноосьовий, плоский чи об'ємний, розтяг або стиск);
- рівень залишкових напружень від зварних з'єднань, ступінь концентрації напружень, властивості сталі в зоні зварювання;
- ступінь агресивності впливів;
- особливості конструктивної форми і технології виготовлення (концентратори напружень, гільйотинне різання, наклеп тощо);
- кліматичний район будівництва і розрахункову температуру експлуатації.

Якщо в стрижні ґратки діє розрахункове зусилля N , а перетин складається з двох кутників, то на кожен кутник доводиться зусилля $N_1 = 0,5N$. Це зусилля має бути сприйняте зварними швами, що прикріплюють кутник до фасонки.

При розрахунках прикріплень поясів до фасонки можливі такі випадки:

1) Пояс проходить через вузол, не перериваючись.

Прикріплення фасонки до поясу розраховується на рівнодіючі зусилля в елементах ґратки, що сходяться в даному вузлі, які прагнуть зрушити фасонки відносно пояса. Якщо до вузла прикладено зосереджене навантаження P , то шви, що прикріплюють фасонки до поясу, сприймають рівнодіючі зусилля від навантаження P і різниці зусиль в суміжних прогонах.

2) У вузлі до пояса примикає тільки стійка.

В цьому випадку $N_{\phi} = N_2 - N_1 = 0$, прикріплення стійки до фасонки і фасонки до пояса розраховують на зусилля в стійці $N = N_c$

3) У вузлі влаштовується стик, заводський або монтажний. В цьому випадку необхідно повністю перекрити стик спеціальними накладками, не включаючи, як правило, в роботу стику фасонку. Можна фасонку включити в роботу стику, якщо продовжити її за вузол.

Згідно [2] передбачено, що при проектуванні конструкцій повинні бути забезпечені експлуатаційна придатність і безпека протягом строку експлуатації, визначеного у завданні на проектування. Окрім цього, проектування конструкцій виконують з урахуванням вимог та умов, наведених у завданні на проектування. Для цього необхідно:

- забезпечувати надійність конструкцій за рахунок виконання вимог до вибору матеріалів, конструювання та розрахунків;
- приймати конструктивні рішення, що забезпечують міцність, жорсткість, стійкість і просторову незмінюваність будівель і споруд у цілому та їх окремих елементів під час транспортування, монтажу та експлуатації, при цьому передбачаючи в'язі залежно від основних параметрів будівлі та режиму її експлуатації (конструктивної схеми, прольотів, типів кранів та режимів їх роботи, температурних впливів тощо);
- передбачувати заходи щодо забезпечення довговічності конструкцій та захисту їх від корозії, впливу вогню і тепла, зносу та стирання;
- передбачувати технологічність виготовлення та монтажу конструкцій;

- враховувати відхилення від проектних розмірів і геометричної форми елементів конструкцій, які допускаються під час виготовлення та зведення;

- встановлювати методи та обсяги контролю під час виготовлення та зведення конструкцій, а також у процесі їх експлуатації, включаючи, за необхідності, виконання випробувань окремих елементів, вузлів, з'єднань і конструкцій у цілому, а також, за необхідності, встановлення контрольно-сигнальних систем чи інших засобів моніторингу;

- передбачати можливість огляду, обстеження і діагностики, а також проведення профілактичних і ремонтних робіт. За необхідності передбачати для цього ходові сходи та площадки, спеціальні пристосування (столики, провувшини, фіксатори тощо) для забезпечення можливості кріплення постійних і тимчасових пристосувань.

У робочих кресленнях конструкцій і в документації на замовлення матеріалів слід наводити відомості про:

- категорію конструкції та її елементів за призначенням та напруженим станом відповідно до додатка В;

- сталі та додаткові вимоги до них, передбачені нормативними документами і цими Нормами;

- спосіб виконання зварних з'єднань, вид і режим зварювання, типи, марки, діаметри електродів для механізованого зварювання, положення шва при зварюванні, тип підкладки для стикових швів;

У проекті слід указувати послідовність монтажу елементів і виконання вузлів, а також допустимі монтажні навантаження, якщо зазначені чинники враховувались під час визначення розрахункових зусиль.

При проектуванні вузлів передбачена така методика [1] (рис. 2.1):

а) визначення координат розміщення вузлів ферми і кутів між поясом і розкосами;

б) визначення типу і розмірів прокатних профілів для стержневих елементів ферми;

в, г) визначення довжин розкосів з врахуванням нормованої віддалі між поясом і торцями розкосів;

- д) визначення навантажень на стержні і відповідної довжини зварних швів між стержнями і фасонкою;
- е) визначення розмірів фасонки для даного вузла.

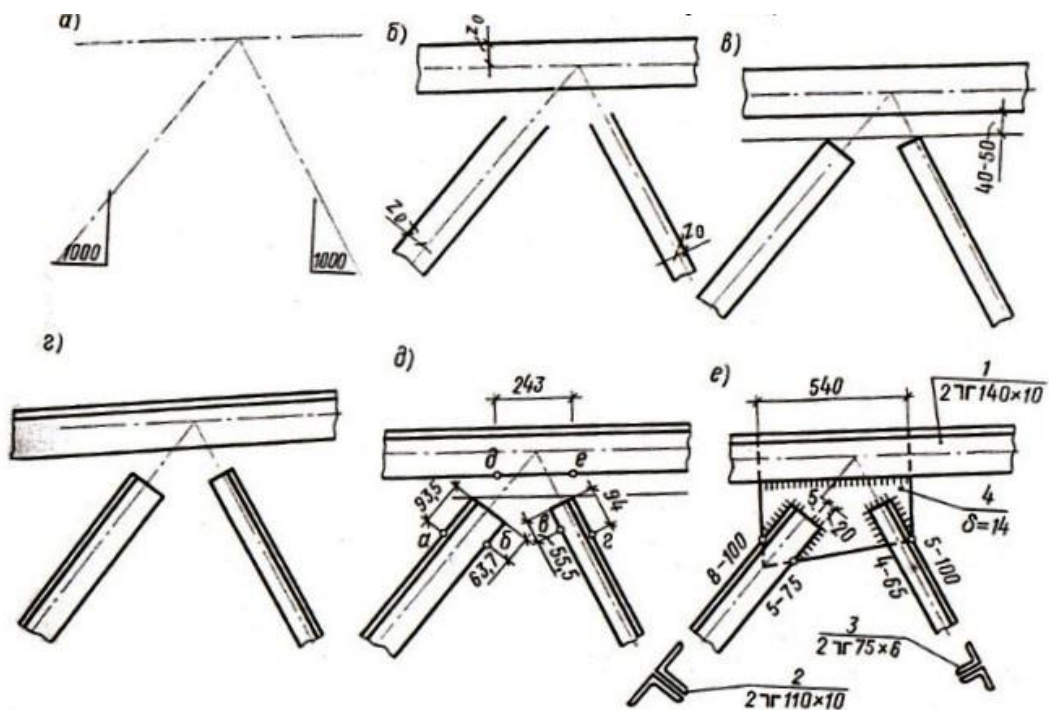


Рисунок 2.1 – Методика проектування фасонки у вузлах ферм

Наведена вище послідовність застосовується для вузла, стержні в якому сприймають найбільші зусилля. З точки зору уніфікації конструкції визначені таким чином розміри фасонки приймаються для всіх решті вузлів такого типу не залежно від навантажень на стержні.

2.2 Сучасні програмні комплекси для проектування й дослідження вузлів зварних ферм

У сучасній науці та інженерній практиці широко використовується велика кількість розрахункових програмних комплексів, кожний з яких має свої ключові переваги і недоліки.

Розрахунок металевих конструкцій, зокрема зварних ферм та їх вузлів за допомогою програмних комплексів виклали у своїх роботах Дрокін А.В. [58], Алпатов В.Ю. (ПК ПОФСК-Мираж-ПСМК, «Лира-W», SCAD, Cosmos Works, Design Space) [59], Алдушкін Р.В. (ПК SCAD і Mathcad) [60], Дубенець В.Г.,

Савченко О.В. (ПК АРМ WinTruss) [61], Шингера Н.Я. (ПК ANSYS) [35], (рис. 2.2) та ін.

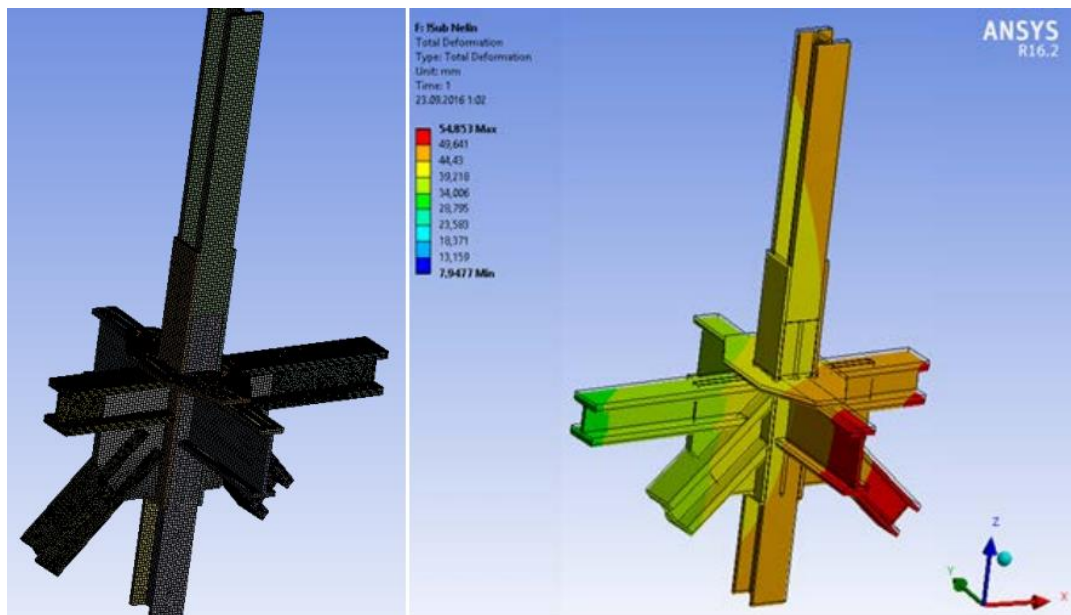


Рисунок 2.2 – Дослідження вузлів зварних ферм комп'ютерним моделюванням з використанням ПК ANSYS

Для розрахунку і проектування вузлів сталевих будівельних конструкцій широке застосування знаходить програмний комплекс «Комета» [54] (рис. 2.1), яка входить до складу SCAD Office.

Розрахунки виконуються згідно ДБН В-2.6-163:2010 «Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу». Основна задача, яку вирішують за допомогою комплексу «Комета» – отримання проекту вузла (рис.2.3).

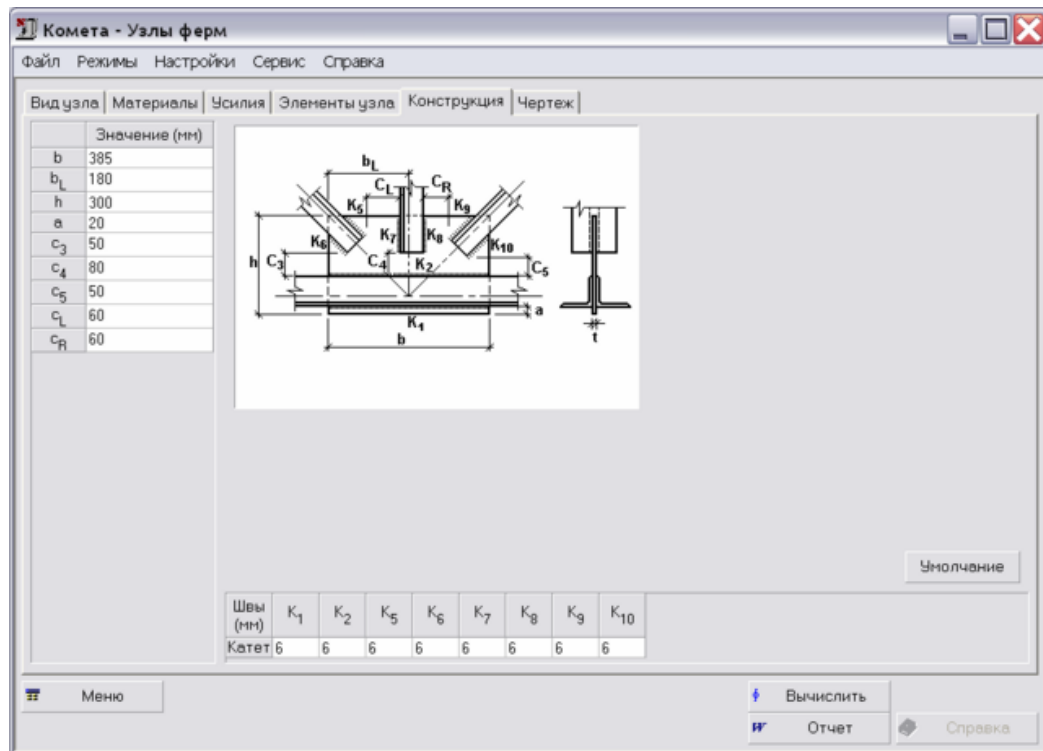


Рисунок 2.3 – Розрахунок вузлів зварних ферм з ПК «Комета»

ПК «Комета» дає можливість проектувати зварні вузли ферм заводського виготовлення і монтажних вузлів. Вихідними даними для проектування є інформація про геометрію вузла, переріз елементів ферми, діючі навантаження і матеріал конструкції. Проектуються вузли зі спарених кутників і труб різного перерізу.

Результатом роботи є креслення вузла й інформація про міцність його окремих елементів (деталей конструкції та зварних швів). Передбачена можливість експорту отриманих вузлів в формат DXF-файлов системи AutoCAD

У дипломній роботі виконано розрахунок зварної ферми та НДС у вузлах під дією статичних навантажень з використанням прикладного програмного пакету SolidWorks. SolidWorks є системою гібридного (твердотільного і поверхневого) параметричного моделювання, вона призначена для проектування деталей в тривимірному просторі (3-D проектування), а також для оформлення конструкторської документації (рис. 2.4).

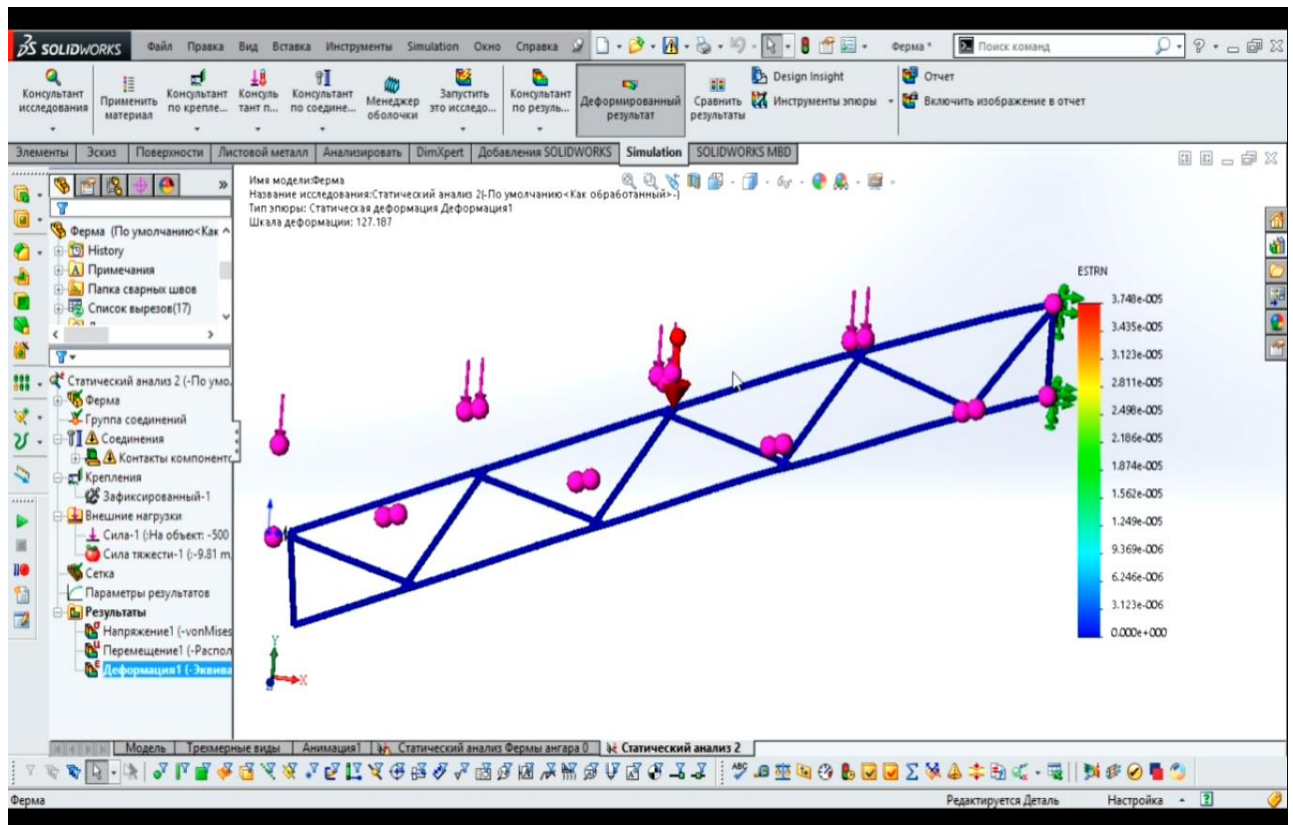


Рисунок 2.4 – Дослідження поведінки зварних ферм комп'ютерним моделюванням з використанням SolidWorks

SolidWorks забезпечує розробку виробів різного ступеня складності і призначення. Працює в середовищі Microsoft Windows. Розроблено компанією SolidWorks Corporation, створеної з нуля Джоном Хірштіком, а з 1997 року є незалежним підрозділом компанії Dassault Systemes (Франція). Програму почали розробляти в 1993 році, вона почала продаватися в 1995 і склала конкуренцію таким продуктам, як AutoCAD і Autodesk Mechanical Desktop. Система SolidWorks стала першою САПР, що підтримує твердотільне моделювання для платформи Windows.

Базовий функціонал програми SolidWorks доступний без установки розширень. SolidWorks забезпечує:

- твердотільне 3D моделювання;
- розробку зварних конструкцій;
- розрахунки на міцність;
- прорахунок гідро / аеродинаміки;
- можливість створення креслень;
- проектування з урахуванням матеріалу виробу;

- візуалізацію;
- розрахунок на вигин;
- роботу з даними 3D сканування (функція ScanTo3D);
- можливість проектування виробів з листового металу;
- роботу з електросхеми;
- можливість анімації готового виробу;
- експорт даних в різні формати.

Програмне забезпечення SolidWorks, включає десятки можливостей, які мінімізують час, забезпечують високу достовірність результатів за рахунок врахування багато параметричного впливу на досліджувану систему.

2.3. Методика дослідження параметрів НДС ферми комп'ютерним моделюючим експериментом в ПК SolidWorks

Проектний розрахунок зварної підкровоквяної ферми під дією статичних навантажень виконано комп'ютерним моделюючим експериментом з використанням прикладного програмного пакету SolidWorks, який алгоритмічно базується на методі скінченних елементів. Мета скінченно-елементного аналізу – знайти відгук системи на заданий зовнішній вплив.

Для вирішення використовується математична модель:

- геометрична модель CAD разом із заданим вантаженням являє собою формалізовану фізичну модель (рисунок 2.5, а);
- скінченно-елементна сітка є математичним поданням геометричної моделі CAD; це розрахункова модель (рисунок 2.5, б);
- точність розрахунків визначається припущеннями фізичної моделі і щільністю сітки.

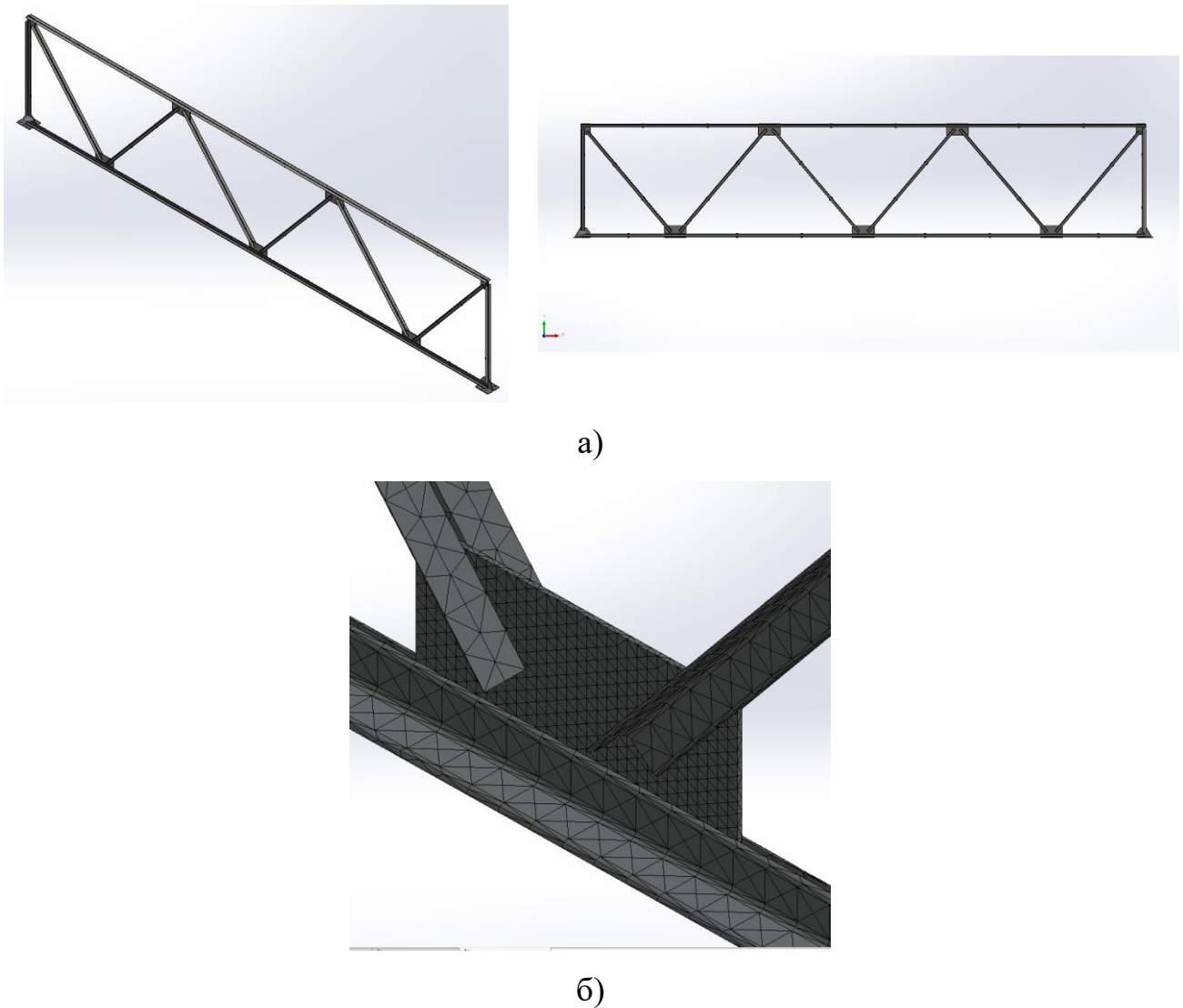


Рисунок 2.5 – Досліджувана зварна ферма:

а) CAD – геометрична модель;

б) CAE – скінченно-елементна сіткова модель.

Розв'язання задачі при напружено-деформованих станах включає такі основні кроки конструкційного аналізу.

1. Основні допущення:

– вибір типу аналізу (статичний, динамічний, модальний), проводиться відповідні налаштування програми;

– вибір контактної моделі;

– вибір типу елементів (оболонкові або твердотільні).

2. Препроцесінг:

– побудова геометричної моделі. Також вона може бути експортована з будь-якої CAD-системи;

- вибір матеріалу об'єкта і зазначення всіх його необхідних властивостей (можуть задаватись з клавіатури або імпортуватись з бібліотеки матеріалів SolidWorks);

- генерація сітки. Геометрична модель розбивається на скінченні елементи.

При розбивці можуть задаватись різні параметри сітки;

- навантаження і закріплення конструкції;
- вибір розрахункових параметрів;

1. Розрахунок.

2. Постпроцесинг:

- перегляд результатів (рис. 2.6). В результаті розв'язку формується файл результатів;

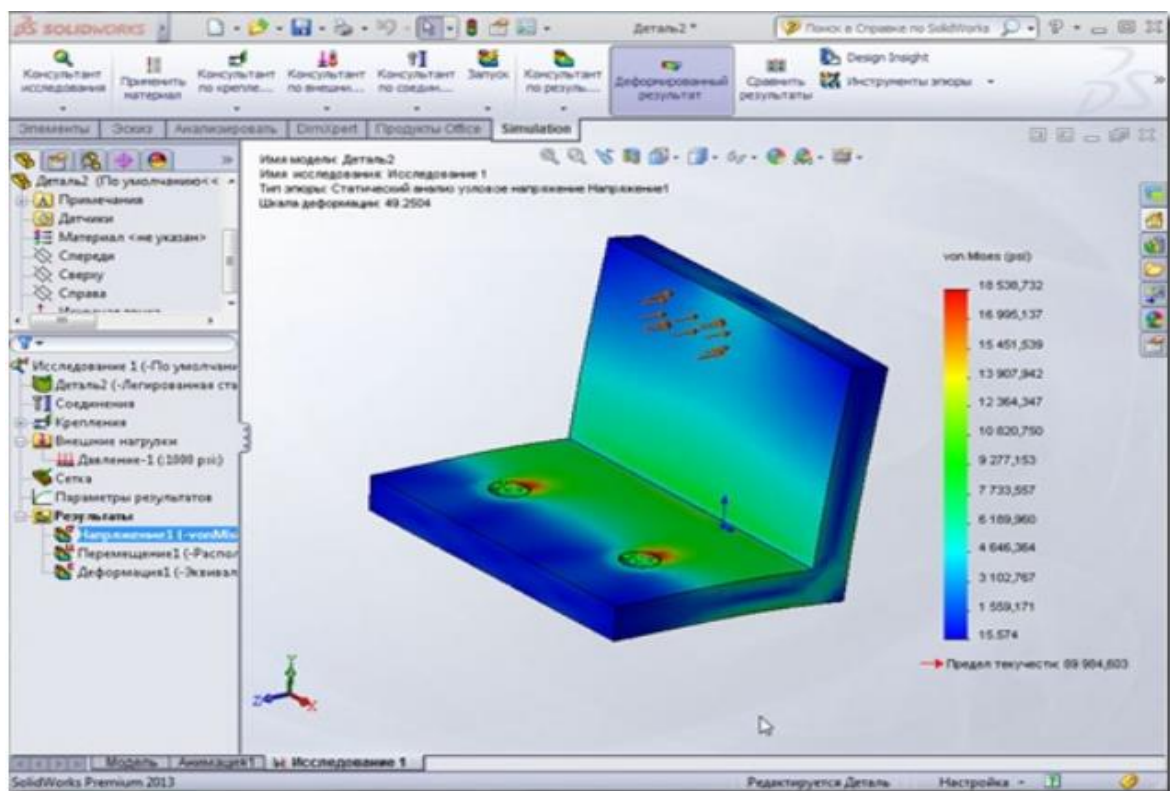


Рисунок 2.6 – Перегляд результатів досліджень НДС в елементах конструкції

- перевірка достовірності рішення. Всі фізичні величини представлені в графічному вікні SolidWorks у вигляді картинок, таблиць, графіків, анімацій.

У SolidWorks на самому початку розв'язку задачі вибирається тип інженерного аналізу, після чого програма вставляє в схему проекту відповідний блок, який містить всі необхідні етапи виконання аналізу.

2.4. Висновок за розділом 2

Висвітлено нормативні вимоги для проектування зварних ферм в цілому і вузлових елементів зокрема. Описано класичну методику проектування вузлів зварних ферм і визначення розмірів фасонок.

Проаналізовано існуючі програмні комплекси для розрахунку напружено-деформованого стану конструкції згідно чинних нормативних вимог. Виявлено їх переваги і недоліки для конструювання зварних ферм. На підставі такого аналізу для власних досліджень фасонок вибрано програмний комплекс SolidWorks, який поєднує оптимальне співвідношення точності результатів і трудоємності комп'ютерного моделювання.

Описано методику комп'ютерного моделюючого експерименту на основі методу скінчених елементів для дослідження вузлових фасонок зварних ферм програмним комплексом SolidWorks.

РОЗДІЛ 3

ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ ФАСОНКОВИХ ВУЗЛІВ НА ТРИМКІСТЬ ФЕРМИ

3.1 Вибір зварної ферми для дослідження

Для дослідження в роботі прийнято зварну підкрювяну ферму 18000x3600 мм (рис. 3.1). Вибір зумовлено широким спектром її застосування. Таку конфігурацію ферми можна використовувати як підкрювяну ферму в спорудах, де основний тип навантаження статичний, так і для тримких конструкцій мостів, підкранових шляхів та башт підіймальних кранів, опор ліній електропередач, де, крім статичних навантажень, суттєвим є вплив циклічних навантажень.

Ферми такого типу забезпечують тримкість при комплексній дії навантажень від кроквяних конструкцій та підвісного технологічного устаткування.

Верхній і нижній пояси та стояки досліджуваної ферми виготовлені зі спарених вальцьованих кутникових профілів 100x100x12 мм. Розкоси, які поєднують пояси, виготовлено зі спарених вальцьованих кутників 90x90x8 мм. Прогін ферми $L=18000$ мм, габаритна висота $h=3600$ мм, панель $a=6000$ мм.

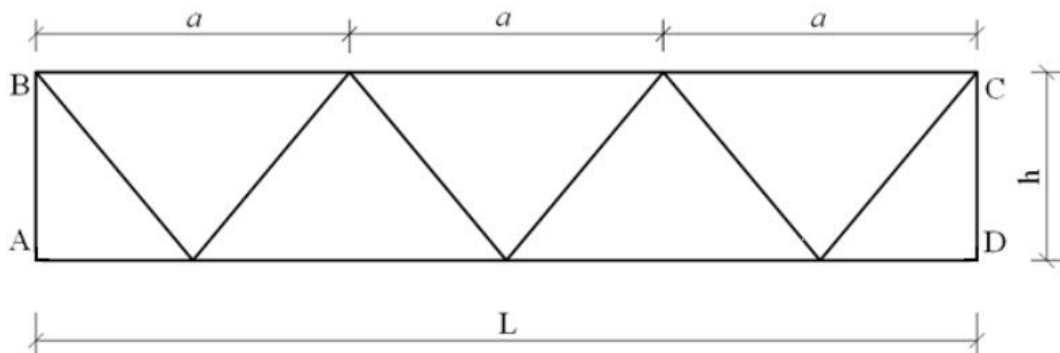


Рисунок 3.1 – Конструктивна схема досліджуваної ферми

Фасонки для формування вузлів і сухарики для поєднання паралельних спарених кутників, виготовлені з листового вальцьованого металу товщиною 10 мм.

Конструктивні елементи досліджуваного зразка, а саме вальцьовані кутники, фасонки і сухарики, виготовлені зі сталі звичайної якості ВСт3пс. Хімічний склад цієї сталі подано на рис.3.3 [4], а механічні властивості – в табл. 3.1 [4].

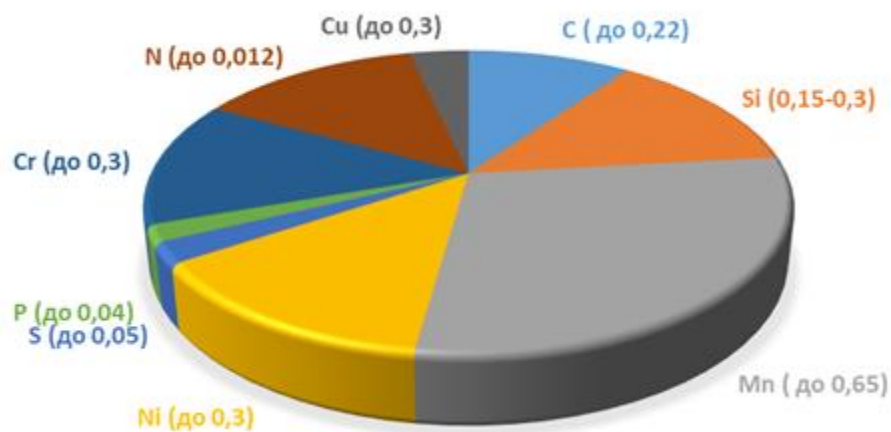


Рисунок 3.2 – Хімічний склад сталі в %

Таблиця 3.1

Механічні властивості сталі ВСт3сп

| Призначення | Межа міцності, σ_B , МПа | Межа текучості σ_T , МПа | Відносне видовження $\delta_{0,2}$, % |
|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Для будівельних конструкцій | 390 | 280 | 27 |

Всі зварні шви на зразках виконано напівавтоматичним дуговим зварюванням постійним струмом прямої полярності дровим електродом Св-08Г2С. Цей зварювальний дріт призначений для використання в механізованих зварювальних процесах, а саме в зварювальних автоматах і в пристроях напівавтоматичного зварювання. Дріт Св-08Г2С дозволяє використовувати при зварюванні як захисне середовище чистий CO_2 , що значно здешевлює і прискорює виробничі процеси. Для високонавантажених конструкцій, при зварюванні дровом Св-08Г2С можна використовувати газову суміш з CO_2 (80%) і Ar (20%). У такій газовій суміші зварювальний шов, виконаний з використанням обмідненого дроту Св-08Г2С, матиме найвищі показники ударної в'язкості й межі міцності.

Хімічний склад зварного шва, виконаного дровом Св-08Г2С на сталі ВСт3сп подано на рис. 3.3 [35], а механічні властивості шва – в табл. 3.1 [35].

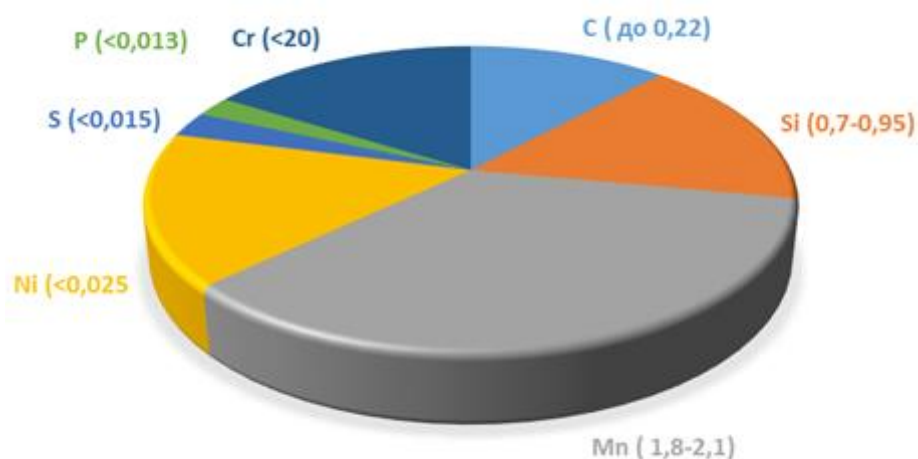


Рисунок 3.3 – Хімічний склад зварного шва в %

Таблиця 3.2

Механічні властивості зварного шва,
виконаного дротом Св-08Г2С на сталі ВСтЗсп

| Межа міцності, σ_B , МПа | Межа текучості σ_T , МПа | Відносне видовження $\delta_{0,2}$, % |
|------------------------------------|------------------------------------|---|
| 283 | 270 | 9 |

Механічні властивості основного матеріалу і зварного шва зумовлюють показники міцності ферми в цілому.

При виборі ферми враховано нормативні вимоги [57], згідно яких при проектуванні конструкцій повинні бути забезпечені експлуатаційна придатність і безпека протягом строку експлуатації, визначеного у завданні на проектування. Окрім цього, проектування конструкцій виконують з урахуванням вимог охорони навколишнього середовища, а також інших особливих умов, наведених у завданні на проектування.

До переліку можна віднести такі положення:

- передбачувати технологічність виготовлення та монтажу конструкцій;
- передбачувати заходи щодо забезпечення довговічності конструкцій та захисту їх від корозії, впливу вогню і тепла, зносу та стирання;
- забезпечувати надійність конструкцій за рахунок виконання вимог до вибору матеріалів, конструювання та розрахунків;

- передбачати можливість огляду, обстеження й діагностики, а також проведення профілактичних і ремонтних робіт;

- приймати конструктивні рішення, що забезпечують міцність, жорсткість стійкість і просторову незмінюваність будівель і споруд у цілому та їх окремих елементів під час транспортування, монтажу та експлуатації;

- забезпечувати складальність конструкцій розрахунком точності геометричних параметрів комплектуючих елементів згідно з [57].

- враховувати відхилення від проектних розмірів і геометричної форми елементів конструкцій, які допускаються під час виготовлення та зведення.

Конструктивні та технологічні аспекти ферми узгоджено з рекомендаціями [15].

Розрахунок таких ферм за класичними інженерними методиками не дає результатів з високою достовірністю, оскільки не можна враховувати комплексний вплив багатьох конструктивних, технологічних, експлуатаційних та аварійних чинників.

Найдостовірніші результати щодо поведінки таких ферм отримують натурними експериментальними дослідженнями. Однак такий методичний підхід є надто трудомістким і передбачає значні матеріальні витрати та наявність потужного випробувального устаткування. Його застосовують лише в спеціалізованих випробувальних лабораторіях для типових фермових конструкцій.

Високий рівень збіжності фактичних експлуатаційних показників зварних ферм досягають за результатами напівнатурним експериментальних випробувань. Дослідним зразком за таких умов беруть масштабну модель зварної ферми і застосовують відомі положення фізичного моделювання для перерахування отриманих експериментальних показників до параметрів повномасштабної ферми.

Розв'язання проблеми дослідження зварних ферм сьогодні стало можливим за рахунок розвитку потужних обчислювальних комплексів і відповідного прикладного програмного забезпечення. Сучасні методики досліджень з використанням комп'ютерного моделюючого експерименту забезпечують достатньо високу збіжність отриманих результатів з реальними експлуатаційними показниками. Саме такий підхід до дослідження ферми прийнято в цій роботі.

3.2 Схема базування і навантаження ферми

Функціональне призначення прямокутної підкроквяної ферми визначає її схему базування й навантажування. Ферму базують, встановлюючи на консольні опорні площадки колон будівлі кінцями нижнього поясу (рис. 3.4). Крокви закріплюють навпроти двох проміжних вузлів на верхньому поясові (рис. 3.4). Крайні вузли на поздовжньому габариті ферми не навантажують кроквами, оскільки їх монтаж виконують безпосередньо на осі колон по їх верхньому габариту, рівень якого співпадає з рівнем базуючих площадок для крокв на проміжних вузлах ферми.

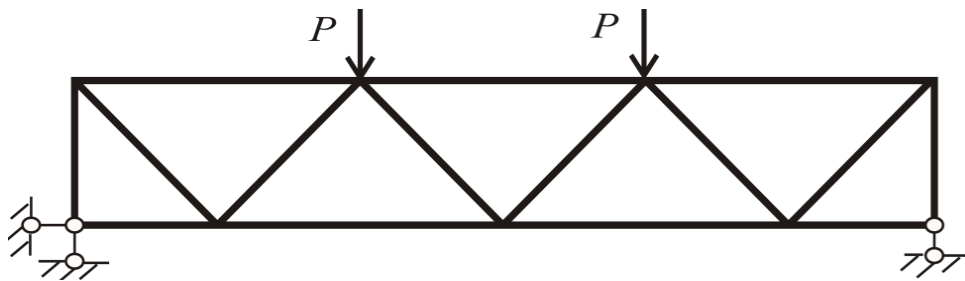


Рисунок 3.4 – Схема базування та навантажування ферми

Враховуючи прийняту для досліджень конфігурацію зварної підкроквяної ферми (рис. 3.1), схеми її базування і навантажування (рис. 3.4), очевидним є зміна її контурів при деформуванні поясів і розкосів (рис. 3.5).

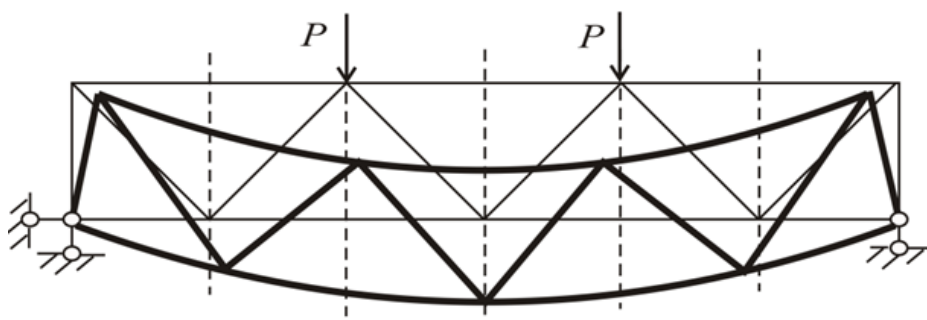


Рисунок 3.5 – Схема деформування ферми при навантажуванні

Якщо для поясів визначальними є напруження розтягу (нижній пояс) та стиску (верхній пояс), то в розкосах формується суттєвіша деформація згину, яка зумовлює значні напруження на початку зварного шва між косинкою і розкосом.

Така локалізація напружень особливо небезпечна для умов циклічних навантажень, оскільки зумовлює появу втомних пошкоджень і їх поширення впродовж експлуатації аж до руйнування ферми.

Застосовувати шарнірне з'єднання розкосів з поясами, як це допускається при розрахунках ферм, не реально з точки зору міцності й жорсткості конструкції. Зменшення розміру фасонки зменшить кут вигину розкосів при навантажуванні на ферму, однак зменшить довжину зварного шва і зниження його тримкості при статичних навантаженнях. Така ж ситуація складається й при відсутності фасонки і безпосередньому приєднанні розкосів до поясів. Проектування і виготовлення ферм з такими конструктивними підходами можливе лише для мало навантажених ферм для умов статичних навантажень.

3.3 НДС в елементах зварної ферми

3.3.1 Виявлення місця локалізації найбільших напружень в елементах ферми

В програмному пакеті SolidWorks виконано комп'ютерний моделюючий експеримент і визначено показники НДС зварної підкроквяної ферми 18000x3600 мм.

Виявлено, що максимальні напруження, які виникають в елементах досліджуваної зварної ферми, локалізуються на початку зварного шва у першому проміжному вузлі на нижньому поясові (рис. 3.6).

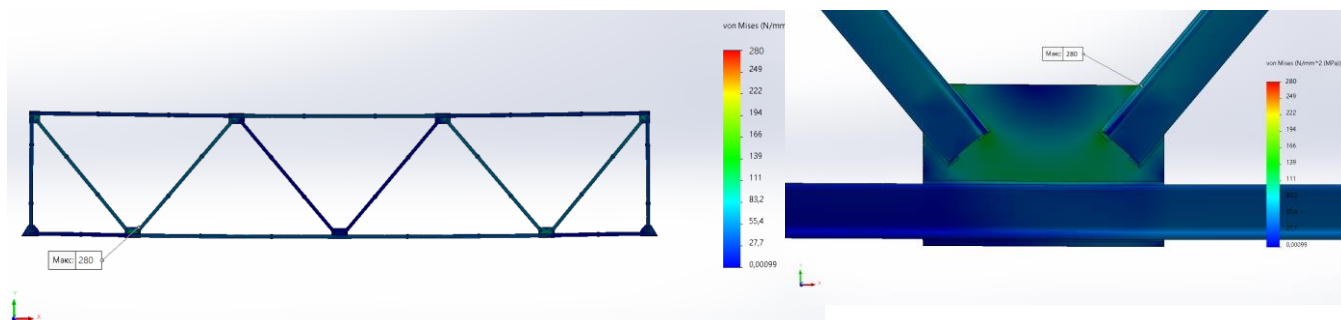


Рисунок 3.6 – Виявлення місця локалізації найбільших напружень в елементах ферми

Так при сумарному навантаженні на 2 вузли статичним зусиллям $P=320$ кН в цьому місці формуються напруження $\sigma=280$ МПа. Такі напруження є критичними з точки зору міцності зварного шва (див. табл. 3.2).

В інших конструктивних елементах і місцях їх з'єднання напруження нижчі. Однак тримкість досліджуваної конструкції вичерпано через граничні напруження в згаданому вузлі. Для підвищення тримкості ферми в цілому достатньо внести конструктивні чи технологічні зміни у цей вузол. Для цього виконано серію наступних досліджень.

3.4 Вибір фасонки для дослідження зварної ферми

Обрис фасонки визначається системою ферми, числом примикаючих стрижнів, обрисом пояса, умовами розміщення зварних швів і їх довжиною, що прикріплюють стрижні решітки.

У той же час, необхідно прагнути до найпростіших обрисів фасонки, щоб спростити їх виготовлення, прагнучи до найменшого числа порізів при вирізці фасонки з листа, зменшити обрізки забезпечивши максимальну технологічність виготовлення фасонки і ферми в цілому.

Для будь-яких обрисів фасонки базове розміщення стержневих елементів залишається незмінним і сформованим згідно нормативних вимог [1]. Для досліджуваної конструкції ферми розміщення стержнів вузла з максимальними параметрами НДС подано на рис. 3.7.

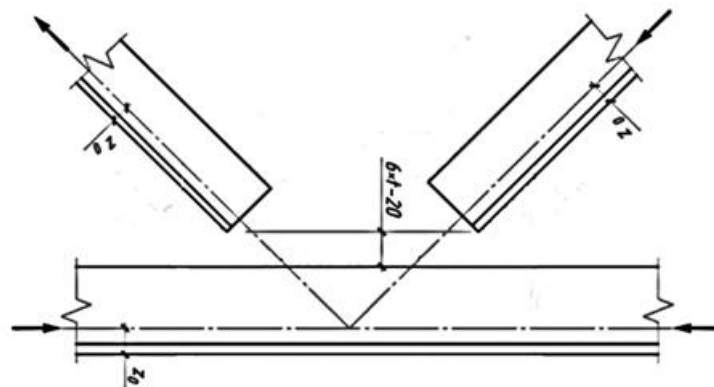


Рисунок 3.7 – Координатне розміщення вузлових елементів ферми згідно [1]

Виходячи з координатного розміщення вузлових елементів (рис. 3.7), запропоновано різні варіанти типових конструкцій фасонки, а саме прямокутних (рис. 3.8) та трапецевидних (рис. 3.9).

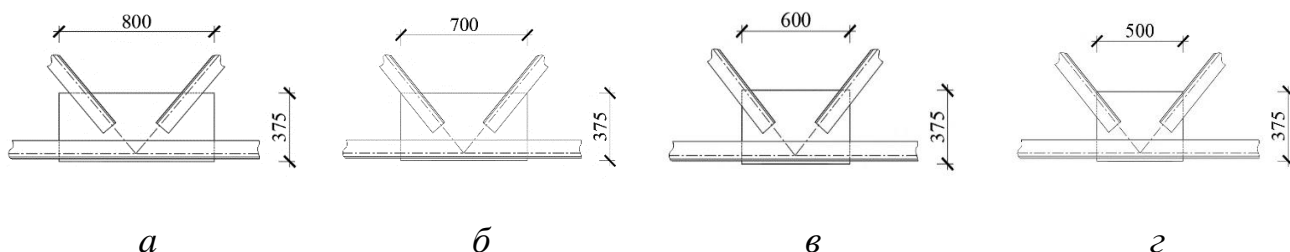


Рисунок 3.8 – Запропоновані варіанти прямокутних фасонки

Такі фасонки отримують з вальцьованого сталевго листа з мінімальним числом різів при найменшій протяжності довжини різання на гильотинних ножницях відповідної потужності. Для всіх прямокутних фасонки коефіцієнт використання матеріалу рівний 1.

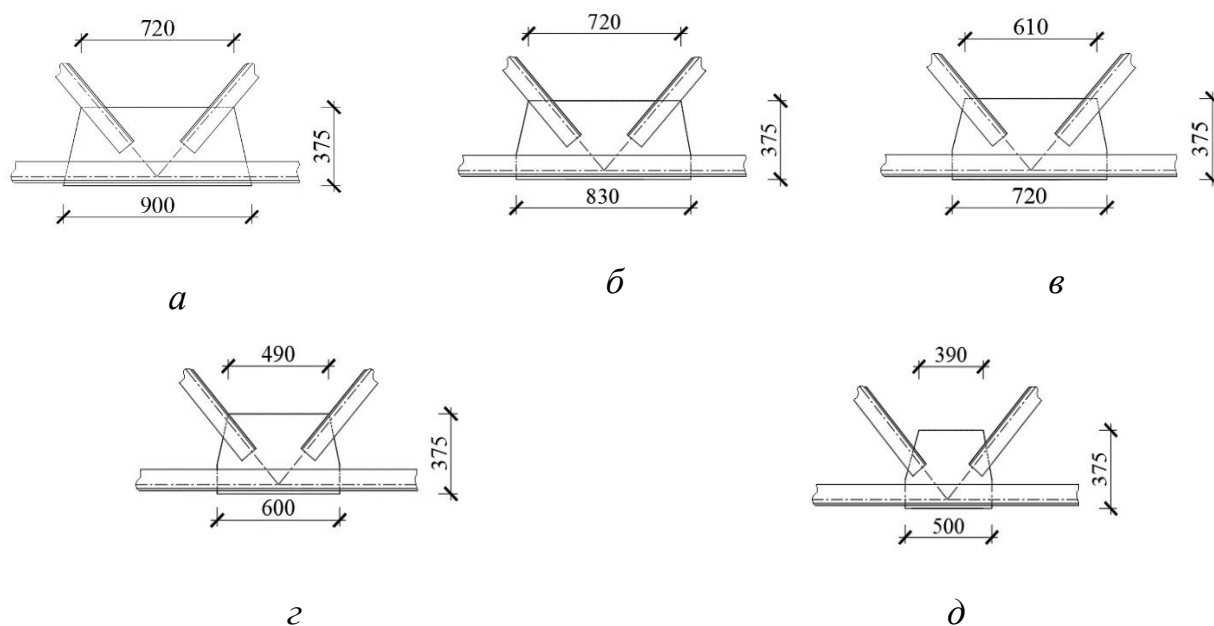


Рисунок 3.9 – Запропоновані варіанти трапецевидних фасонки

Так як в фермі число однакових фасонки майже завжди парне (внаслідок симетрії більшості ферм), то дві фасонки трапецоїдального обрису (рис. 3.9,а) вирізаються з листа одним косим зрізом. В цьому випадку технологічні відходи металу відсутні.

При проектуванні конфігурації фасонки враховано цілий ряд вимог [18]. Косий зріз фасонки повинен мати такий ухил, щоб фасонка підходила до стрижня під кутом не менше 15...20 градусів, щоб уникнути перенапруги матеріалу в місцях прикріплення стрижня. Для плавної передачі зусилля від стрижнів решітки на пояс фасонку випускають за стійку під кутом не менше 15 градусів).

Не допускається проектувати фасонки несиметричними щодо осі зусилля, так як в цьому випадку з'являються місцеві згинальні моменти.

Товщину фасонки вибирають в залежності від величини діючих зусиль і прийнятої товщини зварних швів. Товщину фасонки, зазвичай, у всіх вузлах ферми призначають в залежності від розрахункового зусилля в стислому опорному розкосі, так як в цьому вузлі виникає небезпека втрати стійкості фасонки на ділянці між торцем стрижня і ребрами жорсткості опорного вузла. Товщину фасонки рекомендується приймати однаковою у всіх вузлах ферми. При значній різниці зусиль в стрижнях решітки приймають дві товщини в межах відправного елемента.

Відстань між краями елементів ґратки і пояса у фермах зі зварними вузловими з'єднаннями на фасонках слід приймати не меншою за мм, але не більшою за 80 мм. Між торцями елементів поясів ферм, що стикаються і перекриваються накладками, слід залишати зазор величиною не менше ніж 50 мм. Зварні шви, які прикріплюють елементи ґратки ферм до фасонки, слід виводити на торець елемента на довжину 20 мм.

3.5 Вплив розмірів прямокутної фасонки на тримкість зварної ферми

3.5.1 Критерії вибору розмірів прямокутної фасонки

Виходячи з координатного розміщення стержневих елементів ферми у вузлі (рис. 3.7), приймаємо для дослідження 4 різних фасонки прямокутної форми (рис. 3.10) та 5 різних фасонки трапецевидної форми (рис. 3.11).

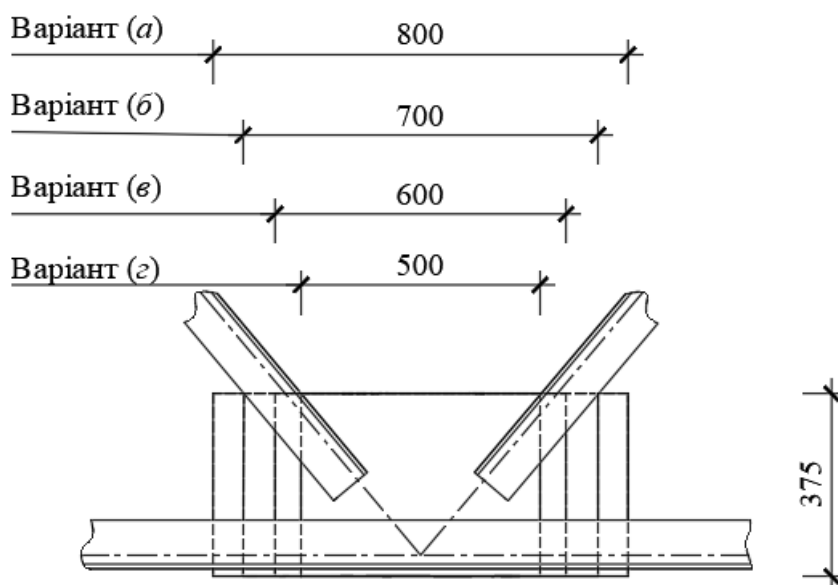


Рисунок 3.10 – Конструктивний підхід до вибору прямокутних фасонки для дослідження

При розробленні конструкції прямокутних фасонки вибір розмірів зроблено за довжиною пластини. Висоту і товщину пластини залишено постійними для зменшення факторів впливу на тримкість ферми і формування рекомендацій щодо оптимальної довжини фасонки прямокутної форми.

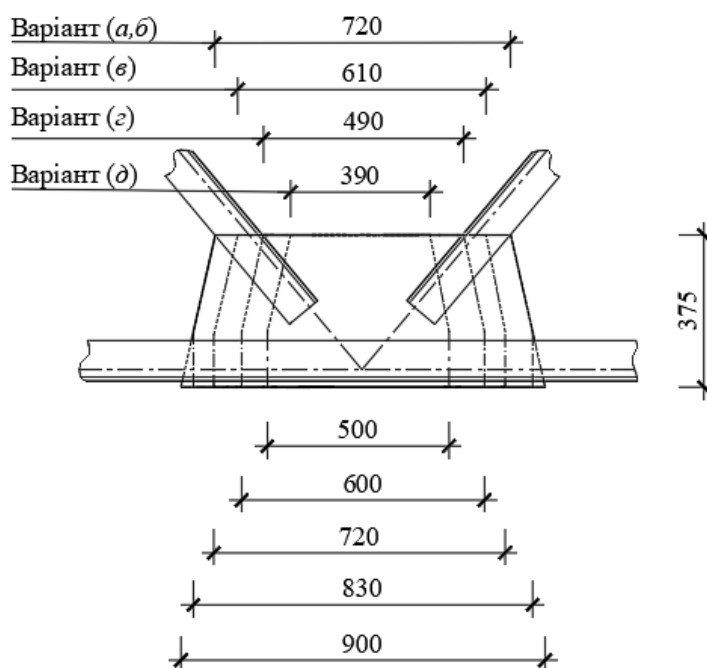


Рисунок 3.11 – Конструктивний підхід до вибору трапецевидних фасонки для дослідження

При розробленні конструкції трапецевидних фасонки вибір розмірів зроблено за довжиною пластини. Висоту, товщину і кут зрізу пластини залишено постійними для зменшення факторів впливу на тримкість ферми і формування рекомендацій щодо оптимальної довжини фасонки трапецевидної форми.

3.5.2 Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою розміром 375×800 мм

Поетапно виконано комплекс комп'ютерних моделюючих експериментів для виявлення граничного навантаження на зварну ферму при різній довжині пластини в фасонках прямокутної форми. Послідовність виконання досліджень зумовлена переходом від фасонки з максимальною матеріаломісткістю до фасонки з мінімальною матеріаломісткістю.

Так для фасонки з довжиною 800 мм за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту виявлено, що граничні напруження на рівні межі міцності матеріалу зварного шва $\sigma_{max} = 280$ МПа формуються при сумарному навантаженні на 2 вузли верхнього пояса $P_{max} = 284$ кН (рис. 3.12).

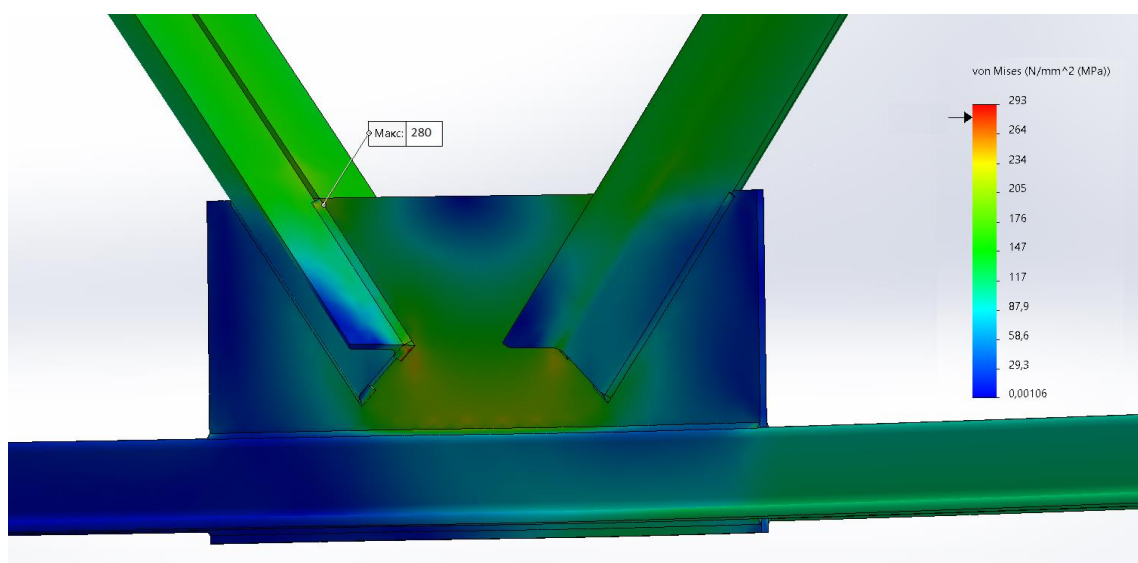


Рисунок 3.12 – Візуалізація результатів комп'ютерного моделюючого експерименту для виявлення тримкості зварної ферми з прямокутними фасонками 375×800 мм (варіант *a*)

Місце локалізації максимальних напружень залишається незмінним. Розподіл напружень по поверхні фасонки візуалізується за кольором її відповідної ділянки.

3.5.3 Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою розміром 375×700 мм

Зменшення довжини фасонки від 800 до 700 мм зумовлено зменшенням матеріаломісткості конструкцій в цілому і відповідним зменшенням її вартості. Однак важливим є також виявлення впливу такого конструктивного кроку на тримкість ферми.

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту для фасонки з довжиною 700 мм виявлено, що граничні напруження на рівні межі міцності матеріалу зварного шва $\sigma_{max} = 280$ МПа формуються при сумарному навантаженні на 2 вузли верхнього пояса $P_{max} = 300$ кН (рис. 3.13).

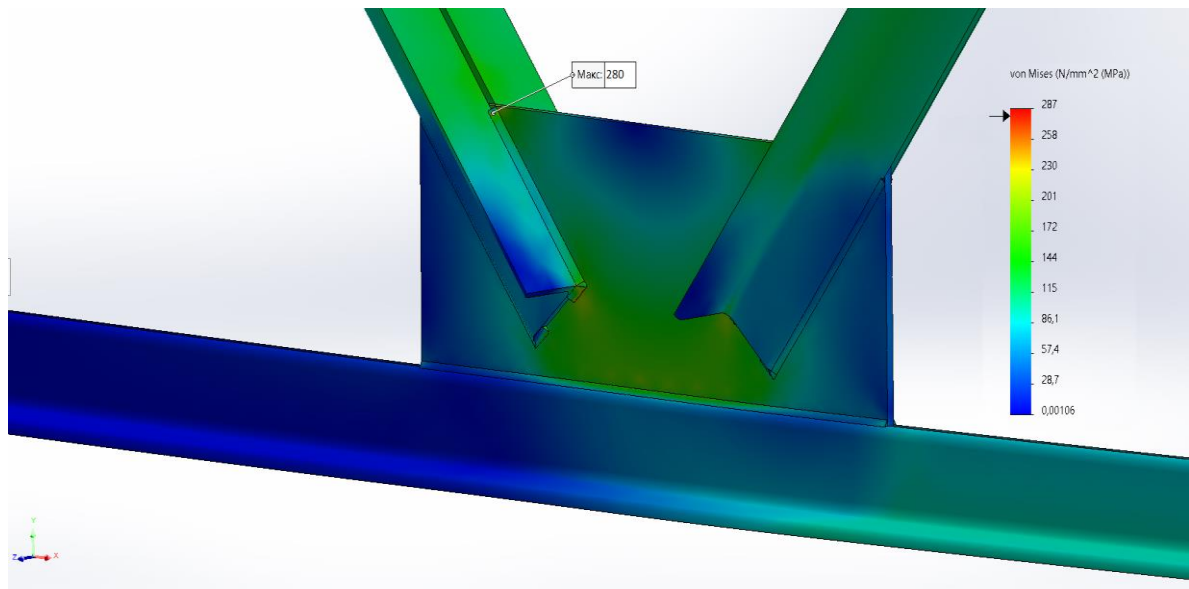


Рисунок 3.13 – Візуалізація результатів комп'ютерного моделюючого експерименту для виявлення тримкості зварної ферми з прямокутними фасонками 375×700 мм (варіант б)

Очевидним є те, що зменшення розмірів фасонки в даному випадку не зумовило зниження тримкості ферми, а, навпаки, підвищило її. Такий результат свідчить про доцільність подальшого зменшення розмірів фасонки.

3.5.4 Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою розміром 375×600 мм

Враховуючи доцільність подальшого зменшення розмірів прямокутної фасонки, отримано для дослідження варіант *в* з розмірами 375×600 мм.

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту для фасонки з довжиною 600 мм виявлено, що граничні напруження на рівні межі міцності матеріалу зварного шва $\sigma_{max} = 280$ МПа формуються при сумарному навантаженні на 2 вузли верхнього пояса $P_{max} = 329$ кН (рис. 3.14).

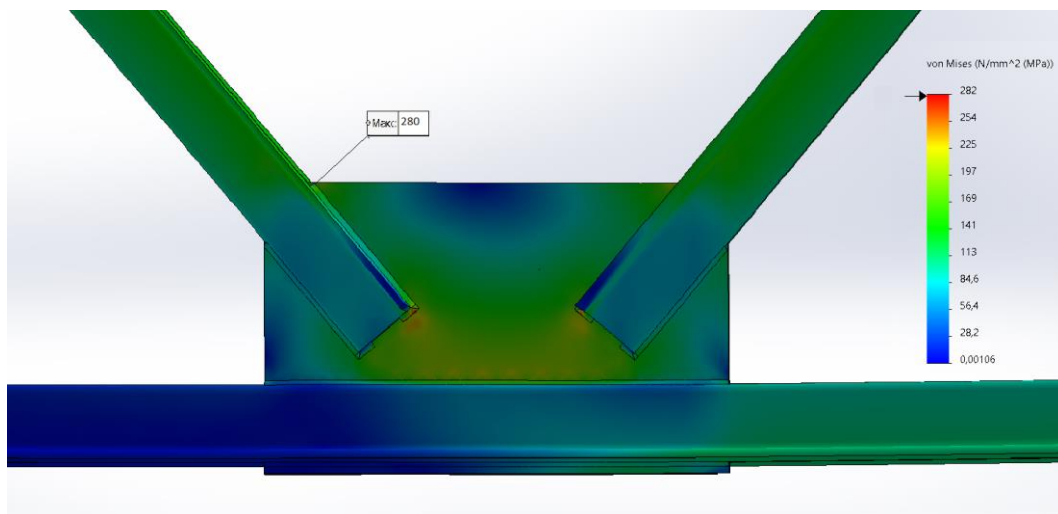


Рисунок 3.14 – Візуалізація результатів комп'ютерного моделюючого експерименту для виявлення тримкості зварної ферми з прямокутними фасонками 375×600 мм (варіант *в*)

Отримані результати показують позитивну динаміку зміни тримкості зварної ферми при зменшенні довжини фасонки. Для подальшого дослідження виконуємо подальше зменшення довжини фасонки до 500 мм.

3.5.5 Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою розміром 375×500 мм

Враховуючи доцільність подальшого зменшення розмірів прямокутної фасонки, отримано для дослідження варіант z з розмірами 375×500 мм.

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту для фасонки довжиною 500 мм виявлено, що граничні напруження на рівні межі міцності матеріалу зварного шва $\sigma_{max} = 280$ МПа формуються при сумарному навантаженні на 2 вузли верхнього пояса $P_{max} = 242$ кН (рис. 3.15).

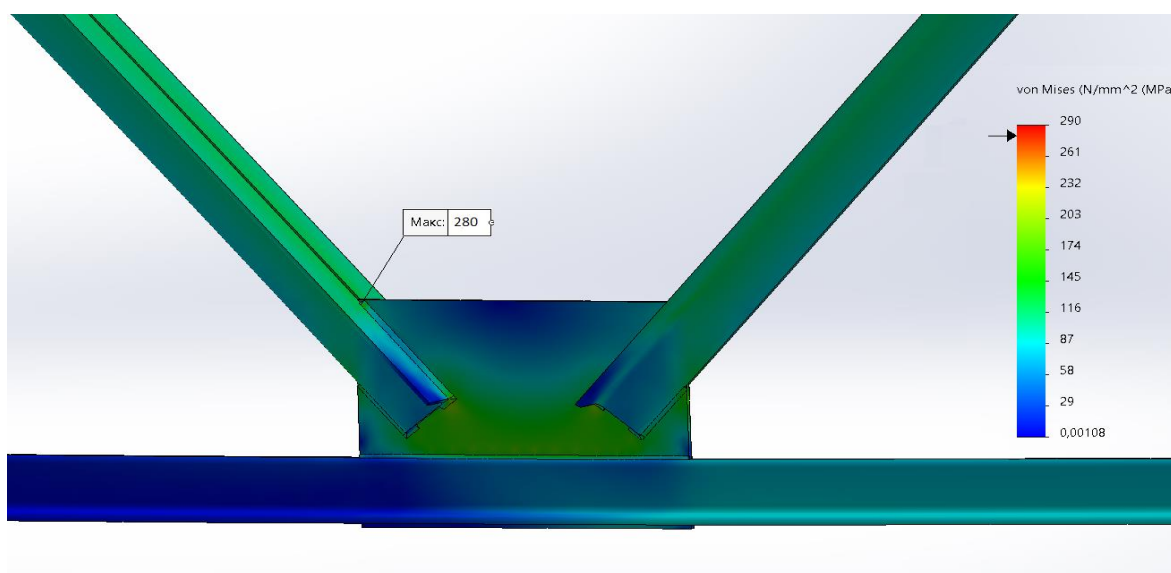


Рисунок 3.15 – Візуалізація результатів комп'ютерного моделюючого експерименту для виявлення тримкості зварної ферми з прямокутними фасонками 375×500 мм (варіант z)

На жаль, для такої довжини фасонки отримали найнижчу тримкість ферми в порівнянні з іншими дослідженими варіантами прямокутної фасонки.

Зведену інформацію про тримкість зварної ферми при різній довжині прямокутної фасонки подано в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Тримкість зварної ферми при різних розмірах прямокутної фасонки за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту

| Конструктивний варіант фасонки | Розміри фасонки, мм | Тримкість ферми, P_{max} , кН | Максимальні напруження у вузлах, σ_{max} , МПа |
|--------------------------------------|------------------------|------------------------------------|---|
| <i>a</i> | 800x375 | 284 | 280 |
| <i>б</i> | 700x375 | 300 | 280 |
| <i>в</i> | 600x375 | 329 | 280 |
| <i>г</i> | 500x375 | 242 | 280 |

За зведеними результатами виявлено, що максимальну тримкість ферми $P_{max} = 329$ кН отримано з прямокутними фасонками 600x325 мм.

3.6 Вплив розмірів трапецевидної фасонки на тримкість зварної ферми

3.6.1 Критерії вибору розмірів трапецевидної фасонки

Згідно з конструктивними підходами до вибору трапецевидних фасонок (рис. 3.9, 3.11) для дослідження запропоновано 5 трапецевидних фасонок з різними розмірами. При виборі варіантів виходили з міркувань матеріаломісткості фасонок і їх технологічності. Однак лише варіант *a* можна отримати без технологічних відходів і з одним гильотинним різом для отримання 1 фасонки. Решту конструктивних варіантів фасонок потребують щонайменше 3 гильотинних різів і при цьому появляються технологічні відходи, які в подальшому можна використати в якості косинок для інших зварних будівельних конструкцій.

3.6.2 Визначення тримкості зварної ферми з фасонковою довжиною 900 мм

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту для фасонки з довжиною 900 мм виявлено, що граничні напруження на рівні межі міцності матеріалу зварного шва $\sigma_{max} = 280$ МПа формуються при сумарному навантаженні на 2 вузли верхнього пояса $P_{max} = 300$ кН.

При виявленні тримкості зварної ферми з трапецевидними фасонками за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту отримано візуалізацію результатів, яка дає можливість оцінити якісну картину розподілу напружень по площині фасонки (рис. 3.16).

Для виявлення впливу розмірів трапецевидної фасонки на тримкість досліджуваної ферми прийнято рішення поетапно зменшувати довжину фасонки без зміни ширини фасонки і кута зрізання з обох боковин фасонки.

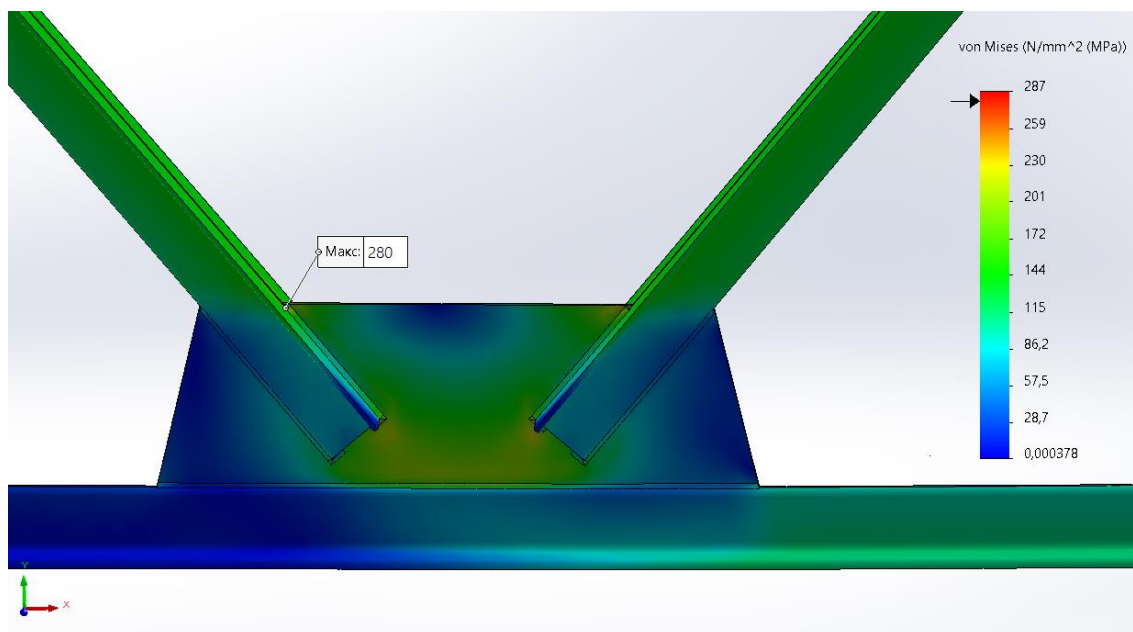


Рисунок 3.16 – Візуалізація результатів комп'ютерного моделюючого експерименту для виявлення тримкості зварної ферми з трапецевидними фасонками 375×900 мм (варіант *a*)

На рис. 3.16 показано місце локалізації максимальних напружень і їх значення, а саме на початку зварного шва.

3.6.3 Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою довжиною 830 мм

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту для фасонки з довжиною 830 мм визначено, що граничні напруження на рівні межі міцності матеріалу зварного шва $\sigma_{max} = 280$ МПа формуються при сумарному навантаженні на 2 вузли верхнього пояса $P_{max} = 285$ кН.

При порівнянні визначеної тримкості для трапецевидних фасонки за варіантами *a* і *б* виявлено, що тримкість ферми знаходиться в прямій залежності від довжини фасонки, тобто зменшення довжини фасонки зумовило зменшення тримкості ферми.

Візуалізовану картину НДС для фасонки типу *б* подано на рис. 3.17.

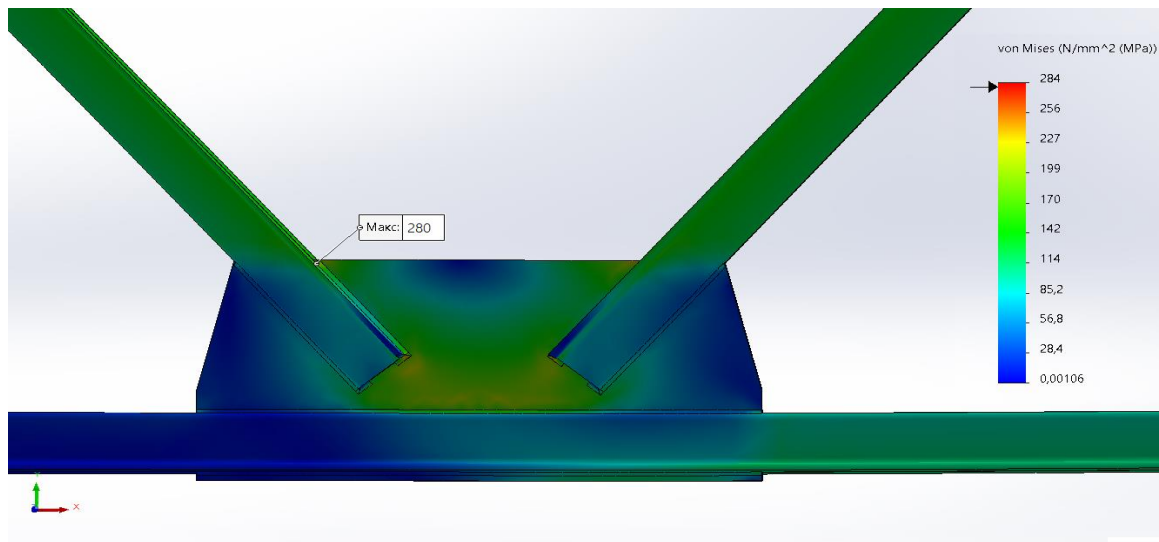


Рисунок 3.17 – Візуалізація результатів комп’ютерного моделюючого експерименту для виявлення тримкості зварної ферми з трапецевидними фасонками 375×830 мм (варіант *б*)

Місце локалізації максимальних напружень і їх величина залишається незмінними.

3.6.4 Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою довжиною 720 мм

За результатами комп’ютерного моделюючого експерименту для фасонки з довжиною 720 мм визначено, що граничні напруження на рівні межі міцності матеріалу зварного шва $\sigma_{max} = 280$ МПа формуються при сумарному навантаженні на 2 вузли верхнього пояса $P_{max} = 285$ кН.

При порівнянні визначеної тримкості для трапецевидних фасонки за варіантами *a*, *б* і *в* підтверджено виявлену в попередніх пунктах пряму залежність

тримкості ферми від довжини фасонки, тобто зменшення довжини фасонки зумовило зменшення тримкості ферми.

Візуалізовану картину НДС для фасонки типу *б* подано на рис. 3.18.

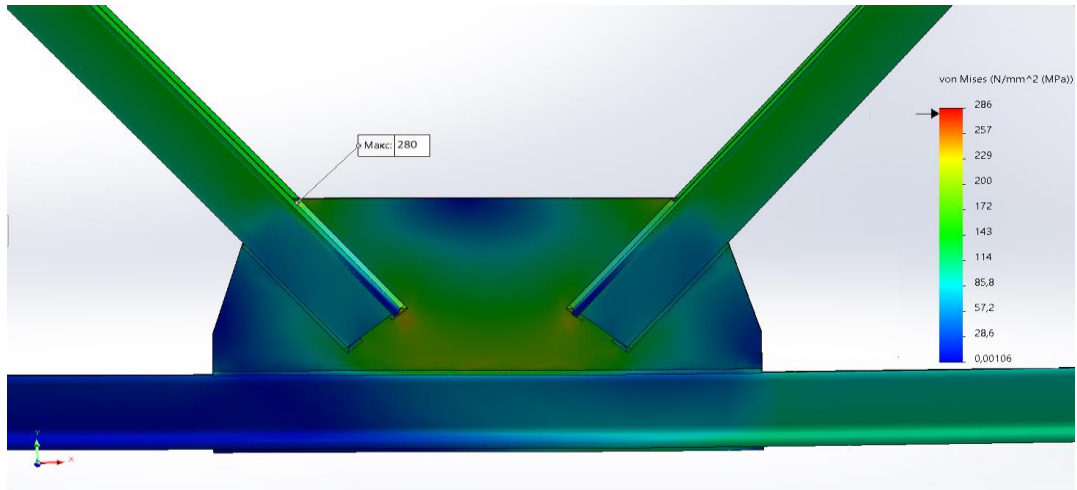


Рисунок 3.18 – Візуалізація результатів комп’ютерного моделюючого експерименту для виявлення тримкості зварної ферми з трапецевидними фасонками 375×720 мм (варіант *в*)

3.6.5 Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою довжиною 600 мм

Візуалізовану картину НДС для фасонки довжиною 600 мм подано на рис. 3.19.

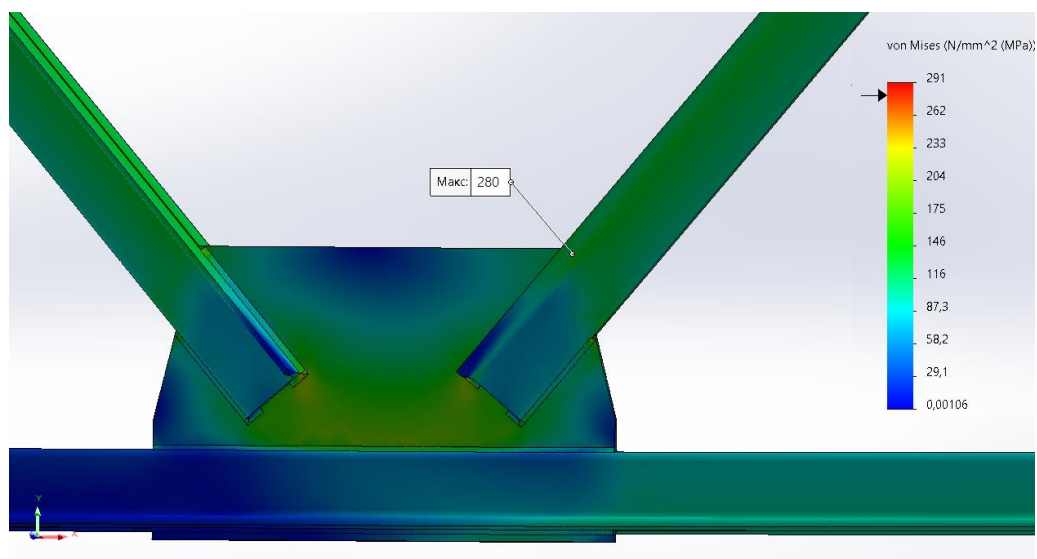


Рисунок 3.19 – Візуалізація результатів комп’ютерного моделюючого експерименту для виявлення тримкості зварної ферми з трапецевидними фасонками 375×600 мм (варіант з)

За результатами комп’ютерного моделюючого експерименту для фасонки з довжиною 600 мм визначено, що граничні напруження на рівні межі міцності матеріалу зварного шва $\sigma_{max} = 280$ МПа формуються при сумарному навантаженні на 2 вузли верхнього пояса $P_{max} = 270$ кН.

При порівнянні визначеної тримкості для трапецевидних фасонки за варіантами а, б і в підтверджено виявлену в попередньому пункті пряму залежність тримкості ферми від довжини фасонки, тобто зменшення довжини фасонки зумовило зменшення тримкості ферми.

3.6.6 Визначення тримкості зварної ферми з фасонкою довжиною 500 мм

Візуалізовану картину НДС для фасонки довжиною 500 мм подано на рис. 3.20.

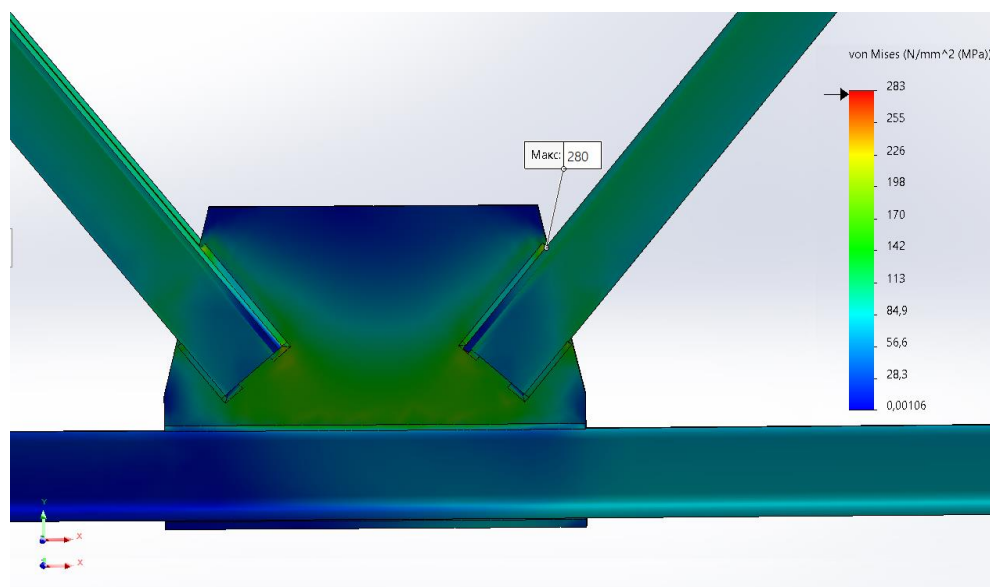


Рисунок 3.20 – Візуалізація результатів комп’ютерного моделюючого експерименту для виявлення тримкості зварної ферми з трапецевидними фасонками 375×500 мм (варіант д)

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту для фасонки з довжиною 500 мм визначено, що граничні напруження на рівні межі міцності матеріалу зварного шва $\sigma_{max} = 280$ МПа формуються при сумарному навантаженні на 2 вузли верхнього пояса $P_{max} = 255$ кН.

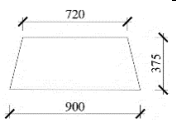
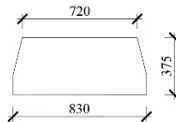
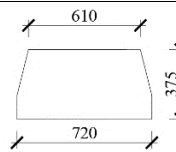
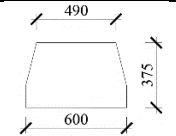
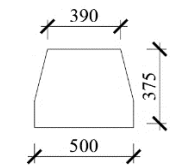
При порівнянні визначеної тримкості для трапецевидних фасонок за варіантами *a*, *б*, *в* і *г* підтверджено виявлену в попередніх пунктах пряму залежність тримкості ферми від довжини фасонки, тобто зменшення довжини фасонки зумовило зменшення тримкості ферми.

На жаль, для такої довжини фасонок отримали найнижчу тримкість ферми в порівнянні з іншими дослідженими варіантами трапецевидної фасонки.

Зведену інформацію про тримкість зварної ферми при різній довжині трапецевидної фасонки подано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Тримкість зварної ферми при різних розмірах трапецевидних фасонок за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту

| Варіант | Розміри | P_{max} , кН | σ_{max} , МПа |
|----------|---|----------------|----------------------|
| <i>a</i> |  | 300 | 280 |
| <i>б</i> |  | 285 | 280 |
| <i>в</i> |  | 270 | 280 |
| <i>г</i> |  | 255 | 280 |
| <i>д</i> |  | 180 | 280 |

3.7 Узагальнення отриманих результатів досліджень для прямокутної фасонки

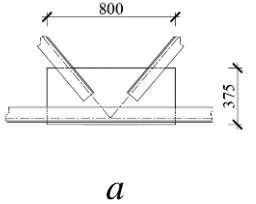
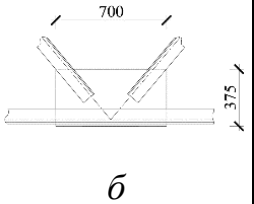
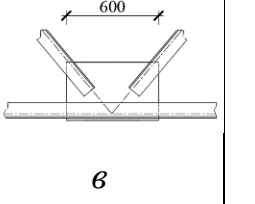
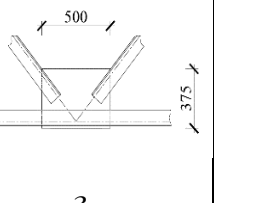
3.7.1 Залежність тримкості ферми від довжини фасонкових зварних швів

Визначено довжину зварних швів для кожного конструктивного виконання фасонки і виявлено залежність тримкості ферми від цієї довжини.

В таблиці 3.5 подано залежність тримкості досліджуваної ферми від довжини зварних швів $l_{\text{шва}}$.

Таблиця 3.5

Вплив довжини зварних швів для прямокутної фасонки
на тримкість досліджуваної ферми

| | | | | |
|-----------------------------|--|---|--|--|
| Конструкція вузла |  |  |  |  |
| $l_{\text{шва}}, \text{мм}$ | 980 | 930 | 780 | 620 |
| $P_{\text{max}}, \text{кН}$ | 284 | 280 | 329 | 242 |
| Точка на графіку | 4 | 3 | 2 | 1 |

За отриманими результатами досліджень згідно таблиці 3.5 побудовано графічну візуалізацію тримкості ферми від довжини зварних швів (рис. 3.21).

За результатами досліджень виявлено, що найменшу тримкість забезпечує фасонка довжиною 500 мм (тип *z*), найбільшу довжиною 600 мм (тип *v*).

За отриманими результатами можна зробити висновок, що тримкість зварної ферми не знаходиться в прямій залежності від довжина шва на фасонці. Довжина зварного шва не є визначальним чинником в питанні тримкості зварної ферми.

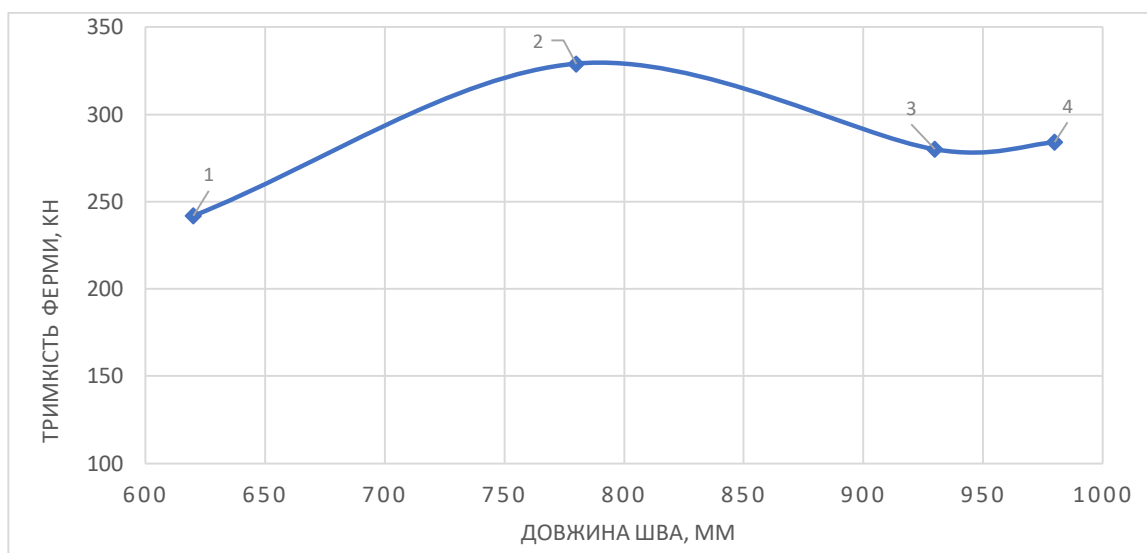


Рисунок 3.21 – Залежність тримкості ферми від довжини шва для прямокутної фасонки

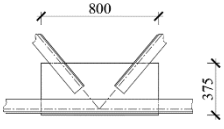
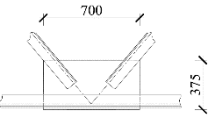
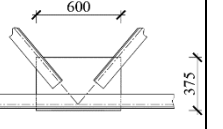
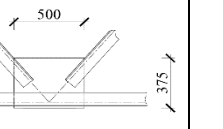
3.7.2 Залежність тримкості ферми від довжини фасонки

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту виявлено вплив розмірів прямокутної фасонки на тримкість зварної ферми.

В таблиці 3.1, подано залежність тримкості досліджуваної ферми від довжини фасонки.

Таблиця 3.6

Вплив довжини прямокутної фасонки на тримкість досліджуваної ферми

| | | | | |
|---------------------|---|---|---|---|
| Конструкція вузла |  |  |  |  |
| | <i>а</i> | <i>б</i> | <i>в</i> | <i>г</i> |
| Довжина фасонки, мм | 800 | 700 | 600 | 800 |
| P_{max} , кН | 284 | 280 | 329 | 242 |
| Точка на графіку | 4 | 3 | 2 | 1 |

За отриманими результатами досліджень згідно таблиці 3.6 побудовано графічну візуалізацію тримкості ферми від довжини фасонки (рис. 3.22).

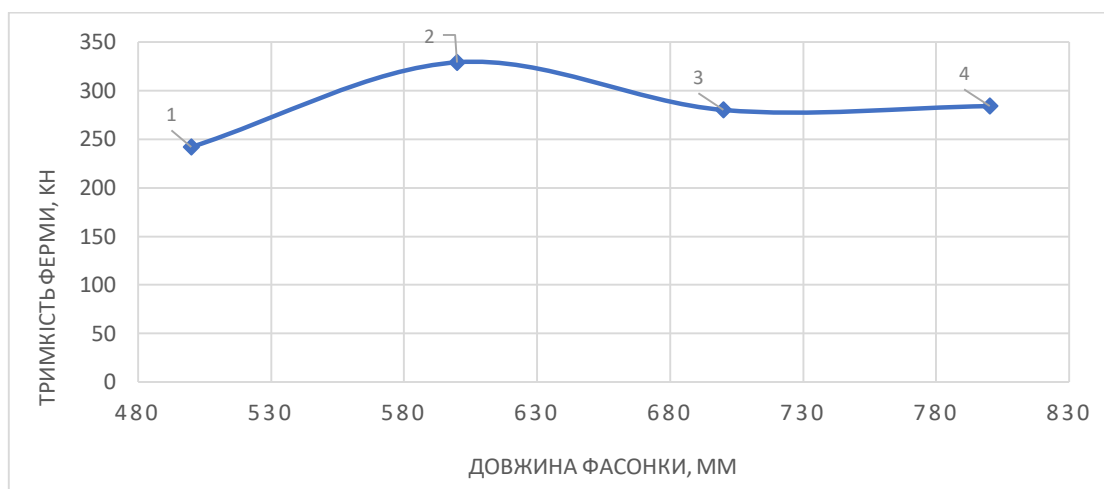


Рисунок 3.22 – Залежність тримкості ферми від довжини прямокутної фасонки

За результатами досліджень виявлено, що найменшу тримкість забезпечує фасонка довжиною 500 мм (тип *z*), найбільшу довжиною 600 мм (тип *в*). Як і у випадку з довжиною зварного шва не виявлено прямої залежності довжини фасонки і тримкості зварної ферми.

3.8 Узагальнення отриманих результатів досліджень для трапецевидної фасонки

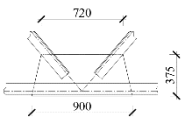
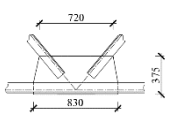
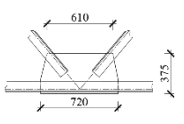
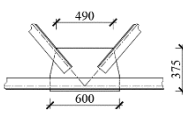
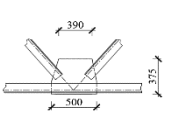
3.8.1 Залежність тримкості ферми від довжини фасонкових зварних швів

Визначено довжину зварних швів для кожного конструктивного виконання фасонки і виявлено залежність тримкості ферми від цієї довжини.

В таблиці 3.7 подано зведену інформацію тримкості досліджуваної ферми від довжини зварного шва $l_{\text{шва}}$, яка формує різне розташування розкосів відносно бокових зрізів фасонки.

Таблиця 3.7

Вплив довжини шва на трапецеподібній фасонці
на тримкість досліджуваної ферми

| | | | | | |
|-----------------------------|---|---|--|---|---|
| Конструкція вузла |  |  |  |  |  |
| $l_{\text{шва}}, \text{мм}$ | 970 | 970 | 840 | 690 | 460 |
| $P_{\text{max}}, \text{кН}$ | 300 | 285 | 270 | 255 | 180 |
| Точка на графіку | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |

За отриманими результатами досліджень згідно таблиці 3.7 побудовано графічну візуалізацію тримкості ферми від довжини зварного шва (рис. 3.23).

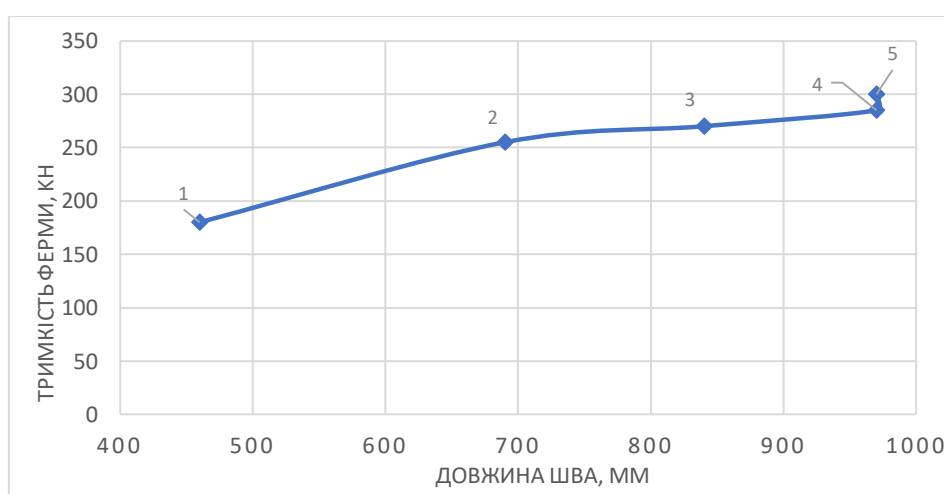


Рисунок 3.23 – Залежність тримкості ферми від довжини зварного шва на трапецеподібній фасонці

За результатами досліджень виявлено, що найменшу тримкість забезпечує фасонка типу δ , найбільшу тип a .

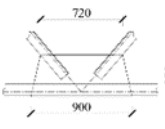
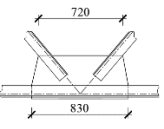
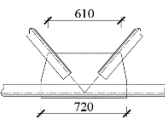
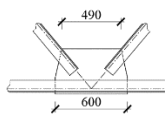
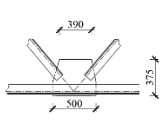
3.8.2 Вплив площі фасонки на тримкість досліджуваної ферми

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту виявлено вплив розмірів трапецевидної фасонки на тримкість зварної ферми.

В таблиці 3.8 подано залежність тримкості досліджуваної ферми від площі фасонки, яка формує різне розташування розкосів відносно бокових зразків фасонки.

Таблиця 3.8

Вплив площі трапецевидної фасонки на тримкість зварної ферми

| | | | | | |
|-------------------------------|---|---|--|---|---|
| Конструкція вузла |  |  |  |  |  |
| Площа фасонки, м ² | 0,30375 | 0,29915 | 0,2579 | 0,2129 | 0,1754 |
| P_{max} , кН | 300 | 285 | 270 | 255 | 180 |
| Точка на графіку | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |

За отриманими результатами досліджень згідно таблиці 3.8 побудовано графічну візуалізацію тримкості ферми від площі фасонки (рис. 3.24).

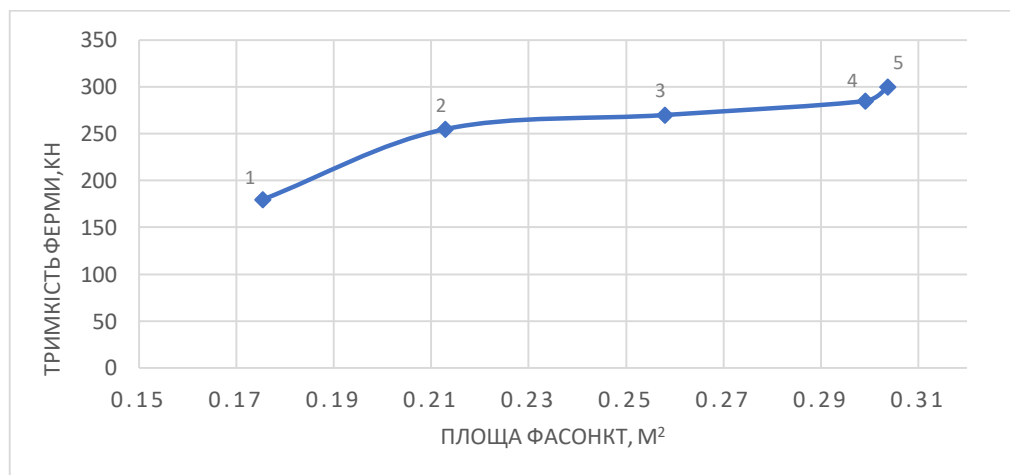


Рисунок 3.24 – Залежність тримкості ферми від площі трапецевидної фасонки

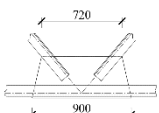
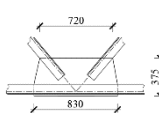
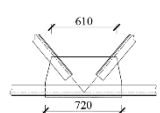
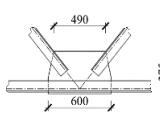
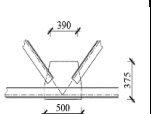
За результатами досліджень виявлено, що найменшу тримкість забезпечує фасонка типу δ , найбільшу тип a .

3.8.3 Вплив довжини фасонки на тримкість досліджуваної ферми

В таблиці 3.9 подано залежність тримкості досліджуваної ферми від довжини трапецеподібної фасонки.

Таблиця 3.9

Вплив довжини трапецеподібної фасонки на тримкість зварної ферми

| | | | | | |
|---------------------|---|---|--|---|---|
| Конструкція вузла |  |  |  |  |  |
| Довжина фасонки, мм | 900 | 830 | 720 | 600 | 500 |
| P_{max} , кН | 300 | 285 | 270 | 255 | 180 |
| Точка на графіку | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |

За отриманими результатами досліджень згідно таблиці 3.9 побудовано графічну візуалізацію тримкості ферми від довжини фасонки (рис. 3.25).



Рисунок 3.25 – Залежність тримкості ферми від довжини трапецеподібної фасонки

За результатами досліджень виявлено, що найменшу тримкість забезпечує фасонка типу δ , найбільшу тип a . Збільшення довжини фасонки понад 900 мм не змінює тримкості ферми.

3.9 Висновки за розділом 3

1. Реалізовано методику комп'ютерного моделюючого експерименту в середовищі SolidWorks для дослідження параметрів НДС в елементах прямокутної підкрювняної зварної ферми з різною формою і розмірами фасонки.

2. За результатами моделювання отримано чисельну і візуалізовану інформацію про параметри НДС у фермі при дії зовнішніх статичних навантажень.

3. При дослідженні фасонки прямокутної форми довжиною від 500 до 800 мм виявлено, що тримкість ферми не знаходиться у прямій залежності від розмірів фасонки і довжини зварних швів. Найвищу тримкість виявлено у ферми з фасонками довжиною 600 мм.

4. При дослідженні фасонки трапецеподібної форми довжиною від 500 до 900 мм виявлено, що тримкість зварної ферми знаходиться в прямій залежності від довжини фасонки в певному діапазоні значень. Так максимальну тримкість отримано для ферми з довжиною фасонки 900 мм. Подальше збільшення довжини фасонки до 1000 і 1100 мм не зумовило зміни тримкості ферми.

5. Отримані в роботі результати доцільно використати для подальших наукових досліджень та в інженерній практиці при проектуванні зварних ферм.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Техніка безпеки при реконструкції та демонтажу металевих конструкцій

Одним з найважливіших завдань охорони праці при будівельно-монтажних роботах є забезпечення належної організаційно-технічної підготовки до будівництва в цілому і до монтажних робіт зокрема. Ця підготовка проводиться протягом двох стадій: на стадії організаційної підготовки розробляється проект організації будівництва (ПОБ), а на технічній стадії - проект проведення робіт (ППР).

Особливості охорони праці в умовах виготовлення металевих конструкцій є необхідність організації заходів у двох напрямках: захисту робітників та інженерно-технічних працівників, будівельно-монтажних організацій від небезпек, пов'язаних з діючим виробництвом, а також захисту робітників та інженерно-технічних працівників діючого виробництва від небезпек та шкідливостей. Відповідальність за підготовку та виконання заходів, які створюють безпечні умови праці всіх робітників цеху, однаково несуть керівники будівельно-монтажних організацій та діючого підприємства.

Часто при реконструкції в умовах діючого цеху кроквяні та підкроквяні ферми не повністю замінюють, а ремонтують або підсилюють. При цьому роботи можуть виконуватися із застосуванням майданчиків-опор (у безкранових прольотах) і електромостових кранів (рис. 4.1).

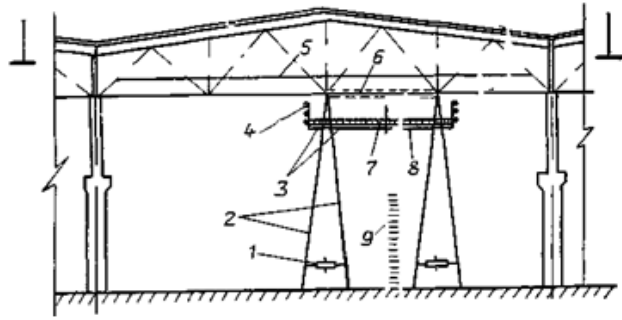


Рисунок 4.1 Встановлення майданчика-опори під час зміцнення та ремонту кроквяних ферм: 1 - фаркопфний пристрій; 2 - стояки опор; 3 - поперечки з про-катного профілю; 4 – загородження; 5 - страхувальний трос; 6 - елемент, який ремонтується; 7 - настил з дощок; 8 – прогоны; 9 - драбина з дугами;

Прогресивним рішенням, яке значно спрощує технологічний процес і зменшує рівень виробничої небезпеки, є застосування телескопічних вишок ВТК-7, ВКС-7 та ТКП-6. Вишка ВТК-7 (рис.4.2) призначена для встановлення на мостових кранах вантажопідйомністю 5—15 т. Для безпечного проведення робіт вишка обладнана кінцевим вимикачем, який вимикає механізм пересування візка крана при підніманні майданчика на потрібну висоту, а також коли майданчик опускається в початкове положення.

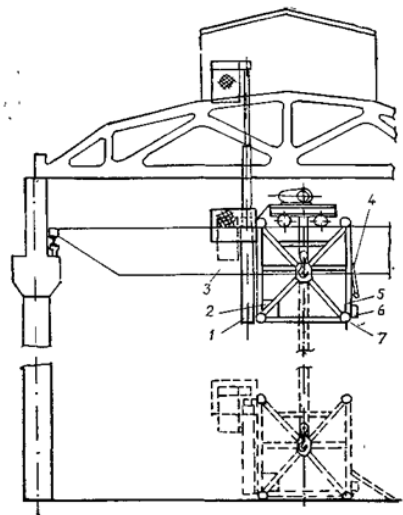


Рисунок 4.2 Використання вишки для проведення будівельно-монтажних робіт у міжфермному просторі: 1 - телескопічний підйомник; 2 - гідростанція; 3 - мостовий кран; 4 – дишель; 5 - рама;

4.2 Небезпеки і шкідливості, які супроводжують зварювання та різання металів

Зараз на заводах металоконструкцій поширені такі види зварювання: автоматичне дугове під флюсом в захисних газах, механізоване, контактне автоматичне з примусовим формуванням шва, плазмове, а також механізоване в захисних та інертних газах.

До найшкідливіших газів, що виділяються під час зварювання та різання, належать: оксиди азоту, які викликають захворювання легенів та організму, органів кровообігу; оксид вуглецю, який при концентрації більше 1 % призводить до подразнення дихальних шляхів, втрати свідомості і ураження нервової системи; озон, що при деяких концентраціях подразнює очі, викликає біль у грудях та ін.

Крім аерозолів та газів, під час зварювання металів виділяються (виникають): промениста енергія, що вражає весь організм; ультрафіолетова та інфрачервона радіація, які спричиняють опіки відкритих частин тіла; шум, що шкідливо впливає на слухові органи. Ультрафіолетове випромінювання може викликати захворювання очей електроофтальмію. Її ознаки, що виявляються через кілька годин після ураження, різь в очах, сльози, спазми повік, почервоніння слизової оболонки. Захворювання триває від одної до кількох діб.



Рисунок 4.3 - Засоби індивідуального захисту газо зварювальника: 1- спецодяг; 2-рукавиці; 3 –респіратор; 4 –захисні окуляри; 5 –маска.

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях при виникненні пожеж і вибухів

Виникнення пожеж і вибухів зумовлене багатьма причинами, серед яких можна виділити дві основні групи — причини, пов'язані з електрикою і не пов'язані з нею. До перших відносять: короткі замикання, перевантаження в мережі, великі перехідні опори, несправність електрообладнання, появу іскр та наявність електричної дуги, статичну електрику, розряди атмосферної електрики.

До причин, не пов'язаних з електрикою, можна віднести: неправильні будову та експлуатацію опалювальних систем (котельні, печей тощо); несправності обладнання та порушення технологічних процесів (порушення герметизації обладнання, яке виділяє пожежо або вибухонебезпечні пил, газу); необережне поводження з відкритим полум'ям при виконанні операцій зварювання, при ковальських та клепальних роботах, газовому різанні; неправильну будову та несправності систем вентиляції; самозаймання різних речовин.



Рисунок 4.4 – Руйнування ферм при виникненні пожеж, вибухів

Виникненню перелічених причин багато в чому сприяє незадовільний нагляд відповідальних осіб (в тому числі інженерно-технічних працівників) за експлуатацією пожежонебезпечного виробничого обладнання та пристроїв. Недогляд найчастіше призводить до пожеж на ділянках, де ведуться електрозварювальні та газозварювальні, а також фарбувальні роботи.

Сучасні нормативні документи з охорони праці, що обумовлюють застосування пожежо та вибухонебезпечних (особливо нових) матеріалів, дають змогу забезпечити подальше підвищення ефективності роботи служби охорони праці в усіх підрозділах заводів металокопункцій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВОКИ

1. За результатами літератуного огляду виявлено, що локалізація максимальних напружень формується у вузлах зварних ферм саме ці напруження і визначають тримкість зварних ферм.

2. Змінити діючі напруження у вузлах зварних ферм можна за рахунок конструктивних особливостей фасонках.

3. Розглянуто фасонки з різними конфігураціями обрисів. Комп'ютерним моделюючим експериментом в пакеті SolidWorks виявлений розподіл напружень для кожної з конфігурацій.

4. Дано рекомендації щодо практичного застосування отриманих в роботі результатів при проектуванні зварних ферм.

БІБЛІОГРАФІЯ:

1. Металеві конструкції: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / [Нілов О. О., Пермяков В. О., Шимановський О. В. та ін.]. – К.: Вид-во “Сталь”, 2010. – 869 с.
2. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування, : К., Мінрегіон України, – 2014, 128 с.
3. Ковальчук Я. О. Особливості статистичного дослідження зварних навантажених ферм / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя. – 2009. – №1. – С. 23 – 27.
4. Шингера Н. Статистична оцінка властивостей сталі ВСтЗпс на ділянці термічного впливу від зварного шва / Н. Шингера, Я. Ковальчук // XIV наук. конф. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 27–28 жовт. 2010р. : тези доп. – Тернопіль, 2010. – С. 59.
5. Шингера Н. Фізичне моделювання для оцінки залишкового ресурсу зварних фермових конструкцій. / Н. Шингера, Я. Ковальчук // Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті : наук. конф. мех.-технолог. фак. ТНТУ ім. І. Пулюя, 16 трав. 2011р. : тези доп. – Тернопіль, 2011. – С. 10.
6. Шингера Н. Я. Моделювання пошкодження зварних будівельних ферм / Н. Я. Шингера, Я. О. Ковальчук, І. Б. Окіпний // Вісник Тернопільського нац. техн. ун-ту ім. І. Пулюя. – 2011. – Спецвип., част. 2 – С. 112–117.
7. Ковальчук Я. Статистичні особливості втомного пошкодження зварних будівельних ферм / Я. Ковальчук, Н. Шингера // XV наук. конф. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 14–15 груд. 2011р. : тези доп. – Тернопіль, 2011. – С. 127.
8. Ковальчук Я.О. Статистичне моделювання втомного пошкодження зварної ферми / Я.О. Ковальчук, Ю.І. Пиндус, Н.Я. Шингера // Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві»: – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. –2012. – №2 (13) – С. 91–94.
9. Ковальчук Я.О. Особливості напружено-деформованого стану зварної ферми з урахуванням температурних впливів / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера,

Рибачок О.І., Бойчук А.В., Бобик М.П. // Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві»: – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. –2012. – №2 (13) – С. 16–19.

10. Ковальчук Я.О. Тримка здатність будівельної підкроквяної зварної ферми при дії статичних навантажень / Я.О.Ковальчук, Н.Я. Шингера // XVI наук. конф. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 5–6 груд. 2012р. : тези доп. – Т. II, Тернопіль, 2012. – С. 88.

11. Ковальчук Я.О. Характер деформування будівельної підкроквяної зварної ферми при зміні температури / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера, Рибачок О.І., Бойчук А.В., Бобик М.П. // XVI наук. конф. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 5–6 груд. 2012р. : тези доп. – Т. II, Тернопіль, 2012. – С. 89.

12. Ковальчук Я.О. Деформування зварної будівельної ферми при дії теплових впливів / Я.О. Ковальчук, М.П.Бобик, О.І.Рибачок, А.В.Бойчук // II наук.-техн. конф. мех.-техн. ф-ту Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 24–25 квіт. 2013р. : тези доп. – , Тернопіль, 2013. – С. 12.

13. Ковальчук Я. О. Деформування зварної будівельної ферми при статичних навантаженнях / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера, О.І.Рибачок // Вісник ТНТУ ім. Івана Пулюя. – 2014. – №1. – С. 28 – 34.

14. Ясній П. В. Верифікація результатів моделювання напружено-деформованого стану зварної ферми / Ясній П. В., Ковальчук Я. О., Шингера Н. Я., Рибачок О. І. // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій [Текст]: Зб. наук. статей / За заг. ред. Лучка Й.Й. – Львів: Каменяр, 2014. – Вип. 10. – С. 461 – 471.

15. Ковальчук Я. О. Моделювання напружено-деформованого стану нижнього пояса будівельної зварної ферми / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера, О.І.Рибачок // Вісник ТНТУ ім. Івана Пулюя. – 2014. № 2– С. 34 – 39.

16. Ковальчук Я.О. Особливості втомного пошкодження вузлів зварної ферми / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера, О.І. Качка // Міжнародна науково-технічна конференція «Інноваційні технології в будівництві» – ВНТУ, 18-20 листоп. 2014 р.: тези доп. – , Вінниця, 2014, с. 37.

17. Ковальчук Я.О. Моделювання втомної пошкоджуваності вузлів підкровоквних ферм / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера, О.І. Качка // XVIII наук. конф. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 29–30 жовт. 2014р. : тези доп. – Тернопіль, 2014. – С. 87.

18. Ковальчук Я.О. Вплив конструктивних та технологічних особливостей вузлів на тримкість зварної ферми / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера, О.І.Качка // Міжнар. наук.-техн. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», ТНТУ, 19–20 трав. 2015 р.: тези доп. – Тернопіль, 2015. – С. 48 — (Нові матеріали, міцність і довговічність елементів конструкцій).

19. Ковальчук Я. О. Моделювання напружено-деформівного стану кроввяної ферми / Я. Ковальчук, Н. Шингера, О. Качка // Збірник тез доповідей III наукової конференції „Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті“, 21 травня 2015 року — Т. : ТНТУ, 2015 — С. 10. — (Секція: Матеріалознавство, міцність конструкцій та будівництво).

20. Ковальчук Я.О. Втомна пошкоджуваність вузлів зварних фермових мостів / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера, О.І. Качка // Міжнар. наук.-практ. конф. ім. д.т.н. Сокола Е.М. «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд», 9–11 верес. 2015 р.: тези. доп. – Львів, 2015. – С. 66.

21. Ковальчук Я.О. Моделювання НДС зварної кроввяної ферми при експлуатаційних навантаженнях / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера, О.І. Качка // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування: матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф., 21–24 верес. 2015 р. – Тернопіль, 2015. – С. 244–247

22. Ковальчук Я. О. Моделювання поведінки зварної кроввяної ферми при розподілених навантаженнях / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера, О.І.Качка // Вісник ТНТУ ім. Івана Пулюя. – 2015. № 3(79)– С. 46 – 51 — (Механіка та матеріалознавство).

23. Ковальчук Я. О. Фізичне моделювання втомного пошкодження зварної ферми / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера // Матеріали XIX наукової конференції

ТНТУ ім. Ів. Пулюя, 18-19 травня 2016 року – Т. : ТНТУ, 2016 – С. 143. – (Матеріалознавство, міцність матеріалів і конструкцій, будівництво).

24. Kovalchuk Y. O. Computer modeling of the stresses in welded truss / Yaroslav Kovalchuk, Natalya Shynhera // Вісник ТНТУ, – Т. : ТНТУ, 2016 – Том 82. – № 2. – С. 44-48. – (Механіка та матеріалознавство).

25. Ковальчук Я. О. Комп'ютерне моделювання деформації зварної ферми з косинками у вузлах / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера // Вісник ТНТУ, – Т. : ТНТУ, 2016 – Том 83. – № 3. – С. 73-78. – (Механіка та матеріалознавство).

26. Ковальчук Я.О. Вплив циклічних навантажень на пошкодження вузлів зварної ферми / Я.О Ковальчук, Н.Я. Шингера // Всеукр. наук.-практ. конф. «Обладнання і технології сучасного машинобудування», 11–12 трав. 2017 р.: тези доп. – Тернопіль, 2017. – С. 90.

27. Ковальчук Я.О. Вплив експлуатаційних пошкоджень у вузлах зварних ферм на їх тримкість / Я.О Ковальчук, Н.Я. Шингера, В.В.Лазар // XX наук.-техн. конф. ТНТУ, 17–18 трав. 2017 р.: тези доп. – Тернопіль, 2017. – С. 146 — (Матеріалознавство, міцність матеріалів і конструкцій, будівництво).

28. Ковальчук Я.О. Конструювання вузлів зварних ферм з використанням ПК ANSYS / Я. О.Ковальчук, Н.Я. Шингера, М.А.Басара //Вісник ТНТУ ім. Івана Пулюя. – 2017. № 1(85) – С. 47 –52.

29. Kovalchuk Y. The influence of height of angular profile of rods on rectangular welded truss deformation / Yaroslav Kovalchuk, Natalya Shynhera // Scientific Journal of TNTU. – Tern. : TNTU, 2017. – Vol 88. – No 4. – P. 82–87. – (Mechanics and materials science).

30. Ковальчук Я. О. Моделювання пошкоджень зварної ферми при циклічних навантаженнях / Я. Ковальчук, Н. Шингера // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті), 22-24 травня 2018. – Т. : ТНТУ, 2018. – С. 53. – (Нові матеріали, міцність і довговічність елементів конструкцій).

31. Кіндрат Ю. І. Тримкість зварних підкрюквяних ферм із трубчастих елементів / Ю. І. Кіндрат, Я. О. Ковальчук // Збірник тез доповідей VIII Міжнародної

науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 28-29 листопада 2018 року. — Т. : ТНТУ, 2018. — Том 1. — С. 31–32.

32. Kovalchuk Y. Stress-strain state of a bottom chord of a welded roof truss / Yaroslav Kovalchuk, Natalya Shynhera, Natalya Chornomaz // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2019. — Vol 93. — No 1. — P. 41–46. — (Mechanics and materials science).

33. Басара М. А. Довговічність к-подібних вузлів зварних ферм / М. А. Басара, Я. О. Ковальчук // Праці VI Міжнародної науково-технічної конференції „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування“, 24-27 вересня 2019 р. — Т. : ТНТУ, 2019. — С. 143–144. — (Оцінювання залишкового ресурсу елементів конструкцій).

34. Ковальчук Я. О. Моделювання напружень в елементах зварної ферми при нагріванні / Я. Ковальчук, Н. Шингера // Матеріали XXI наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 16-17 травня 2019 року. — Т. : ТНТУ, 2019. — С. 107. — (Матеріалознавство, міцність матеріалів і конструкцій, будівництво).

35. Шингера Н.Я. Статистична модель для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми при циклічних навантаженнях : дис. канд. техн. наук : 01.05.02 / Н. Я. Шингера; Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. - Т., 2012. - 157 с. - укр.

36. Пат. №40196 Україна, МПК G01N 3/00. Пристрій для базування зварних ферм при випробуваннях на статичну та циклічну міцність / Шингера Н. Я., Ковальчук Я. О.; заявник і патентовласник Тернопіль. держ. техніч. ун-т. — №40196 ; заявл.13.11.08 ; опубл. 25.03.2009, Бюл. №6.

37. Пат. №86798 Україна, МПК G01N 25/16. Пристосування для визначення температурних деформацій плоских ферм / Ковальчук Я.О., Шингера Н.Я., Бойчук А.В., Рибачок Н.І., Бобик М.П.); заявник і патентовласник Тернопіль. нац. техніч. ун-т. — №86798 ; заявл.15.07.2014 ; опубл. 10.01.2014, Бюл. №1.

38. Пат. №124552 Україна, МПК E04C 3/2(2006.01), E04C 1/22(2006.01) . К-подібний вузол зварної ферми / Ковальчук Я.О., Басара М.А., Шингера Н.Я. ;

заявник і патентовласник Тернопіль. нац. техніч. ун-т. – № у 2017 11594 ; заявл.27.11.2017 ; опубл. 10.04.2018, Бюл. №7.

39. Пат. №131723 Україна, МПК (2018.01) E04B 1/24(2006.01), F16S 3/00, E04C 3/02(2006.01) . К-подібний вузол зварної ферми / Ковальчук Я.О., Басара М.А., Шингера Н.Я. ; заявник і патентовласник Тернопіль. нац. техніч. ун-т. – № у 2018 08345; заявл.30.07.2018 ; опубл. 25.01.2019, Бюл. №2.

40. Пічугін С.Ф. Визначення напружено-деформованого стану вузла сталеві рамної конструкції / С.Ф. Пічугін, О.О. Корх // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. науч. тр.— Одесса, 2006.— Ч.1.— С. 147–152.

41. Урахування дійсної роботи при оцінюванні надійності жорстких вузлів рамних каркасів / С.Ф. Пічугін, О.О. Корх, П.О. Хоружий, В.П. Чичулін // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво).— ПолтНТУ, 2005.— Вип.17.— С. 133–137.

42. Корх О.О. Використання методу граничних інтегральних рівнянь для знаходження напружено-деформованого стану вузла сталеві конструкції / О.О. Корх // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр.— Рівне, 2005.— Вип.12.— С. 175–180.

43. Розрахунок вузлів плоских решітчастих конструкцій з використанням круглих труб і гнutoзварених замкнутих профілів на міцність і витривалість за сучасними нормами / Є.В. Горохов, С.В. Колесніченко, А.М. Миронов, С.С. Аноприєнко. // Металеві конструкції. – Том 3. - №1. - 2000. – С. 67-77.

44. Колесніченко С.В., Миронов А.Н. Влияние геометрических параметров на напряженно–деформированное состояние и концентрацию напряжений Т–образных узлов с поясом из широкополочного двутавра и решеткой из гнutoсварных замкнутих профілей // Металеві конструкції. – Том 4. - №1. - 2001. – С. 55-59.

45. Колесніченко С.В., Миронов А.Н. Напряженно–деформированное состояние сварных бесфасоночных узлов с использованием широкополочных двутавров и гнutoсварных замкнутих профілей // Вісник ДонДАБА. – Вип. 2003 – 2(39) - Том 1. - С. 107-115.

46. Колесниченко С.В., Миронов А.Н. Определение теоретического коэффициента концентрации напряжений в сварных бесфасоночных узлах плоских стержневых конструкций с использованием широкополочных двутавров и гнутосварных замкнутых профилей // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – № 10-11, 2003 (70-71) - С. 62-69

47. Розрахунок вузлів пласких решітчастих конструкцій з використанням круглих труб і гнутозварених замкнутих профілів на міцність і витривалість за сучасними нормами / Є.В. Горохов, С.В. Колесніченко, А.М. Миронов, С.С. Аноприєнко. // Металеві конструкції. – Том 3. - №1. - 2008. – С. 67-77.

48. Колесниченко С.В., Миронов А.Н. Влияние геометрических параметров на напряженно-деформированное состояние и концентрацию напряжений V-образных узлов с поясом из широкополочного двутавра и решеткой из гнутосварных замкнутых профилей // Сборник научных трудов “Строительство. Материаловедение. Машиностроение”. Приднепровская ГАСА. – Вып. 18. - Днепропетровск. – 2002. – С. 90-99.

49. Миронов А.Н. Методологические основы для проведения экспериментальных испытаний на выносливость узлов решетчатых конструкций с применением ГСП и ШПД // Вісник ДонДАБА. – Вип. 2002 – 2(33). “Будівельні конструкції, будівлі та споруди”. – С. 92-96

50. Зинькова В.А. Методика экспериментальных исследований узловых соединений трубчатых элементов фермы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2012. - № 1. - С. 50-52.

51. Bruno, R. J. Identification of Nonlinear Joints in a Truss Structure [Текст] / R. J. Bruno // Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) / American Society of Mechanical Engineers (ASME) Adaptive Structures Forum, Hilton Head, SC. – Washington, 1994. – P. 402–410.

52. Khdeir A. A. Thermal effects on the response of crossply laminated shallow shells. Int. J. Solids and Struct. –1992. – 29, No5. – P. 653-667.

53. Lin T.J, Huang C.W, and Yang, Y.B . ”Inelastic Thermal Analysis of Preloaded Steel Trusses Undergoing Heating and Cooling Stages.” J. Eng. Mech. – 2012. – 138(5). – P468–477.

54. Chen L.-W. ,Chen L.-Y. .Thermal deformation and stress analysis of composite laminated plates by finite element method. .Comput. and Struct. – 1990. – 35, No 1. – p.41.

55. Rand O., Givoli D. «Thermal anakysis of space trusses including three-dimensional», International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, Vol. 2 Iss: 2. – P.115 – 125.

56. ДБН В-2.6-163:2010 Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу : – К.: Укрархбудінформ, 2009. – 206 с.

57. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд , будівельних конструкцій та основ: – К.: Укрархбудінформ, 2009. – 37 с.

58. Дрокин А.В. Оптимизация строительных конструкций, подверженных силовым и термическим воздействиям : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спеціальність ВАК 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / А.В. Дрокин, - Белгород, 2003. – 20 с.

59. Алпатов В.Ю. Оптимальное проектирование металлических структур: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спеціальність ВАК 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / А.В. Дрокин, - Самара, 2002. – 23 с.

60. Алдушкин Р.В. Развитие и совершенствование рациональных методов усиления и регулирования усилий в металлических конструкциях балочного типа и фермах : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спеціальність ВАК 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / Р.В. Алдушкин, - Орел, 2008. – 20 с.

61. Дубенець В.Г., Савченко О.В. Практиккум з обчислювальної механіки / В.Г. Дубенець, О.В. Савченко // Розрахунок і проектування конструкцій ферм на АРМ WinTruss. 2006. – 122 с.