

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: Дослідження впливу параметрів зварного шва на
тріщиностійкість вузлів зварних ферм при дії циклічних навантажень

Виконав: студент 6 курсу, групи МБ_{нм}-61
спеціальності 192

Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Ворончак В. І.
(прізвище та ініціали)

Керівник _____
(підпис) Ковальчук Я. О.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____
(підпис) Данильченко С. М.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____
(підпис) Ковальчук Я. О.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) Лупійчук С. І.
(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2020

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

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

Кафедра Будівельної механіки
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ковальчук Я. О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

студенту Ворончак Василь Іванович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження впливу параметрів зварного шва на тріщиностійкість вузлів зварних ферм при дії циклічних навантажень

Керівник роботи Ковальчук Ярослав Олексійович, к.т.н., доцент.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «___» _____ 20__ року № _____

2. Термін подання студентом завершеної роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ; Вплив конструктивно-технологічних факторів на довговічність зварних ферм; Методичні підходи до забезпечення міцності і довговічності зварних ферм; Параметри зварних швів як визначальний чинник довговічності зварних ферм; Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуація; Загальний висновок; Бібліографія.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Візуалізація місця локалізації максимальних напружень;
Візуалізація зародження тріщини та поширення тріщини при дії циклічних навантажень;
Діаграми залежності довговічності вузла від довжини зварного шва.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	5
Розділ 1 ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗВАРНИХ ФЕРМ.....	8
1.1 Нормативні вимоги до надійності і довговічності зварних ферм.....	8
1.2 Розрахунок конструктивних елементів ферм і їх дослідження.....	10
1.3 Особливості забезпечення безаварійної експлуатації зварних ферм за умов циклічних навантажень.....	14
1.4 Напружено-деформівний стан у вузлах зварних ферм.....	16
1.5 Узагальнення результатів відомих робіт та постановка задач для власних досліджень.....	20
1.6 Висновки за розділом 1.....	21
Розділ 2 МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ЗВАРНИХ ФЕРМ.....	23
2.1 Технологічні особливості формування вузлів зварних ферм.....	23
2.2 Зварювання як визначальний чинник тримкості і довговічності ферми.....	24
2.3 Алгоритм проектування зварних ферм за класичними підходами.....	26
2.4 Методика визначення розподілу сил у вузлах зварних ферм за класичними підходами.....	28
2.5 Методика визначення довжини зварних вузлових швів.....	34
2.6 Програмні пакети для визначення параметрів зварних швів.....	36
2.7 Висновки за розділом 2.....	38
Розділ 3 ПАРАМЕТРИ ЗВАРНИХ ШВІВ ЯК ВИЗНАЧАЛЬНИЙ ЧИННИК ДОВГОВІЧНОСТІ ЗВАРНИХ ФЕРМ.....	39
3.1 Формування напружень в околі зварного шва при виготовленні і експлуатації ферм.....	39

3.2	Вибір типової зварної ферми для досліджень, схеми її базування і навантажування.....	42
3.3	Вибір сталі та матеріалів для з'єднання.....	44
3.4	Проектування ферми методом комп'ютерного моделювання.....	46
3.5	Виявлення місць локалізації пікових показників НДС і визначення їх значень.....	47
3.6	Дослідження довговічності запроєктованої конструкції при циклічних навантаженнях.....	49
3.7	Зміна довговічності ферми при зміні параметрів зварних швів.....	55
3.8	Висновок за розділом 3.....	60
	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	62
Розділ 4		
4.1	Охорона праці при монтажі крокв'яних ферм	62
4.2	Протидія руйнуванню фермових конструкцій при аварійних ситуаціях.....	63
4.2.1	Основні причини аварій будівель і споруд.....	63
4.2.2	Небезпека руйнування несучих конструкцій	64
4.2.3	Поведінка дослідження ферми при перевантаженні.....	65
4.2.4	Попередження руйнуванню досліджуваних ферм.....	66
	ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК	
	БІБЛІОГРАФІЯ	
	ДОДАТОК А	
	ДОДАТОК Б	

ВСТУП

Застосування зварних ферм у будівництві зумовлене оптимальним поєднанням їх несучої здатності та матеріаломісткості. Для забезпечення передбаченої міцності існує декілька підходів до проектування зварних ферм. Сучасні напрямки визначення конструктивних параметрів зварних ферм базуються на методиці комп'ютерного моделюючого експерименту. В процесі такого моделювання забезпечується можливість врахувати багатопараметричний вплив експлуатаційних, технологічних та аварійних чинників на функціонування зварних ферм.

Актуальність теми роботи зумовлена тим, що зварні шви в фермових конструкціях є місцем локалізації критичних напружень через неоднорідність структури основного металу, ділянки зварного шва і зони термічного впливу. Особливо це небезпечно при дії циклічних навантажень, коли зародження і поширення тріщини до критичного розміру відбуваються впродовж експлуатаційного циклу, а руйнування настає раптово. Класичні методи розрахунку не враховують жорсткість конструкції у вузлових елементах і тому не можуть виявити поведінку ферми в цих місцях. Комп'ютерний моделюючий експеримент з використанням сучасних прикладних програмних пакетів дає можливість визначити параметри напружено-деформівного стану (НДС) в елементах конструкції в нелінійній постановці, максимально наблизивши результати розрахунків до натурних показників.

Мета й задачі роботи. Метою роботи є виявлення залежності між геометричними параметрами зварного шва у вузлі ферми, де формуються найвищі параметри НДС, і довговічністю роботи конструкції при дії на неї циклічних навантажень. Для досягнення поставленої мети в роботі потрібно вирішити такі *задачі*:

- вибрати одну типову зварну ферму для дослідження;
- вказати її довжину, висоту, схему базування, схему прикладання, тип і величину навантажень;

- спроектувати зварну ферму з використанням існуючих інженерних методик;
- визначити параметри НДС в конструктивних елементах ферми і у вузлових зварних з'єднаннях;
- визначити довговічність конструкції для прийнятих навантажень;
- змінюючи параметри зварних швів для вузла ферми, де формуються найвищі параметри НДС, дослідити їх вплив на тріщиностійкість досліджуваної конструкції;
- надати рекомендації щодо практичного застосування.

Об'єктом дослідження є зварний шов у вузлі ферми, в якому впродовж експлуатації конструкції формуються пошкоджуючі чинники, що зумовлюють втрату несучої здатності ферми.

Предметом дослідження є тріщиностійкість вузлів зварних ферм, яка визначає довговічність експлуатації конструкції при дії циклічних навантажень.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети за існуючими інформаційними джерелами зроблено огляд нормативної бази та досліджень інших авторів за тематикою роботи, виконано їх аналіз, використано класичні розрахункові методики, методики натурного, напівнатурного та комп'ютерного моделюючого експерименту.

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

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше виявлено залежність довжини і катета зварного шва у вузлі зварної ферми на її тріщиностійкість при дії циклічних навантажень;
- отримала подальший розвиток методика комп'ютерного моделювання поведінки зварної ферми при дії циклічних навантажень.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані в роботі результати доцільно використовувати при проектуванні зварних ферм, які експлуатуватимуться при дії циклічних навантажень, для визначення проектної довговічності їх роботи і попередження руйнування конструкцій через поширення тріщин втомні за межі допустимих розмірів.

Отримані в роботі результати можна застосовувати для визначення залишкового ресурсу зварних ферм, які експлуатуються і в яких вже сформувалися втомні тріщини, з метою визначення залишкового ресурсу конструкції.

Результати роботи схвалено і впроваджено в ТОВ «Смарттехбуд» (м. Тернопіль), що засвідчено Актом впровадження від 14.05.2020 р.

Апробація результатів магістерської роботи. 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, В.Ворончак, «Локалізація напружень у вузлах зварної ферми».

Ключові слова: вузол зварної ферми, циклічні навантаження, тріщиностійкість, зварні шви.

РОЗДІЛ 1

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗВАРНИХ ФЕРМ

1.1 Нормативні вимоги до надійності і довговічності зварних ферм

Застосування металевих зварних ферм у будівництві зумовлено багатьма їх перевагами в порівнянні з іншими конструкціями аналогічного функціонального призначення. Ферми відносяться до тримких будівельних конструкцій і їх руйнування приводить до аварій зі значними матеріальними втратами і людськими жертвами. Аварією називають пошкодження, вихід із ладу, руйнування конструкцій, що сталося з техногенних (конструктивних, виробничих, технологічних, експлуатаційних) або природних причин [1] (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Аварії металевих фермових конструкцій

Залежно від наслідків, які можуть бути викликані відмовою конструкцій, розрізняють три категорії відповідальності конструкцій та їх елементів: А – конструкції та елементи, руйнування яких може призвести до повної непридатності до експлуатації будівлі (споруди) в цілому або значної її частини. Б – конструкції та елементи, руйнування яких може призвести до ускладнення нормальної експлуатації будівлі (споруди) або до відмови інших елементів конструкцій, які не належать до категорії А. В – конструкції, вруйнування яких не призводять до порушення функціонування інших конструкцій або їх елементів. Категорії

відповідальності визначається проектувальником і мають бути наведені у проектній документації [1].

Нормативною документацією визначено загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій, включаючи металеві зварні ферми [1].

На металеві зварні ферми, як конструктивний елемент будівлі чи споруди, впродовж нормального режиму експлуатації об'єкта діють впливи, що виникають від роботи обладнання (машин, апаратів, транспортних засобів, вантажопідйомних механізмів), вантажів, навантаження від людей, атмосферних чинників. Характер і величина таких впливів визначаються з урахуванням передбачених нормативною документацією або вимогами проекту умовами роботи устаткування або обмеженнями [1].

Поряд з умовами нормальної експлуатації повинні передбачені небезпеки, які самі по собі або у поєднанні з іншими факторами можуть призвести до порушення роботоздатності конструкцій. Ці небезпеки можуть бути наслідками:

- недосконалостей норм проектування;
- недоліків проектування, виготовлення, зведення або експлуатації, що виникають внаслідок грубих помилок персоналу, в тому числі через відсутність інформації, прорахунки та нерозуміння;
- різких змін технологічного процесу, що викликають істотні зміни технологічних навантажень і впливів;
- перевантажень, що виникають при стихійних лихах, техногенних аваріях та інших виняткових подіях [1].

Для забезпечення безаварійної експлуатації будівельних конструкцій в цілому і зварних ферм зокрема [1] вводяться поняття граничний стан, довговічність і надійність.

Граничним станом називають такий стан, за якого подальша експлуатація будівельного об'єкта недопустима, пов'язана з труднощами або недоцільна [1].

Довговічністю називають властивість конструкцій зберігати роботоздатний стан до настання граничного стану в умовах установленної системи технічного обслуговування та ремонту [1].

Надійність будівельного об'єкта – це властивість об'єкта виконувати задані функції протягом заданого проміжку часу [1].

Надійність і довговічність забезпечуються одночасним виконанням вимог, які висувуються до вибору матеріалів, конструктивних і об'ємно-планувальних рішень, до методів розрахунку, проектування та контролю якості робіт при виготовленні конструкцій та їх зведенні, а також дотриманням правил технічної експлуатації, нагляду і догляду за конструкціями [1].

1.2. Розрахунок конструктивних елементів ферм і їх дослідження

Проектування металевих зварних ферм виконують згідно до вимог нормативних документів [2, 3]. Класичні підходи до проектування викладено у [4]. Однак процес цей досить трудомісткий, а отримані результати передбачають значні запаси міцності, оскільки при розрахунку не враховується багато параметричний вплив на досліджувану конструкцію. Такі розрахунки, зазвичай, зумовлюють значні перевитрати металопродукату і не дають можливості визначити місця з максимальними напруженнями де будуть зароджуватися початкові пошкодження, поширення яких зможе привести до настання граничного стану і руйнування ферми.

У сучасних дослідженнях металевих зварних ферм натурний повномасштабний експеримент використовується досить рідко через високу матеріаломісткість дослідних зразків і енерговитрати випробувального устаткування. Однак використовують фізичний (напівнатурний) експеримент на масштабних моделях (рис. 1.2) [5, 6].

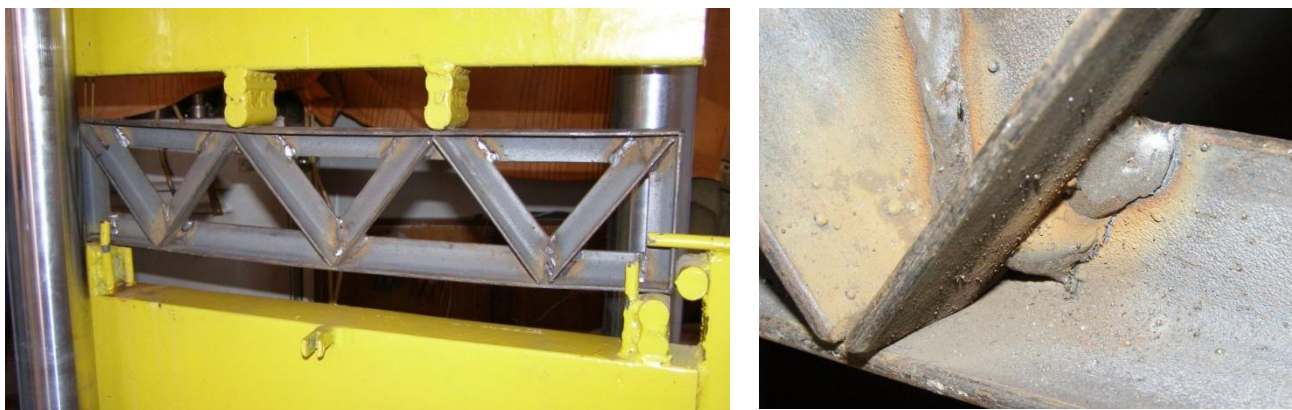


Рисунок 1.2 – Фізична модель ферми до руйнування

Таким чином можна візуалізувати як кількісні, так і якісні показники пошкодження і руйнування дослідних зразків (рис.1.3).

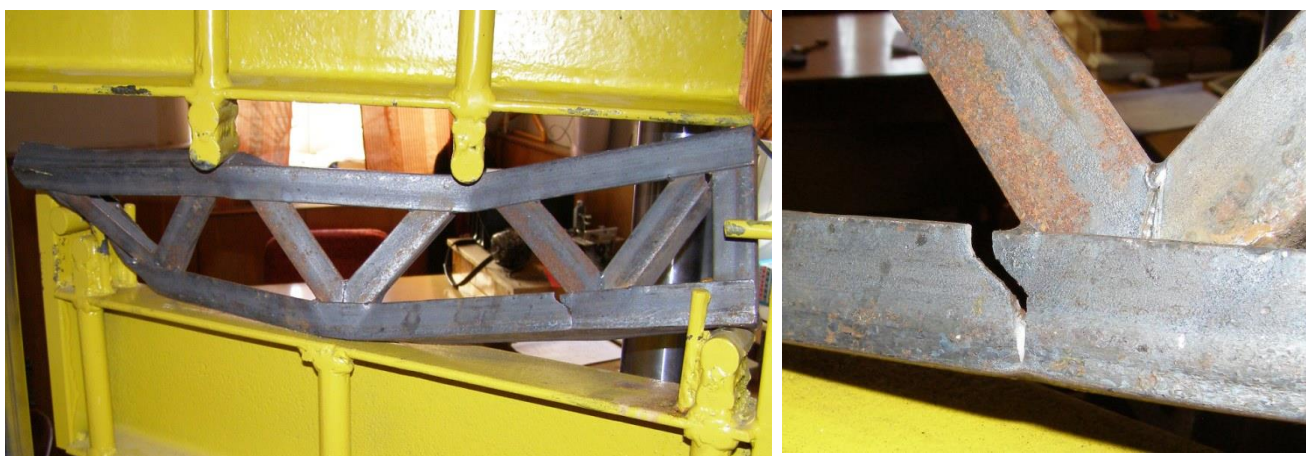


Рисунок 1.3 – Фізична модель ферми після руйнування

Однак пріоритетним напрямком проектування і дослідження металевих зварних ферм на сьогоднішній день є комп'ютерне моделювання процесів навантажування, деформування, пошкодження і руйнування конструкцій [7...16].

Прикладні програмні пакети, які використовують для комп'ютерного моделюючого експерименту, зазвичай алгоритмічно базуються на методі скінчених елементів і дають можливість деталізувати поведінку конструкції при багатопараметричному зовнішньому впливі. Продуктивність виконання обчислень досить висока. Програмні пакети дають можливість побачити результати досліджень як в статичному поданні, так і динамічному з 3D

зображенням [9] (рис. 1.4) та відео візуалізацією поведінки ферми при різноманітних зовнішніх впливах .

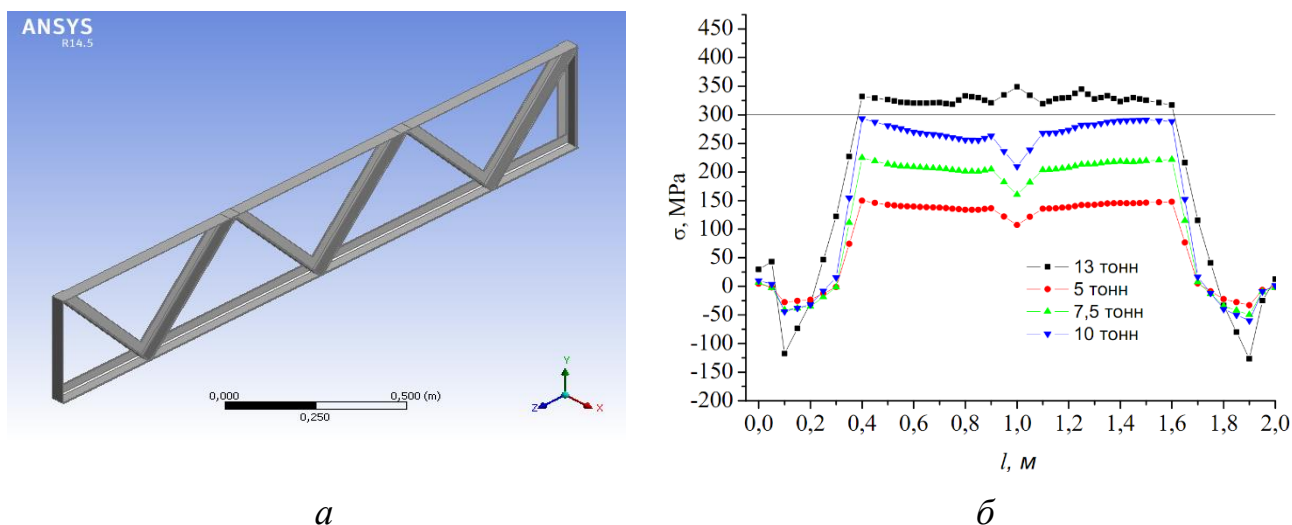


Рисунок 1.4 – CAD – геометрична модель ферми (а) та напруження вздовж нижнього пояса ферми при різних рівнях навантаження (б) [9]

Такий математичний апарат прикладного програмного забезпечення дає можливість оцінювати поведінку зварних ферм не лише при дії силових, але й температурних чинників [17...21]. Це важливо як для кліматичного діапазону температур, так і технологічних чи аварійних температурних градієнтів.

Комп'ютерне моделювання процесів деформування, пошкодження і руйнування металевих зварних ферм дає можливість відтворювати процеси не лише в лінійній постановці, але й в нелінійному діапазоні деформацій, враховувати неоднорідність властивостей основного матеріалу, матеріалу зварного шва і матеріалу в зоні термічного впливу від зварювання [22]. Це суттєво наближує результати таких досліджень до результатів натурного і напівнатурного експериментів [22] (рис.1.5). Про це свідчать результати верифікації [22, 23] (рис. 1.6).

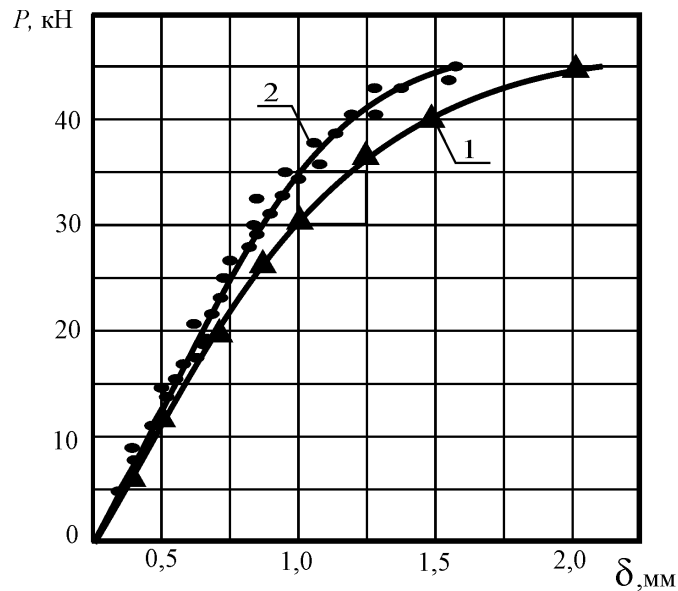


Рисунок 1.5 – Діаграма деформування фізичної моделі ферми за результатами комп'ютерного моделюючого (1) та натурального (2) експериментів [22]

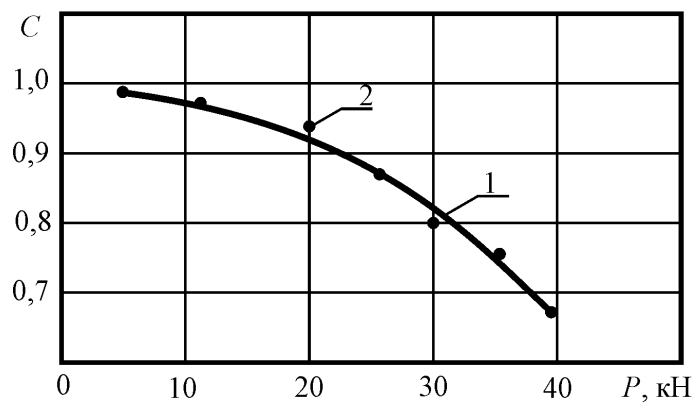


Рисунок 1.6 – Зведений графік збіжності C деформацій зварної ферми під дією статичного навантаження за результатами комп'ютерного моделюючого та натурального експериментів. 1 – розрахункові точки; 2 – лінійна апроксимація результатів [22, 23]

Прикладні програмні пакети дають можливість не лише визначити геометричні показники ферми, але й оптимізувати їх за техніко-економічними показниками на етапі інженерних розрахунків параметрів конструктивних елементів ферми.

1.3 Особливості забезпечення безаварійної експлуатації зварних ферм за умов циклічних навантажень

Складнішим є питання щодо проектних розрахунків зварних ферм, які експлуатуються за умов циклічних навантажень (рис.1.7) через складнішу природу втомного пошкодження конструктивних елементів ферм .

Втома – процес поступового накопичення пошкоджень, утворення та розвиток тріщин у матеріалі при дії циклічних навантажень. Втомне пошкодження змінює фізико-механічні властивості матеріалу об'єкта і формує появу втомної тріщини [1].

Тріщиностійкість характеризує здатність матеріалу з наявною тріщиною не руйнуватися при конкретних режимах навантажування і впродовж певного часу [1].

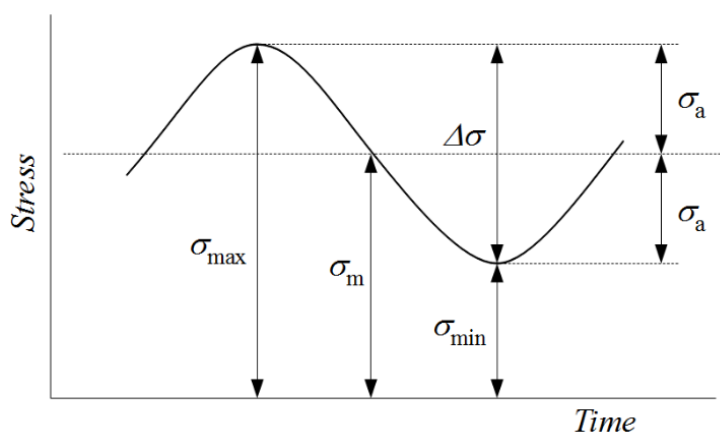


Рисунок 1.7 – Напруження при циклічних навантаженнях

σ_{\max} – максимальне напруження; σ_{\min} – мінімальні напруження; σ_m – середні напруження; σ_a – амплітуда; $\Delta\sigma$ – розмах; $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ – коефіцієнт асиметрії

Тріщина в матеріалі може виникнути в результаті втоми, бути наслідком металургійного дефекту і т.п. Тріщина є концентратором напружень (рис. 1.8) [49]. В її вершині напруження значно перевершують розрахункові. Таке перевищення тим більше, чим довшою і гострішою є тріщина. У міру віддалення від вістря тріщини напруження зменшуються.

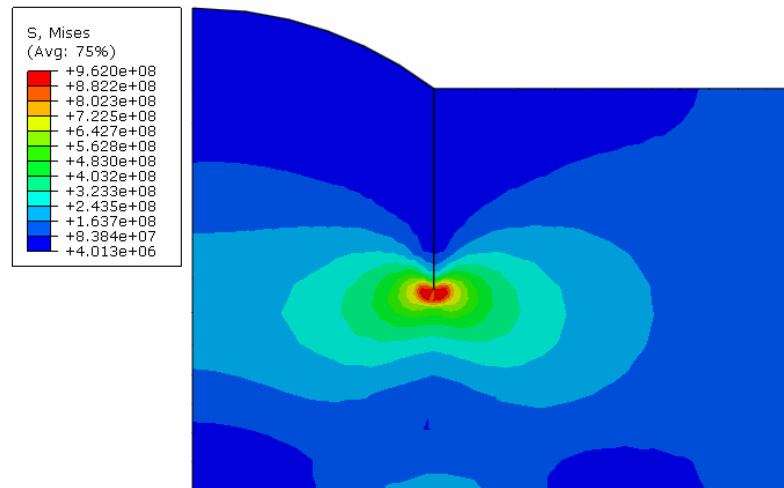


Рисунок 1.8 – Концентрація напружень у вершині тріщини [49]

Якщо напруження у вістрі тріщини такі, що викликають її поширення, то на певному етапі росту тріщини відбувається руйнування конструктивного елемента. При цьому розрахункові напруження є нижчими за межу текучості матеріалу.

За умов циклічних навантажень актуальним є питання забезпечити високий рівень безвідмовності конструкції. Безвідмовність – здатність об'єкта безперервно зберігати роботоздатний стан протягом заданого терміну експлуатації [1].

Важливим показником ферми за умови циклічних навантажень є встановлений термін експлуатації, тобто календарна тривалість експлуатації об'єкта, при досягненні якої його подальше застосування за призначенням допускається лише після спеціального підтвердження робото здатності [1].

На сьогоднішній день існує багато відомих методик розрахунку металевих зварних ферм як за класичними інженерними підходами [2], так і з використанням сучасної комп'ютерної техніки і прикладного програмного забезпечення.

При врахуванні багатопараметричного впливу конструкторських, технологічних, експлуатаційних і аварійних чинників на залишковий ресурс роботи зварних ферм в умовах циклічних навантажень високу достовірність розрахункових результатів отримують за методом статистичного моделювання (метод Монте-Карло) [22, 24...28] (рис. 1.9).

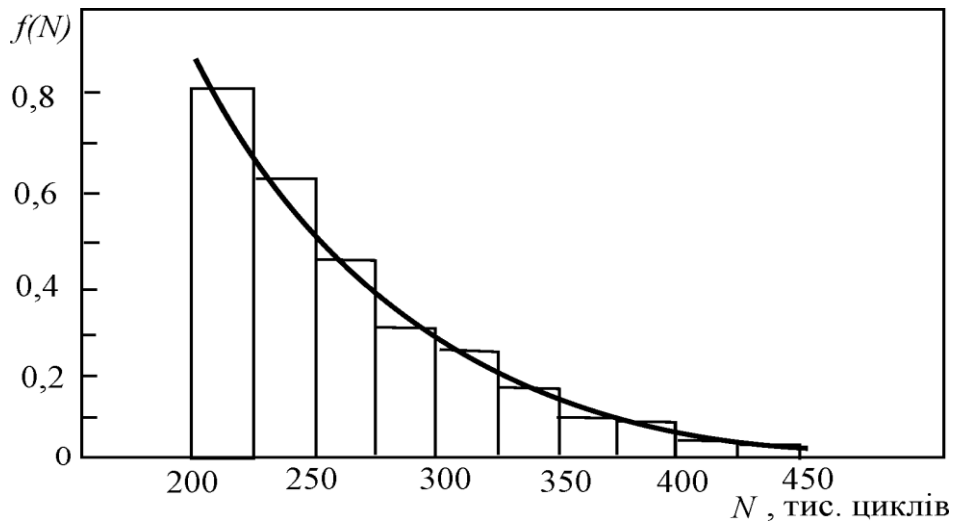


Рисунок 1.9 – Інтегральна залежність зміни залишкового ресурсу досліджуваної типової зварної ферми за результатами статистичного моделювання для умов циклічного двочастотного навантажування [22]

1.4 Напружено-деформівний стан у вузлах зварних ферм

Конструктивно металеві зварні ферми можуть бути з безпосереднім приєднанням розкосів і стояків до поясів ферми (рис. 1.10,*a*) або з використанням фасонок (рис. 1.10,*б*) [4].

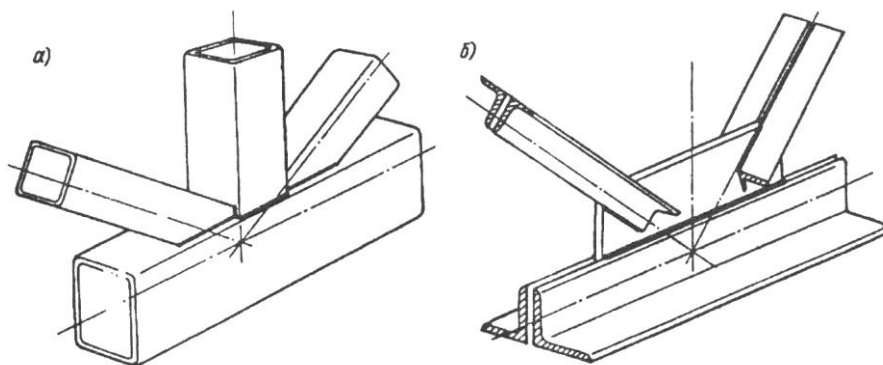


Рисунок 1.10 – Конструктивне виконання вузлів ферм з безпосереднім зварюванням елементів (*a*) і з фасонками (*б*) [4]

Зазвичай безфасонкові конструкції застосовують для ферм з тонкостінних замкнутих гнуто-зварних профілів. Фасонкові конструкції застосовують для ферм з кутників і швелерів.

Аналізуючи результати експериментальних досліджень зварних ферм, виконаних за різними методиками (натурний, напівнатурним чи комп'ютерний моделюючий експеримент), а також експертні висновки обстежених після руйнування ферм очевидним є те, що максимальні напруження формуються у вузлах. Тут зароджуються початкові пошкодження, які поширюються за умов експлуатаційних навантажень до настання граничного стану ферм. Причиною цього є складний напружений стан і багатоапараметричний вплив зовнішніх і внутрішніх чинників на процеси деформування, пошкодження і руйнування досліджуваної конструкції.

Дослідження вузлів металевих зварних ферм виконано в роботах [29...53]. В частині згаданих робіт розглянуто НДС у вузлах ферм за умов зовнішнього статичного навантаження [34...38, 40...44, 46...50]. Зазвичай визначальним показником, який визначає тримкість ферми, є параметри зварних швів на фасонках та технологічність матеріалів стержнів і фасонок до зварювання.

Задача досліджень вузлів суттєво ускладнюється при циклічних впливах на зварні фермові конструкції. Це можуть бути як температурні градієнти, так і силові чинники. Такі впливи висвітлено в роботах [22, 24...33, 39...41, 51, 53]. Загальним підходом в таких дослідженнях є виявлення фізико-механічної природи зародження і поширення втомної тріщини на межі зварного шва і зони термічного впливу в основному матеріалі. Це стосується як фасонок, так і стержнів. Високотемпературний вплив при зварюванні і металургійні процеси розплавлення, кристалізації і охолодження металу вже на етапі виготовлення ферми формують внутрішні напруження, які впливають на тримкість і довговічність ферми (рис. 1.11). Різноманітність металів, які використовують для виготовлення зварних ферм, та широкий вибір методів зварювання з одного боку дають можливість вибрати найкраще поєднання конструктивних і технологічних параметрів, а з іншого –

потребують детального дослідження впливу кожного з таких варіантів поєднання на експлуатаційні показники зварних ферм.

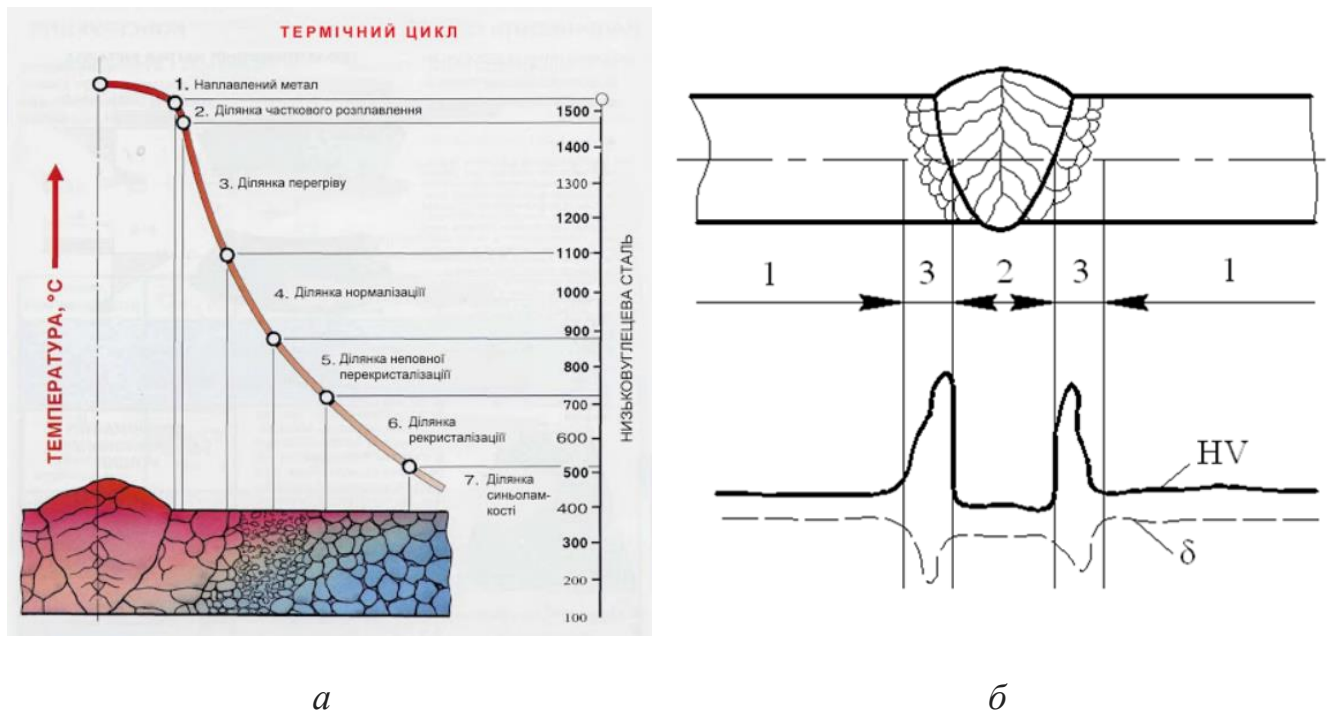


Рисунок 1.11 – Формування зони термічного впливу (ЗТВ) при зварювання (а) та зміна твердості HV і пластичності (δ - відносне видовження) в ЗТВ:

1 – основний матеріал; 2 – ЗТВ; 3 – зварний шов [4]

Внаслідок таких градієнтів властивостей на межі зварного шва і ЗТВ формується концентрація напружень (рис. 1.12), яка зумовлює зародження і поширення тріщини (рис. 1.8) [4].

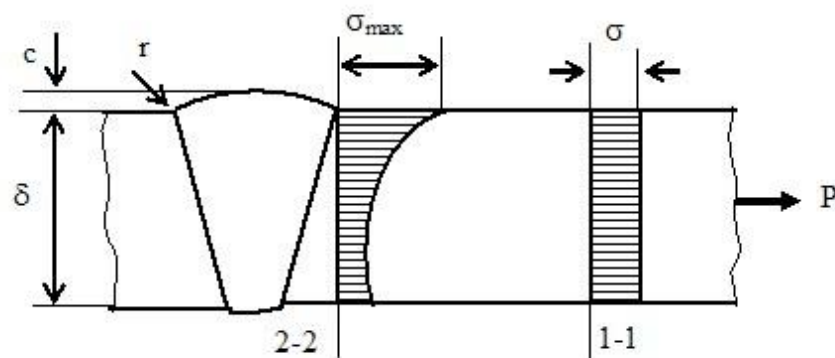


Рисунок 1.12 – Концентрація напружень на межі зварного шва і ЗТВ [4]

Рівень пікових напружень σ_{\max} залежить від багатьох чинників, що ускладнює розрахунки для отримання точних результатів поведінки зварної ферми впродовж експлуатації. Такими чинниками, які носять стохастичний характер, є технологічні недосконалості зварного шва (дефекти) (рис. 1.13) [4].

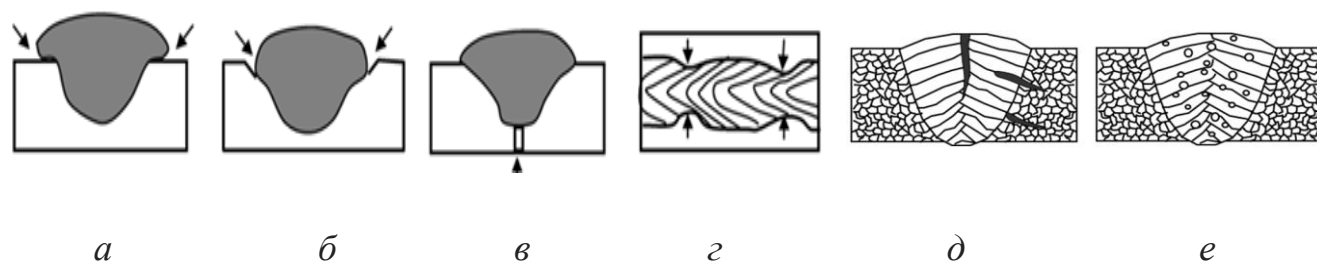


Рисунок 1.12 – Дефекти зварних швів:

a – наплив; *б* – підріз; *в* – не провар; *г* – утяжки; *д* – тріщини; *е* – пори

Для зменшення напружень у вузлах ферм запропоновано оригінальні конструкції пластин [40, 41] (рис. 1.7).

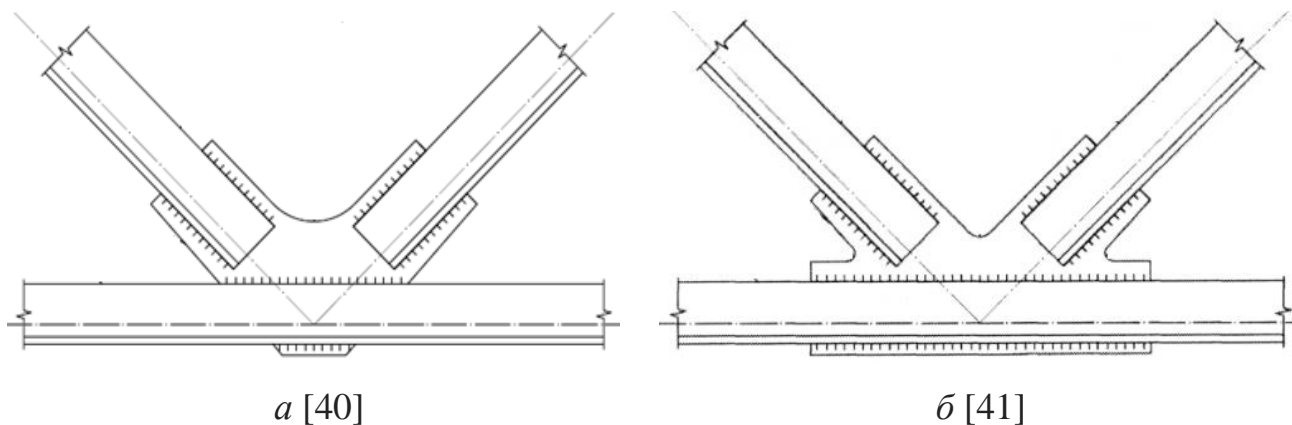


Рисунок 1.13 – Оригінальні конструкції фасонки зі зменшеною жорсткістю

Такий підхід дає можливість зменшити жорсткість фасонки, збільшивши її деформівність, і за рахунок цього зменшити напруження в зоні термічного впливу від зварного шва, де матеріал має суттєво гіршу здатність деформуватися.

Сучасні методики розрахунку і оптимізації конструктивних елементів дають можливість використати їх для проектування і дослідження вузлових елементів

ферм і отримати високі показники міцності і довговічності зварних конструкцій [49] (рис. 1.8). Визначальним питанням для дослідження при такій оптимізації є правильне визначення критеріїв оптимізації і включення їх до протоколу досліджень.

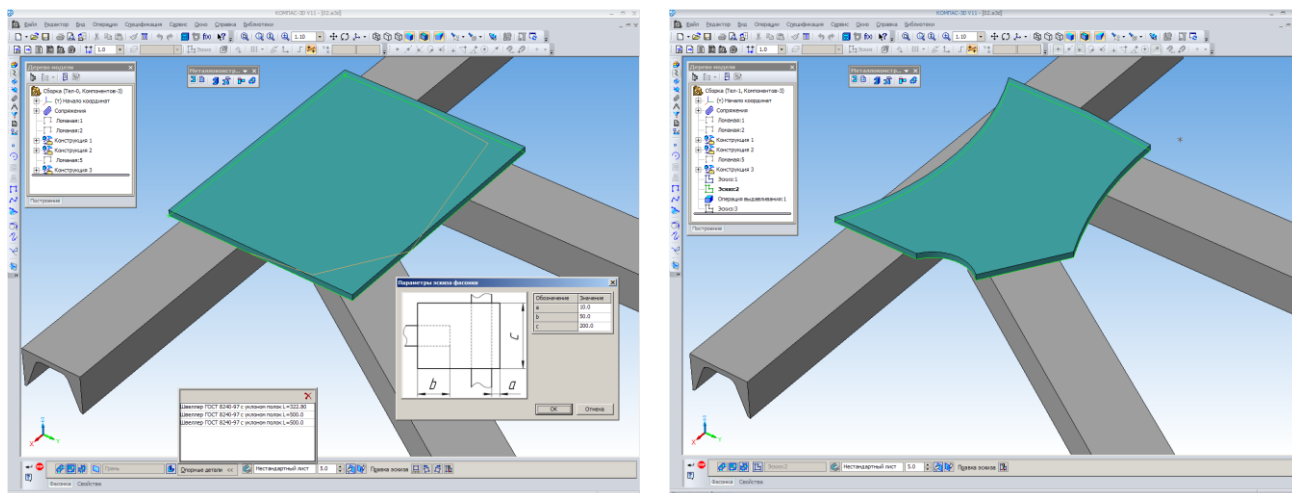


Рисунок 1.8 – Оптимізація конструкції фасонки комп'ютерним моделюючим експериментом [49]

Однак проблемним питанням залишається анізотропія властивостей основного матеріалу, матеріалу зварного шва і матеріалу в ЗТВ, які можуть змінюватися в широкому діапазоні значень за стохастичними закономірностями.

1.5 Узагальнення результатів відомих робіт та постановка задач для власних досліджень

Зварні шви в фермових конструкціях є місцем локалізації критичних напружень через неоднорідність структури основного металу, ділянки зварного шва і зони термічного впливу. Особливо це небезпечно при дії циклічних навантажень, коли зародження і поширення тріщини до критичного розміру відбуваються впродовж експлуатаційного циклу, а руйнування настає раптово. Класичні методи розрахунку не враховують жорсткість конструкції у вузлових елементах і тому не можуть виявити поведінку ферми в цих місцях. Комп'ютерний

моделюючий експеримент з використанням сучасних прикладних програмних пакетів дає можливість визначити параметри напружено-деформівного стану (НДС) в елементах конструкції в нелінійній постановці, максимально наблизивши результати розрахунків до натурних показників.

Відомі результати досліджень не достатньо розкривають комплексний вплив конструктивних, технологічних і експлуатаційних чинників на довговічність роботи металевих зварних ферм в умовах циклічних навантажень з врахуванням пошкоджень, які формуються у вузлах, зокрема вплив параметрів зварних швів на тріщиностійкість вузлів зварних ферм.

Для виявлення залежності між геометричними параметрами зварного шва у вузлі ферми, де формуються найвищі параметри НДС, і довговічністю роботи конструкції при дії на неї циклічних навантажень в роботі потрібно вирішити такі задачі:

- вибрати одну типову зварну ферму для дослідження;
- вказати її довжину, висоту, схему базування, схему прикладання, тип і величину навантажень;
- спроектувати зварну ферму з використанням існуючих інженерних методик;
- визначити параметри НДС в конструктивних елементах ферми і у вузлових зварних з'єднаннях;
- визначити довговічність конструкції для прийнятих навантажень;
- змінюючи параметри зварних швів для вузла ферми, де формуються найвищі параметри НДС, дослідити їх вплив на тріщиностійкість досліджуваної конструкції;
- виконати техніко-економічне обґрунтування отриманих результатів досліджень і надати рекомендації щодо їх практичного застосування.

1.6 Висновки за розділом 1

1. Вивчено нормативну базу щодо конструювання металевих зварних ферм і виявлено обмеження щодо прийняття проектних рішень для забезпечення надійності й довговічності ферм.

2. Розглянуто сучасні підходи до дослідження зварних ферм за принципами натурального, напівнатурного і комп'ютерного моделюючого експерименту та виявлено задовільний рівень збіжності отриманих таким чином результатів.

3. Проаналізовано причини зародження й поширення тріщини у вузлах зварних ферм при експлуатаційному впливові на них циклічних навантажень.

4. Описано вплив технологічних особливостей зварного шва на формування НДС у вузлах зварних ферм внаслідок анізотропії матеріалу в ЗТВ.

5. Виходячи з теми роботи, її мети та за результатами аналізу літературних даних сформульовано задачі для власних досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ЗВАРНИХ ФЕРМ

2.1 Технологічні особливості формування вузлів зварних ферм

Технологія отримання зварних ферм включає два етапи [4]:

1. Отримання мірних заготовок з вальцьованих профілів згідно креслень;
2. Зварювання заготовок у вузлах ферми.

Обидва ці технологічні етапи мають свої особливості, які зумовлюють в кінцевому результаті тримкість зварної ферми в цілому.

Велика кількість деталей, які входять до складу ферми, ускладнюють збиральні операції, призводять до необхідності виконання багатьох дугових швів, по-різному зорієнтованих у просторі, що вимагає кантування зібраного виробу при зварюванні. Вузли ферми зварюють покритими електродами або механізованим дуговим зварюванням у середовищі CO₂ суцільним або порошковим дротом. Зварювання ведуть у нижньому положенні від краю косинки до центра пересічення осей елементів ферми. Контроль якості складається з візуального огляду та вимірюванні геометричних розмірів швів.

Для ферм характерними зварними з'єднаннями є :

- з'єднання стержнів з фасонкою;
- з'єднання фасонки з поясами;
- стики стержнів.

Стержні у вузлах з'єднують безпосередньо або за допомогою допоміжних елементів головним чином дуговим зварюванням. Перспективним є застосування контактного зварювання.

При збиранні ферм особливу увагу приділяють правильному центруванню стержнів у вузлах, що запобігає появі моменту гнуття, не врахованих розрахунками. У випадку складових елементів їх спільна робота забезпечується встановленням прокладок.

З'єднання стержнів з фасонкою, як правило, виконується ручним дуговим зварюванням в накладку кутовими швами. Потрібну довжину зварних швів визначають, виходячи з умови міцності флангових швів на дію осевого зусилля, що дорівнює зусиллю в стержні [4].

Зварювання елементів ферм можна виконувати стиковими швами і напустковими (рис. 1.15).

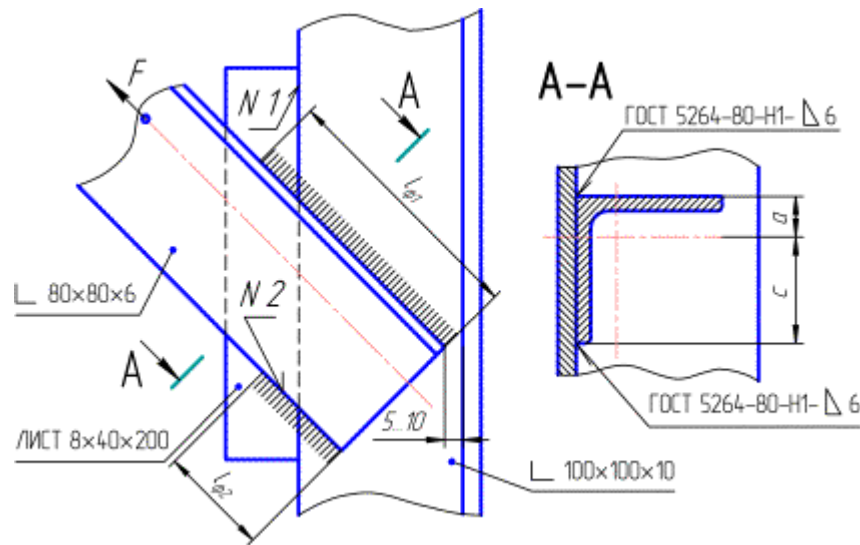


Рисунок 2.1 – Види зварних швів: стиковий – №1; внапусток – №2 [4]

Стикові з'єднання використовують для зварювання поясів ферми, приварювання фасонних листів до поясів (шов №1, рис. 2.1). Напусткові з'єднання використовують для кріплення розкосів до поясів і стійок (шов №2, рис. 2.1) [4].

2.2 Зварювання як визначальний чинник тримкості і довговічності ферми

Для забезпечення конструктивної міцності ферми необхідно сформувати зварні шви з певними геометричними параметрами за встановлених технологічних режимів. Такі підходи дають можливість отримати зварне з'єднання з найвищою продуктивністю і найвищими показниками міцності і довговічності [4]. Основні параметри зварних швів подано на рис. 2.2.

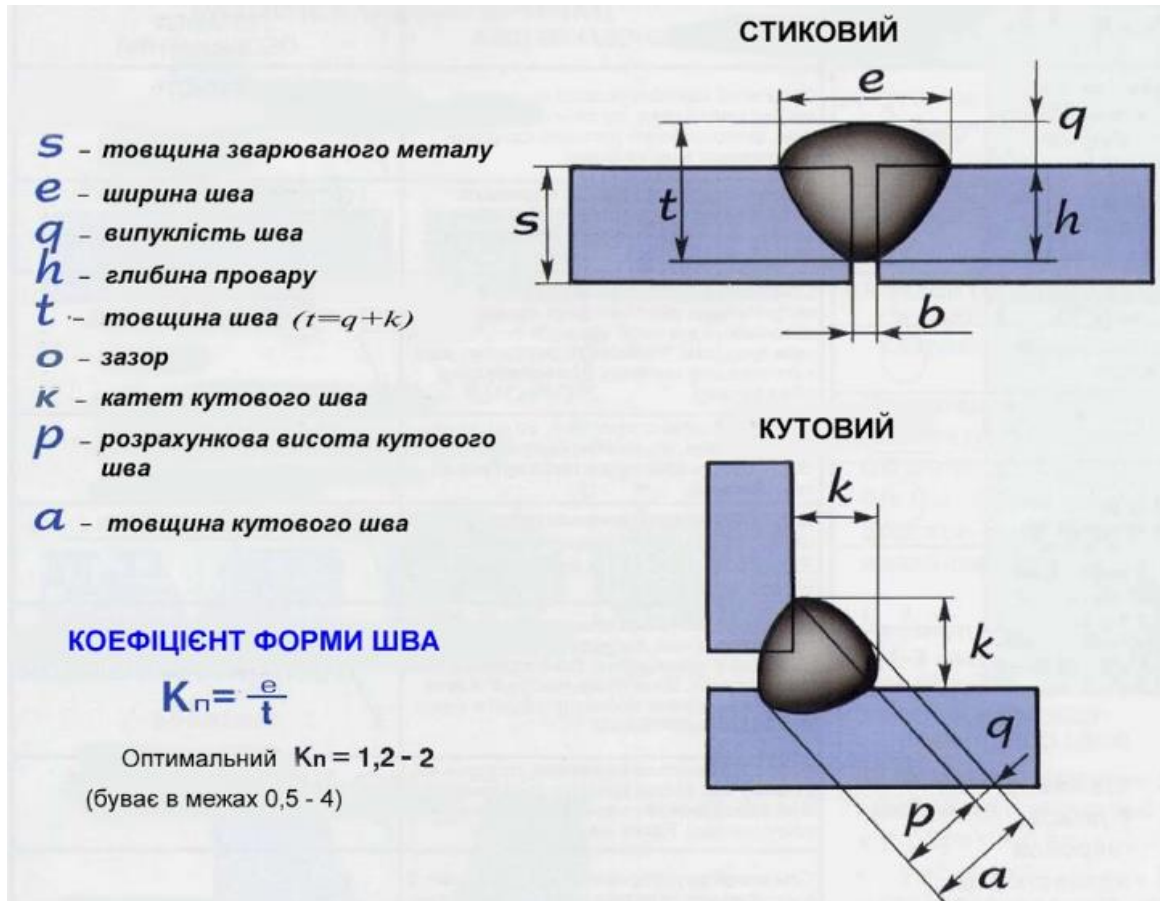


Рисунок 2.2 – Основні геометричні параметри зварного шва

Технологічну послідовність виконання зварних швів при виготовленні зварних ферм подано на рис. 2.3.

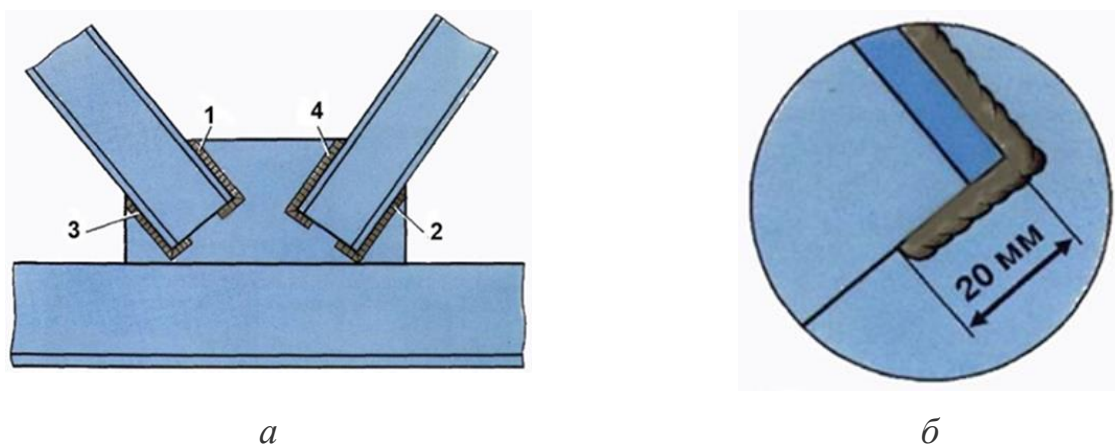


Рисунок 2.3 – Послідовність приварювання розкосів зі швелера до фасонки фланговими швами (*a*) з виведенням швів на торець (*б*) [4]

В процесі зварювання відбуваються складні хіміко-металургічні процеси, які змінюють склад металу в ділянці зварного шва і структуру металу в зоні термічного впливу. Внаслідок цього змінюються властивості металу і формується їх анізотропія. Дотримання технологічних режимів мінімізує формування дефектів зварювання, які зменшують експлуатаційні показники ферми (рис. 2.3).

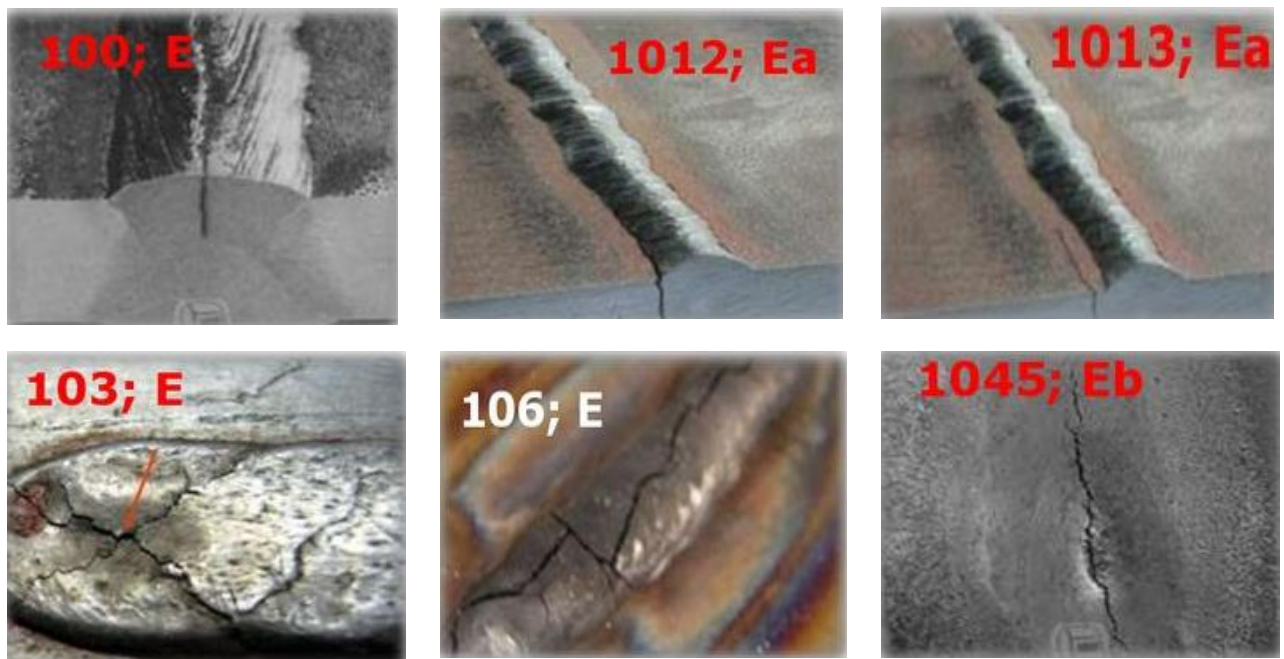


Рисунок 2.3 – Основні технологічні дефекти зварного шва [52]

Процес формування технологічних дефектів має стохастичний характер і врахувати його вплив на міцність ферми в цілому при розрахунках за класичними методиками не можливо.

2.3 Алгоритм проектування зварних ферм за класичними підходами

Вихідними даними для проектування зварних ферми є: призначення і умови експлуатації (температура, характеристика навантаження), прогін [2...4].

Проектування ферми полягає у розв'язанні таких етапів:

- призначення матеріалу;

- вибір раціональної системи ферми та визначення її генеральних розмірів;
- складання розрахункової схеми;
- визначення зусиль в елементах ферми;
- компоновання стержнів;
- конструювання вузлів;
- конструювання зварних з'єднань.

Розрахунок ферм за класичними розрахунковими методиками прийнято виконувати за недеформованою схемою, тобто вважають, що деформації окремих стержнів, а отже і переміщення всіх вузлів ферми, від дії навантаження будуть настільки малими, що зміни, які вони зумовляють в конфігурації ферми і зміщення прикладених сил, не викликають змін зусиль в стержнях. За розрахункову приймають схему, яка відповідає ненавантаженому стану ферми. Звідсе зрозуміло, що розрахунок за недеформованою схемою є наближеним.

При проектуванні ферми необхідно старатися, щоб забезпечити передачу навантажень на них лише у вузлах. Тільки за таких умов будь-який стержень буде сприймати лише осьовий розтяг або стиск.

Найпоширенішими способами визначення зусиль в стержнях за класичними методиками є [4]:

1. Спосіб вирізання вузлів;
2. Метод Ріттера (метод перерізів)
3. Графічний метод (побудова діаграми Максвелла-Кремони)

Таким чином при статичному розрахунку ферм за класичними методиками вводяться такі припущення:

- 1) вузли ферми – ідеальні шарніри (позбавлені тертя);
- 2) ферма розглядається як плоска система (осі всіх стержнів і діючі на ферму сили знаходяться в одній площині);
- 3) визначення зусиль виконують для недеформованої схеми ферми;
- 4) навантаження на ферму передаються лише у вузлах.

Однак в реальній фермі вузли не бувають шарнірними. Але вони і не є абсолютно жорсткими. Цей чинник є одним з проблемних для визначення

тримкості зварних ферм з високим ступенем вірогідності за класичними розрахунковими методиками.

2.4 Методика визначення розподілу сил у вузлах зварних ферм за класичними підходами

1. Викреслюються осі ферми, які сходяться в центрі вузла. При цьому зусилля, що сходяться у вузлі, врівноважуються без виникнення додаткових згинних моментів сил (рис. 2.4,*a*) [4].

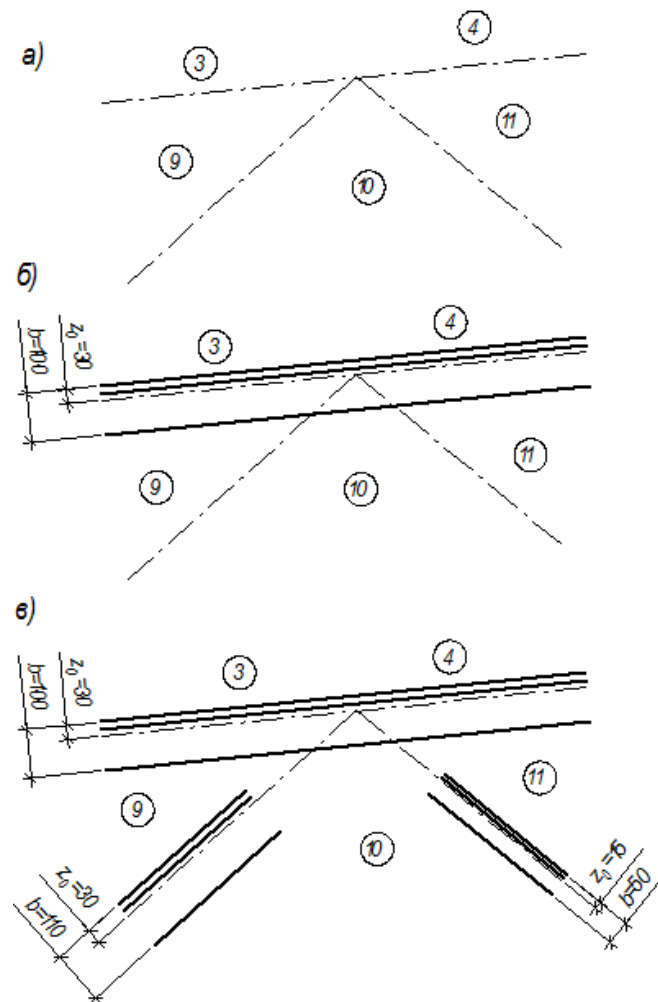


Рисунок 2.4 – Початковий етап конструювання проміжного вузла

2. На осі в прийнятому масштабі (як правило М1:10) наносять контурні лінії стержнів так, щоб осьові лінії збіглися з центром ваги перерізів. Відстані від осі

до обушків кутиків z_0 приймають за сортаментом з округленням їх до значень, кратних 5 мм. Якщо верхній або нижній пояс складаються з двох різних кутиків (тобто мають вузли стику), то їх прив'язку до осі здійснюють за середнім значенням z_0 (рис. 2.4,б,в).

3. Визначають положення торців кутиків решітки. Відстань між найближчими точками поясного кутика і кутика решітки повинна бути але не більшою 80 мм і не меншою 40 мм. Це роблять для зменшення зварювальних напружень. Таких же відстаней необхідно дотримуватися між сусідніми стержнями решітки у вузлі. На кресленні вузла на відстані a від лінії пера поясного кутика проводиться тонка лінія паралельно верхньому поясу (рис. 2.5).

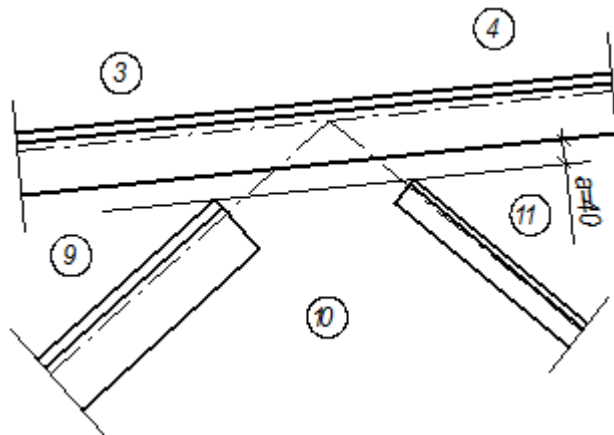


Рисунок 2.5 – Розміщення кутників решітки відносно поясного кутника у вузлі ферми

Торці кутиків стержнів решітки доводять до цієї лінії. Торці проводять, як правило, перпендикулярно до осі. Для досягнення більшої компактності вузла (тобто зменшення розмірів вузлових фасонки) в кутиках з полицями шириною більше 90 мм допускається косі зрізи торців. При цьому слід мати на увазі, що така операція в технологічному процесі збільшує трудомісткість виготовлення ферми, а отже не завжди виправдана.

4. Вибирають матеріали для зварювання (тип електроду).

5. Розраховують шви, які прикріплюють стержні решітки до фасонки, на дію розрахункових зусиль в стержнях.

Кожний з двох кутиків стержня приварюють двома фланговими швами (біля обушка та біля пера) з виносом їх на торець на довжину 20 мм.

Оскільки кутик є асиметричним профілем, то його прикріплення до фасонки повинно забезпечити співпадання рівнодіючої зусиль, що передається двома швами, з нейтральною віссю кутика. Виходячи з цього, розрахункове зусилля в стержні N розподіляється між швами біля обушка і біля пера обернено пропорційно відстаням від цих швів до осі кутика (рис. 2.6). Коефіцієнти перерозподілу зусилля відповідно на шов біля обушка і шов біля пера практично залежить тільки від типу кутика та від того, якою полицею (більшою чи меншою) він прилягає до фасонки, тому вони мають сталі значення: для рівнобоких кутиків $\alpha_c=0,7$, $\alpha_t=0,3$;

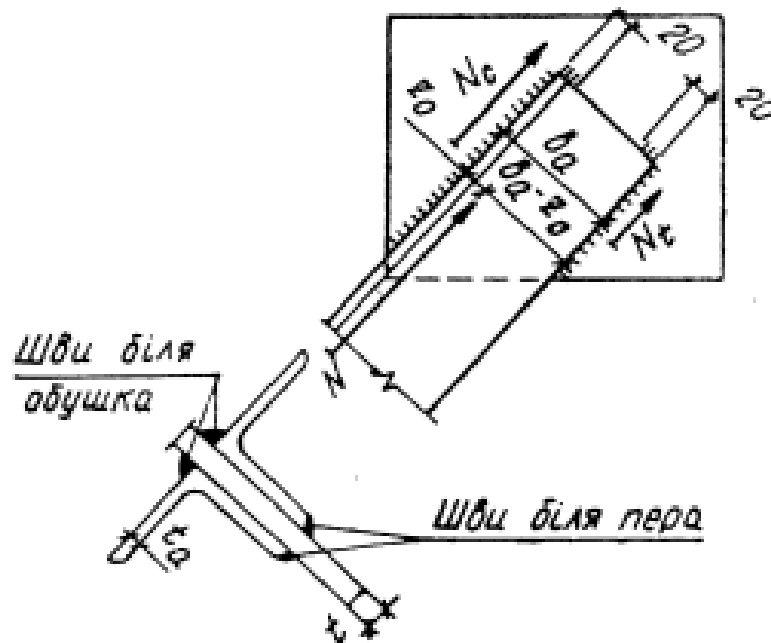


Рисунок 2.6 – Перерозподіл зусиль у швах біля обушка та біля пера [4]

Виходячи з умови міцності шва (по металу шва), визначається необхідна площа перерізу швів окремо для кожного стержня решітки, що входять у вузол: біля обушка та біля пера.

Площа перерізу, виражена через параметри шва, рівна

$$A_{wf} = b_f \cdot k_f \cdot l_w .$$

Знаючи площу та задаючись катетом шва (максимальним), визначають необхідну розрахункову довжину швів біля обушка та біля пера.

6. Виконують конструювання фасонки.

Товщину косинки рекомендується призначати за таблицею 2.1.

Таблиця 2. 1

Рекомендовані товщини косинок ферм

Зусилля в опорному розкосі (<i>тс</i>).	До 20	20-45	45-75	75-115	115-165	165-225	225-300
Товщина косинки (<i>мм</i>)	8	10	12	14	16	18	20

Розміри фасонки в плані визначаються довжинами швів, які прикріплюють стержні. Для цього від торців кутиків стержнів решітки відкладаються в масштабі розраховані вище довжини швів і окреслюється контур фасонки. Її форма повинна бути найпростішою (прямокутник, паралелограм, трапеція). Для плавної передачі зусиль від стержнів решітки на пояси бокові грані фасонки проводяться під кутом не менше 15° до осі стержня решітки.

Верхній край фасонки випускають за межі обушка поясного кутика на 20 мм.

7. Розраховуються поясні шви, які з'єднують поясні кутики з фасонкою. Зварні з'єднання косинки (прокладки, надставки) з поясами виконуються кутовими швами. Потрібна довжина швів, що з'єднують косинку з поясами, визначається, виходячи з того, що під дією зусиль в стержнях вузла, косинка зсувається це викликає утворення в швах внутрішніх зусиль. Зусилля зсуву в швах визначаються, виходячи з умови рівноваги косинки під дією зусиль в стержнях S_1 , S_2 , S_3 і S_4 , а також зусиль у швах T_r і T_b . (рис. 2.7) [4].

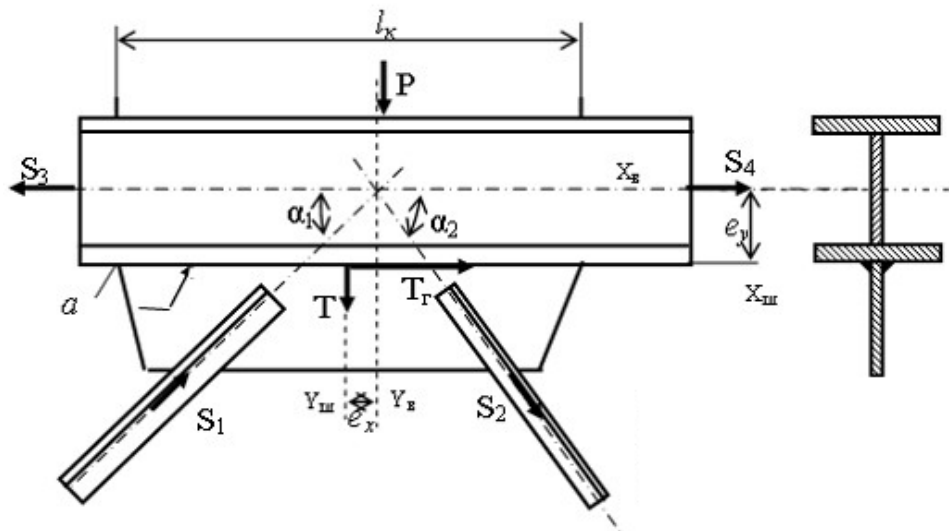


Рисунок 2.7 – Розподіл зусиль у зварному вузлі з надставкою [4]

Спроекуємо їх відповідно на осі x і y і прийдемо до висновку, що на зварні шви діють дві сили T_r і T_b та момент M .

$$T_z = S_1 \cos \alpha_1 + S_2 \cos \alpha_2 + S_4 - S_3;$$

$$T_e = S_1 \sin \alpha_1 + S_2 \sin \alpha_2 - P;$$

$$M = T_z \cdot e_y \pm T_e \cdot y_x.$$

Для небезпечної точки a умова міцності має вид:

$$\tau = \sqrt{\tau_z^2 + (\tau_e + \tau_M)^2} \leq [\tau]^{36},$$

де

$$\tau_z = \frac{T_z}{2 \cdot \beta K \cdot l_K}; \quad \tau_e = \frac{T_e}{2 \cdot \beta K \cdot l_K}; \quad \tau_M = \frac{6M}{2 \cdot \beta K \cdot l_K^2};$$

Звідки знаходимо довжину шва, або робимо перевірку міцності [4].

Для вузла з прокладкою зусилля T_r і T_b розподіляються між швами як показано на рис. 2.8.

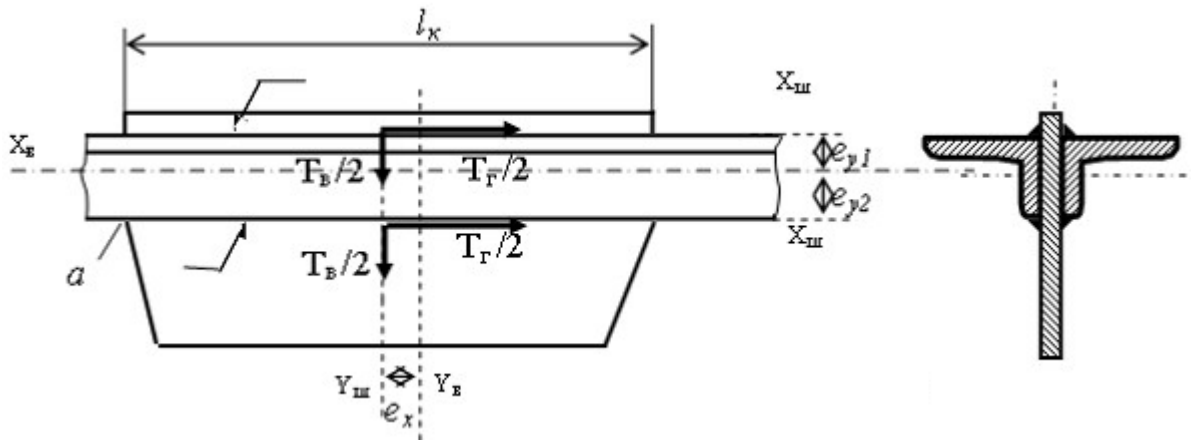


Рисунок 2.8 – Розподіл зусиль у зварному вузлі з прокладкою [4]

Тоді на шви буде діяти момент

$$M = T_z/2 \cdot e_{y1} - T_z/2 \cdot e_{y2} \pm T_s \cdot e_x.$$

Напруження в швах:

$$\tau_z = \frac{T_z}{4 \cdot \beta K \cdot l_k}; \quad \tau_s = \frac{T_s}{4 \cdot \beta K \cdot l_k}; \quad \tau_M = \frac{6M}{4 \cdot \beta K \cdot l_k^2};$$

Оскільки довжина поясних швів (рис.2.9, а) визначається конструктивно (довжиною контакту кутика з фасонкою), то обчислюються необхідні катети швів біля обушка і пера.

Остаточне конструктивне рішення вузла з усіма необхідними розмірами наведено на рис. 2.9, б.

В кожному вузлі повинні бути проставлені розміри, які дозволяють визначити габарити всіх деталей вузла, а саме:

- прив'язки торців стержнів решітки до центрів вузлів з таким розрахунком, щоб чисті довжини кутиків мали розміри, кратні 10 мм;
- розміри від центрів вузлів до країв фасонок. Ці розміри бажано мати також кратними 10 мм;
- розміри зварних швів;
- для кожного кутика проставляється його прив'язка до осі z_0 .

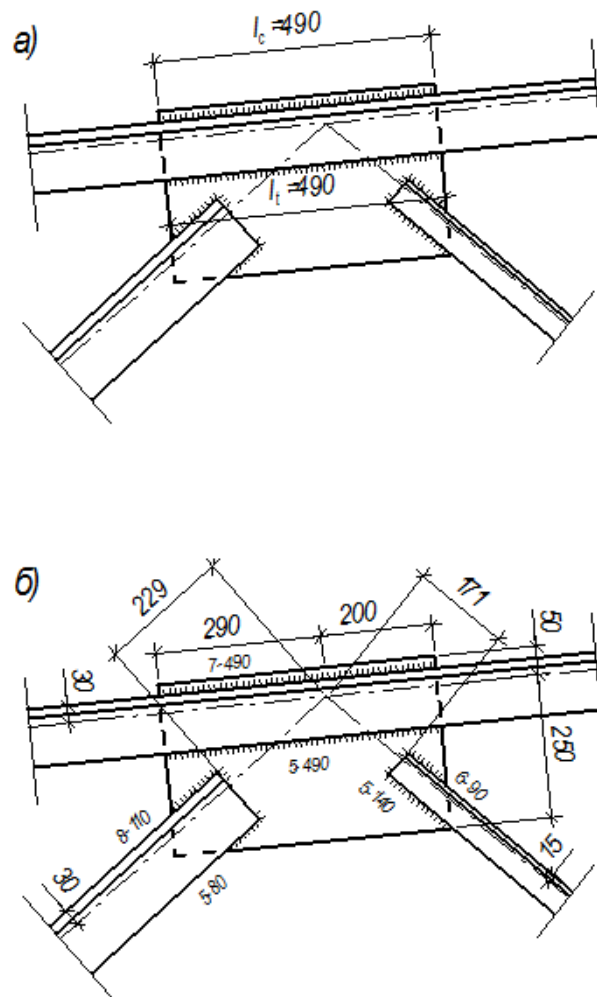


Рисунок 2.9 – Завершальний етап конструювання проміжного вузла [4]

На цьому розрахунок одного проміжного вузла закінчений. За такою ж послідовністю розраховуються інші проміжні вузли.

2.5 Методика визначення довжини зварних вузлових швів

В залежності від розміщення шва відносно діючої на з'єднання сили шви можуть бути лобовими (торцевими) і фланговими. Кутові шви для таких з'єднань розраховують виходячи з умови міцності на зрізання [4]:

$$\tau_{cp} = \frac{F}{0,7 \cdot k \cdot l_c} \leq [\tau_{cp}'] ,$$

де F – зусилля в приварюваному елементі; k – катет шва (зазвичай приймають катет рівним товщині полиці приварювано деталі); l_c – розрахункова сумарна довжина швів; $[t\phi_{cp}]$ – допустиме напруження зварного шва на зрізання.

Допустимі напруження зварного шва призначаються в залежності від виду технологічного процесу і марки електродів. При ручному електродуговому зварюванні електродами Э42А і Э50А $[t\phi_{cp}] = 0,65 \times [s_p]$; при зварюванні електродами Э42 і Э50 $[t\phi_{cp}] = 0,65 \times [s_p]$; а електродами Э34 $[t\phi_{cp}] = 0,5 \times [s_p]$, де $[s_p]$ – допустиме напруження на розтяг основного металу.

Для конструкцій з незагартованих маловуглецевих сталей, які експлуатуються при постійних навантаженнях, допустиме напруження на розтяг основного металу

$$[\sigma_p] = \frac{\sigma_T \cdot e}{[s] k_\sigma},$$

де σ_T – межа текучості матеріалу вибраного сортаменту, МПа; e – масштабний фактор; для зварних конструкцій при статичному навантажуванні $e = 0,9$; $[s]$ – коефіцієнт безпечності; для вуглецевих сталей $[s] = 1,2 \dots 1,3$; k_σ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень; при статичному навантажуванні $k_\sigma = 1,0 \dots 1,2$ (більше значення для лобових і флангових швів).

При дії змінних навантажень допустимі напруження слід домножати на коефіцієнт ψ

$$\psi = \frac{1}{[(0,6 \cdot k_\sigma + 0,2) - R \cdot (0,6 \cdot k_\sigma - 0,2)]},$$

де R – коефіцієнт асиметрії циклу напружень; k_σ – коефіцієнт концентрації напружень, при змінних напруженнях для флангових швів можна прийняти $k_\sigma = 3,5$.

При зварюванні елементів з рівносторонніх кутників зазвичай використовують два флангових шви різної довжини. Довжини швів обернено пропорційні віддалям від лінії дії сили до краю кутника, тобто

$$\frac{\ell_{\phi 1}}{\ell_{\phi 2}} = \frac{c}{a}$$

Виходячи з цього

$$F_1 = F \cdot \frac{c}{b}; F_2 = F \cdot \frac{a}{b}.$$

Необхідна розрахункова довжина швів

$$\ell'_{\phi 1} = F_1 / (0,7k[\tau'_{cp}] ,$$

$$\ell'_{\phi 2} = F_2 / (0,7k[\tau'_{cp}] .$$

Дійсну довжину швів з врахуванням дефектів (можливості не проварювання на початку і кратера в кінці шва) беруть більшою за розрахункову на 10...15 мм, тобто [4]

$$\ell'_{\phi} = \ell_{\phi} + (10...15)_{\text{мм}}.$$

2.6 Програмні пакети для визначення параметрів зварних швів

Для визначення параметрів напружено-деформівного стану (НДС) та тріщиностійкості в елементах конструкції може бути проведено за допомогою різних сучасних обчислювальних програмних комплексів. Зокрема, для цього можуть бути використані скінчено-елементні програмні комплекси (ПК) «SolidWorks», Autodesk Inventor, ANSYS, ЛИРА-САПР, SCAD Office та інші.

У дипломній роботі розрахунок поведінки моделі зварної ферми та НДС вузлів під дією статичних та циклічних навантажень виконано з використанням прикладного програмного пакету SolidWorks 2020, тому що цей програмний комплекс має ряд переваг:

- простота побудова металевої моделі конструкції або імпорт їх з CAD систем (а саме із AutoCAD, Inventor та ін.);
- простий інтерфейс;
- оптимізація геометрії конструкції;
- висока продуктивність;

SolidWorks – розробка компанії SolidWorks Corporation (США), система автоматизованого проектування (САПР) в трьох вимірі. Розроблено спеціально для роботи з 3D моделями. Має досить простим інтерфейсом. (рис. 2.10).

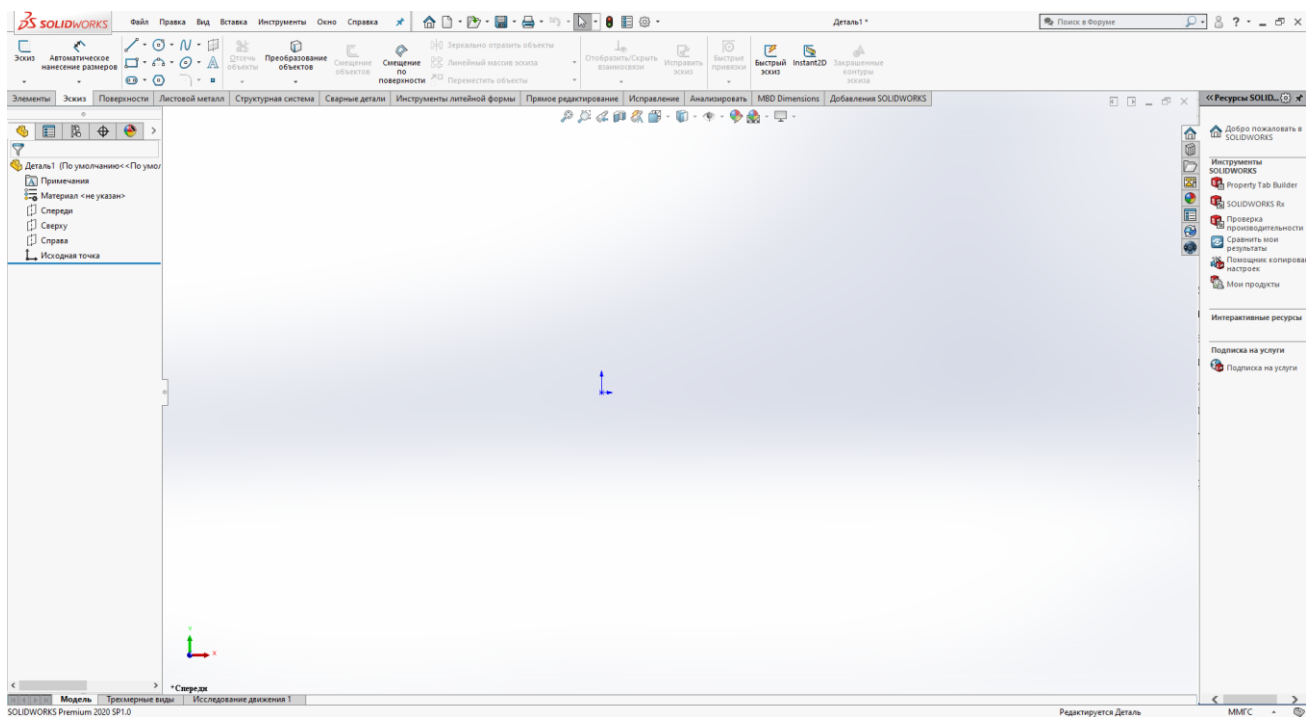


Рисунок 2.10 – Інтерфейс SolidWorks 2020

Програма з'явилася в 1993 році і склала конкуренцію в області моделювання 3D таким продуктам як AutoCAD, Autodesk Mechanical Desktop, Solid Edge. Solidworks - дозволяє легко отримувати твердотельную модель з двовимірною ескізу. Застосовуючи дуже прості й ефективні інструменти моделювання.

SOLIDWORKS Simulation - це додатковий модуль САПР SolidWork, комплект простих у застосуванні інструментів для структурного аналізу, в яких використовується метод скінченних елементів. Такий аналіз дозволяє прогнозувати

поведінку виробу в реальному середовищі шляхом віртуального тестування CAD-моделей. У лінійці пропонуються інструменти з функціями лінійного, нелінійного статичного і динамічного аналізу.

2.7 Висновки за розділом 2

За результатами аналізу існуючих методичних підходів до визначення параметрів зварних швів, які забезпечують міцність зварних ферм при статичних навантаженнях і тріщиностійкість конструкції при циклічних навантаженнях виявлено, що класичні підходи до розрахунків є надто трудомісткими і передбачають закладення значних коефіцієнтів запасу міцності, які повинні перекривати всі невраховані чинники, зокрема технологічні дефекти зварювання.

Сучасні прикладні програмні пакети дають можливість позбавитися від цих недоліків завдяки можливості врахування багато параметричного силового, теплового і технологічного і аварійного впливу на конструкцію зварної ферми. Саме тому прийнято рішення виконати власні дослідження з використанням ПК SolidWorks.

РОЗДІЛ 3

ПАРАМЕТРИ ЗВАРНИХ ШВІВ ЯК ВИЗНАЧАЛЬНИЙ ЧИННИК ДОВГОВІЧНОСТІ ЗВАРНИХ ФЕРМ

3.1 Формування напружень в околі зварного шва при виготовленні і експлуатації ферм

Технологічний процес виготовлення металевих зварних ферм передбачає отримання з'єднань між елементами конструкції будь-яким методом зварювання. З'єднання формуються за рахунок міжатомної взаємодії. Зварювання відбувається при високих температурах і є складним комплексом локальних металургійних процесів, які полягають у швидкому нагріванні і розплавленні металів в ділянці зварювання та швидкому їх охолодженні і кристалізації. Внаслідок цього відбувається цілий ряд фізико-хімічних процесів, які змінюють властивості основного матеріалу, а, отже, і його поведінку при зовнішніх силових впливах. Процеси супроводжуються появою залишкових зварювальних напружень і деформуванням цих деталей. Особливо яскраво це виражено за умов циклічних навантажень. За таких умов в матеріалі виникають тріщини.

Тріщина в матеріалі може виникнути в результаті втоми, бути наслідком металургійного дефекту і т.п. Тріщина є концентратором напружень, в її вершині напруження значно перевершують розрахункові. Вони тим більші, чим довшою і гострішою є тріщина.

Сучасні засоби комп'ютерної техніки і прикладне програмне забезпечення дає можливість змоделювати НДС в околі зварного шва і спрогнозувати поведінку конструкції при навантажуванні.

З використанням прикладного програмного комплексу SolidWorks виконано дослідження розподілу напружень і деформацій в околі зварного шва при виготовленні типової зварної ферми (рис. 3.1).

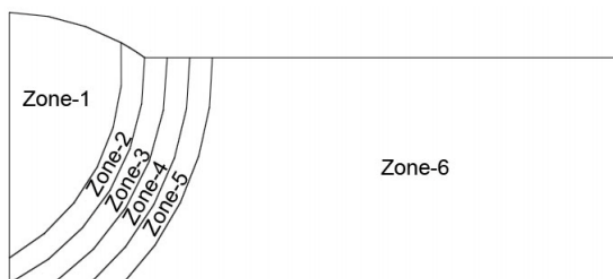


Рисунок 3.1 – Зона термічного впливу

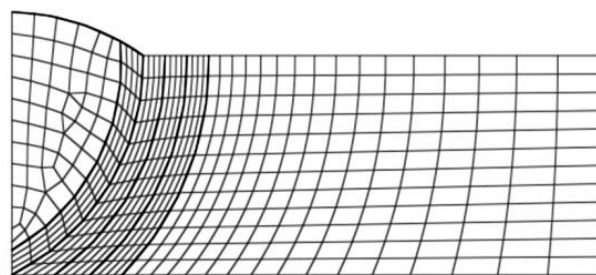


Рисунок 3.2 – Скінченно-елементна сітка

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту виявлено візуалізовану картину розподілу залишкових напружень (рис. 3.3) та залишкової пластичної деформації (рис. 3.4).

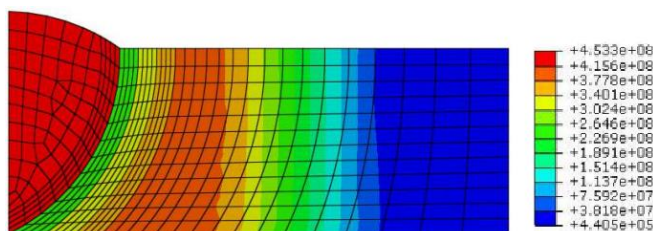


Рисунок 3.3 Розподіл залишкових напружень

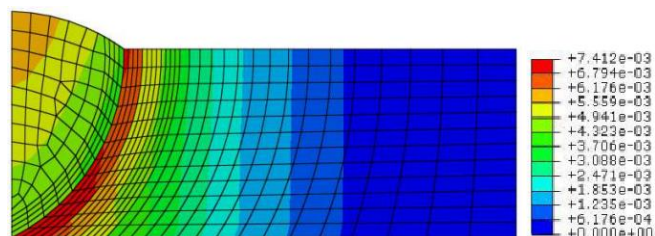


Рисунок 3.4 Розподіл залишкової пластичної деформації

За отриманими результатами очевидно є локалізація пікових параметрів НДС на межі зварного шва і зони термічного впливу. Саме тому в цих місцях зароджуються первинні прояви пошкоджень конструкції, зокрема тріщини при сприйнятті конструкцією циклічних навантажень. Для виявлення картини таких пошкоджень виконано комп'ютерний моделюючий експеримент з використанням прикладного програмного комплексу SolidWorks (рис. 3.5...3.10).

За візуалізованими результатами досліджень очевидно, де і чому саме зароджується втомна тріщина, тобто на межі між наплавленим металом зварного шва і ділянкою термічного впливу.

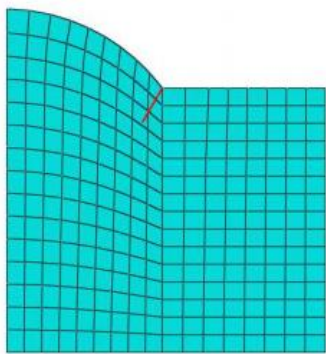


Рисунок 3.5 – Скінченно-елементна сітка

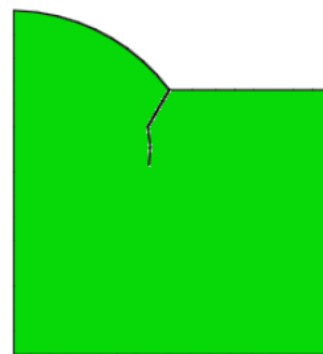


Рисунок 3.6 – Поширення тріщини від зовнішнього концентратора напружень

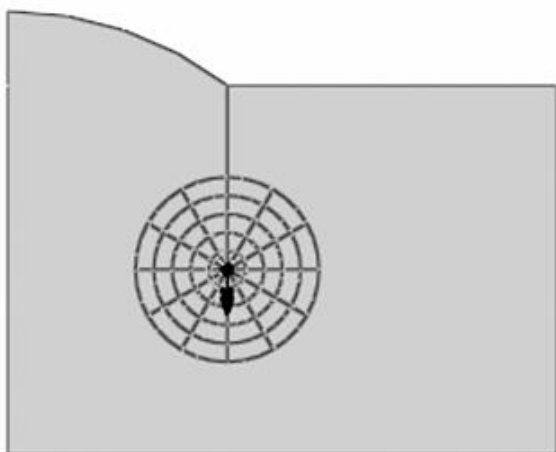


Рисунок 3.7 – Напрямок поширення тріщини

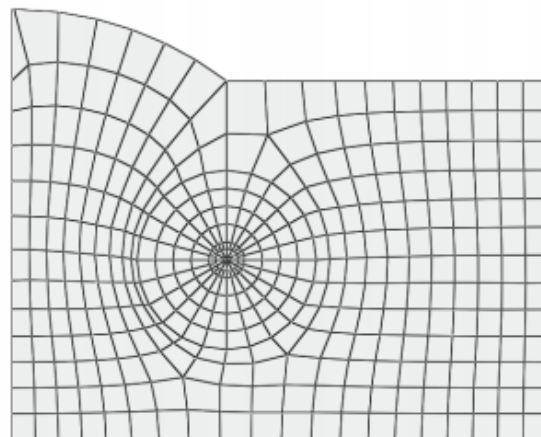


Рисунок 3.8 – Скінченно-елементна сітка

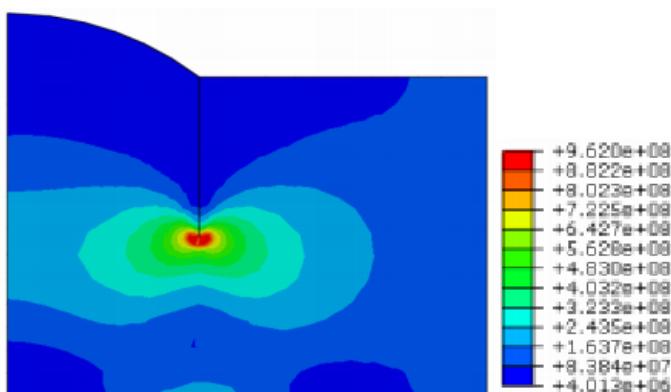


Рисунок 3.9 – Напруження в околі вершини тріщини

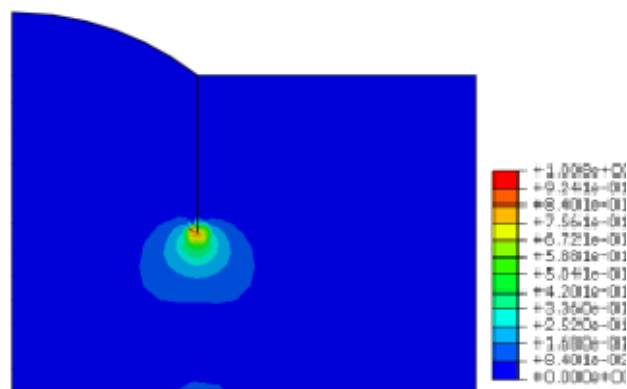


Рисунок 3.10 – Пластичні деформації в околі вершини тріщини

У міру віддалення від вершини тріщини напруження падають (рис. 3.9) Якщо напруження у вершині тріщини такі, що викликають її поширення, відбувається руйнування матеріалу; притому, що розрахункові напруження нижче межі текучості.

Виходячи з отриманих результатів досліджень можна зробити висновок, що для підвищення тріщиностійкості і довговічності зварних ферм особливу увагу слід приділити зменшенню концентрації напружень в місцях їх локалізації. Досягнути цього можна завдяки вибраним параметрам зварного шва та дотриманням технології зварювання.

3.2 Вибір типової зварної ферми для досліджень, схеми її базування і навантажування

Питання тріщиностійкості зварних швів і довговічності зварних ферм є найактуальнішим для конструкцій, які зазнають циклічних навантажень. У виробничих будівлях за таких умов експлуатуються кроквяні ферми дахового накриття, які крім статичних навантажень (власна вага, вага покрівлі, снігу взимку) сприймають і циклічні навантаження від температурних перепадів (кліматичних чи технологічних), вітрового впливу і навантаження від підвісних технологічних засобів (конвеєри, мостові крани, кран-балки, тельфери).

Саме з цих міркувань для досліджень прийнято двосхилу кроквяну ферму довжиною 24 метрів, виготовлену з гнуто-зварних профільних труб (рис. 3.11).

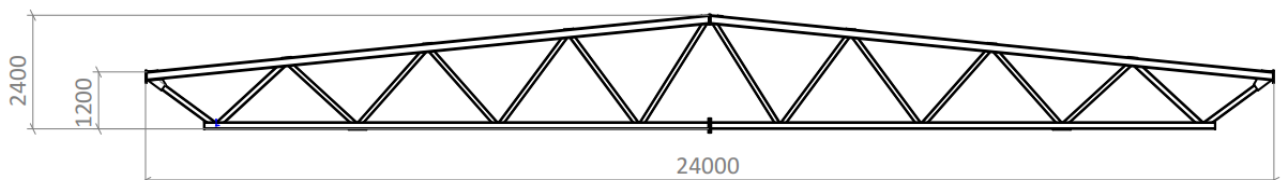


Рисунок 3.11 – Типова металева зварна кроквяна ферма для досліджень

Верхній пояс ферми виготовлено з профільної труби 180x180x6 мм., нижній пояс – з профільної труби 140x140x5 мм., опорні розкоси – з труби 120x120x5мм, не опорні розкоси – з труби 100x100x4 мм.

Ферма базується вертикальними фланцями на внутрішній поверхні каркасних колон будівлі з опиранням на нижню частину фланців й фіксується в проектному положенні різьбовими елементами (рис. 3.12).

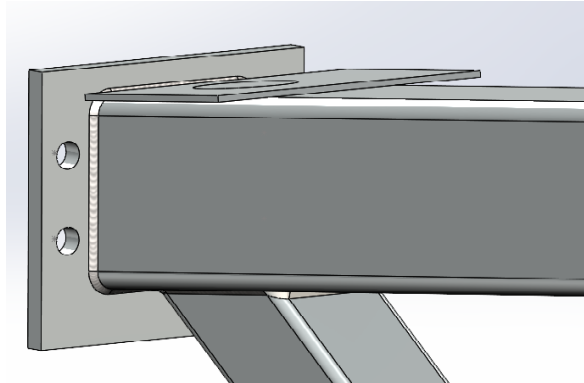


Рисунок 3.12 – Один з двох кріпильних фланців кроквяної ферми

Згідно з проектною документацією виробничої будівлі зверху на ферму монтують дахове покриття, знизу – технологічну кран-балку. Кран-балка рухається по підвісних рейках, які закріплені до нижнього пояса ферми навпроти другий вузлів від колон. Навантаження від дахового покриття прикладено вздовж верхнього пояса ферми навпроти вузлів (рис. 3.13).

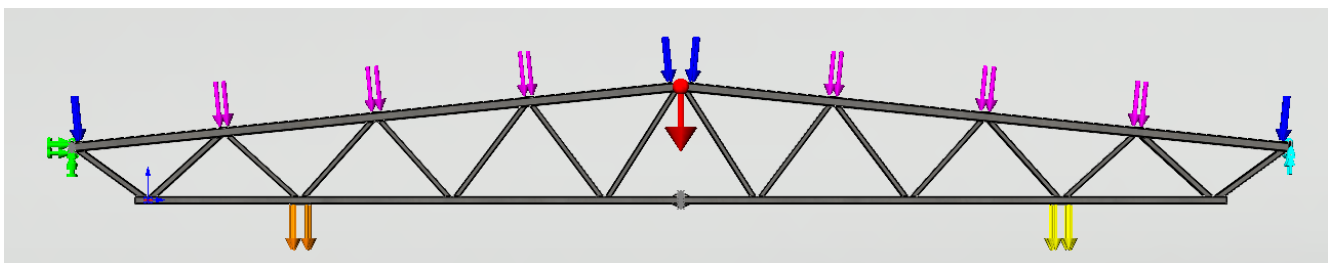


Рисунок 3.13 – Схема базування і навантажування ферми

Ферма впродовж експлуатації сприймає власну вагу, вагу покрівлі, снігу і вагу кран-балки (статичні складові) та вагу вантажу на гакові кран-балки (циклічна складова).

Згідно з проектною документацією виробничої будівлі параметри силового впливу і режими роботи такі:

- власна вага ферми 19 кН;
- загальна вага покрівлі з розрахунку на 1 ферму – 24 кН;
- снігове навантаження з розрахунку на 1 ферму – 296 кН;
- вага кран-балки 35 кН;
- вага вантажу на кран-балці від 32 кН;
- тривалість циклу піднімання-опускання вантажу 7 с;
- інтенсивність роботи кран-балки – 60 разів за годину;
- режим роботи – 2 зміни 5 днів в тиждень;
- проектна довговічність ферми 60 років.

Виходячи з цих показників виконано проектний розрахунок ферми.

3.3 Вибір сталі та матеріалів для з'єднання

Вибір марки сталі для конструкцій залежить від групи конструкції, який характеризується п'ятьма чинниками:

- Клас відповідальності;
- Категорія за призначенням;
- Категорія за напруженим станом;
- Наявність розтягувальних напружень від розрахункового навантаження;
- Несприятливий вплив зварних з'єднань.

Залежно від наслідків, які можуть бути викликані відмовою конструкції, визначено категорію і конструкцій металевої ферми за призначенням відносять до категорії «А». До категорії «А» відносять головні несучі конструкції, відмова яких призводить до повної, або часткового руйнування будівлі чи споруди.

За напруженим станом ферми відносять до категорії 1. Також враховуючі інші чинники ферми відноситься до групи 1.

Враховуючи групу конструкції, обрано марку сталі ВСтЗпс згідно додатку Г ДБН В.2.6.-198:2014. Механічні властивості сталі наведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1

Механічні властивості сталі ВСтЗпс

Вибірка	Межа текучості σ_T , МПа	Межа міцності σ_B , МПа	Відносне видовження δ , %
ДБН	280	390	24
Сертифікат	317	431	35
Натурний експеримент	273	380	36

Для з'єднання елементів ферм всі зварні шви запроектовано напівавтоматичним дуговим зварюванням з використанням дроту суцільного перерізу Св-08Г2С, механічні властивості якого наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Механічні властивості дроту зварювального шва, виконано дротом Св-08Г2С на сталі ВСтЗпс

Межа міцності σ_B , МПа	Межа текучості σ_T , МПа	Відносне видовження δ , %
283	270	9

Катет зварного шва прийнято по найменшій товщині елементів що з'єднуються.

3.4 Проектування ферми методом комп'ютерного моделювання

Дослідження впливу параметру шва на тріщиностійкість вузлів зварних ферм під дією циклічних навантаження виконано комп'ютерним моделюванням в прикладному програмному пакеті SolidWorks, який базується на метод скінченних елементів. Такий аналіз дозволяє прогнозувати поведінку елементів в реальному середовищі шляхом віртуального тестування CAD-моделей. У лінійці пропонуються інструменти з функціями лінійного, нелінійного статичного і динамічного аналізу.

Послідовні виконання моделювання зварної ферми через два етапи. Перший етап – це створення геометричної моделі ферми (рис. 3.14). Другий етап – це відповідний розрахунок до поставленої задачі (рис. 3.15).

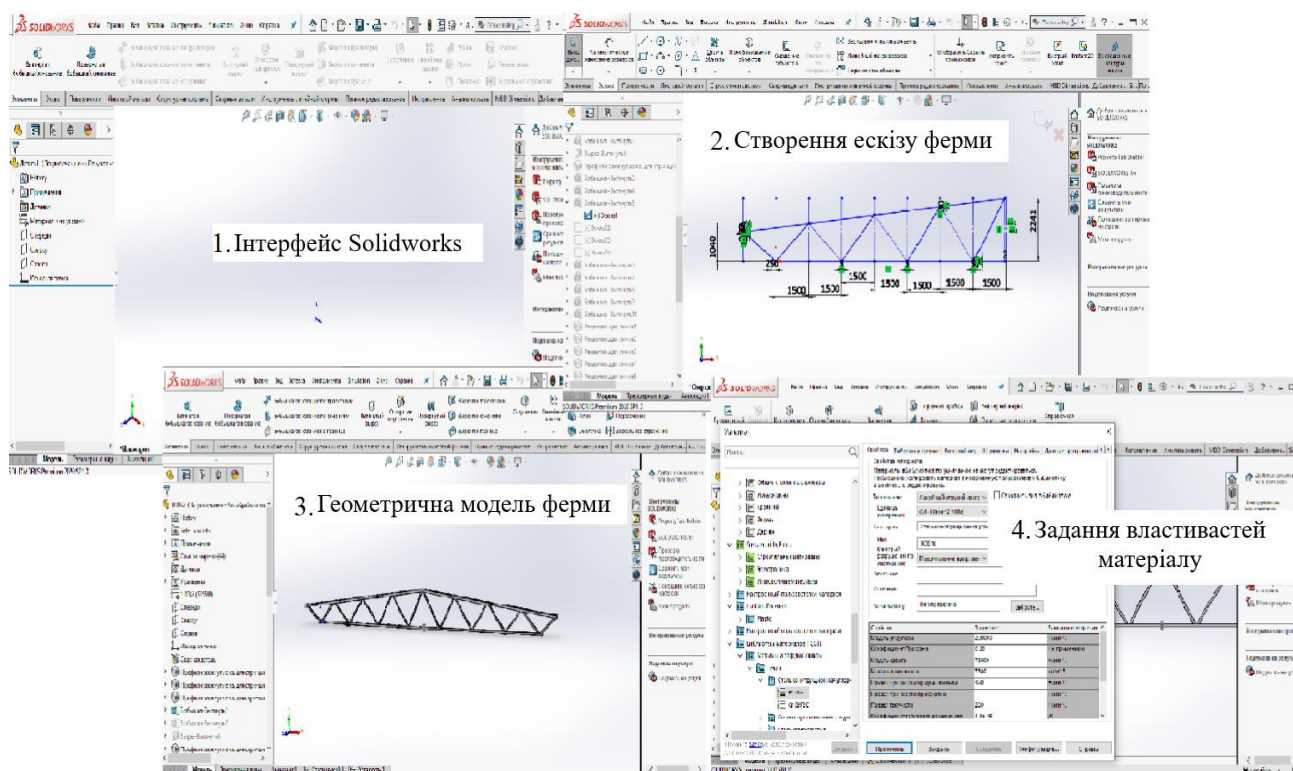


Рисунок 3.14 – Створення геометричної моделі зварної ферми

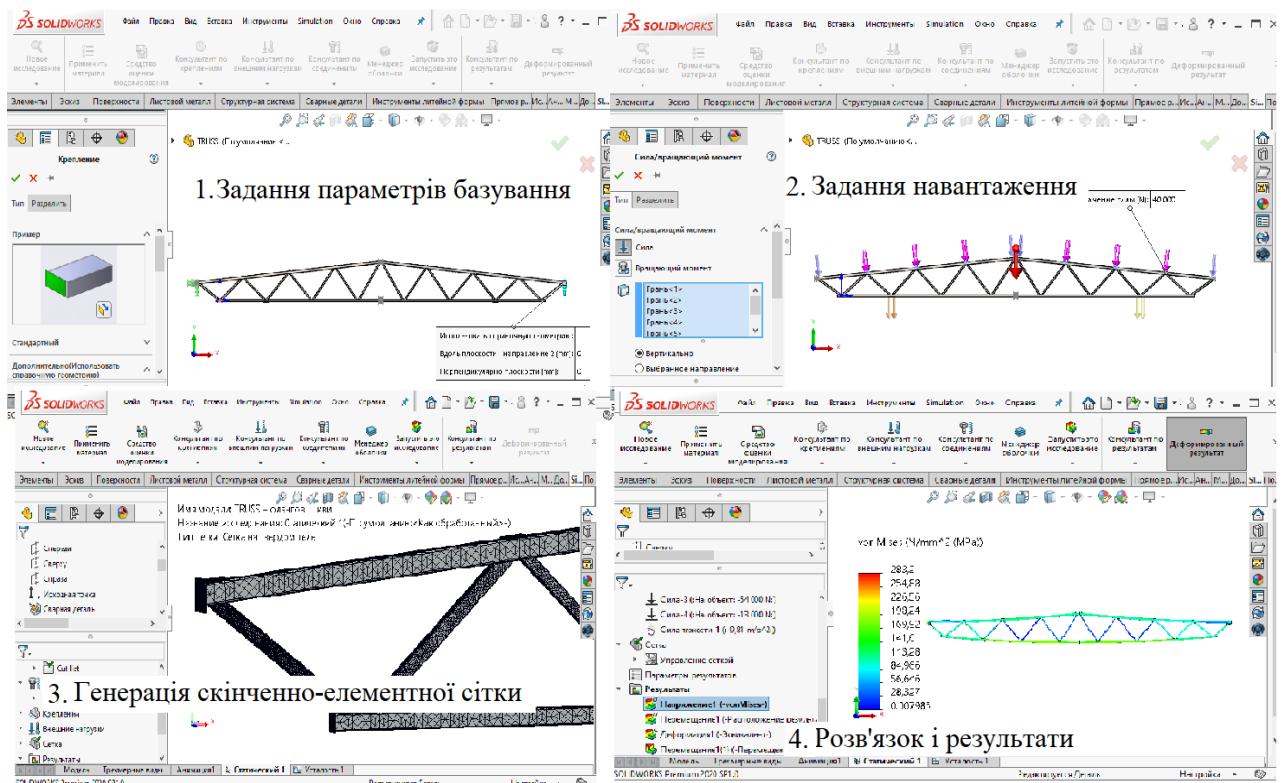


Рисунок 3.15 – Послідовність розв'язку задачі

Реалізувавши описані кроки моделювання, виконано перевірку проектних параметрів ферми, описаних в п. 3.2. Вказані конструктивні параметри здатні сприймати параметри силового впливу і режими роботи, передбачені для даної ферми в п. 3.2.

3.5 Виявлення місць локалізації пікових показників НДС і визначення їх значень

Для визначення впливу параметра зварного шва на тріщиностійкість зварної ферми під дією циклічних навантажень потрібно визначити місце локалізації пікових показників НДС від дії статичних навантажень. Використовуючи скінченно-елементну модель зварної ферми, виконано комп'ютерний моделюючий експеримент за критеріями максимального напруження по Мізесу, яка заснована на теорії Мізес-Хенки (Mises-Hensky), або як ще називається теорія енергії формозміни. Теорія стверджує, що пластичний матеріал починає руйнуватися в місцях, де напруження за Мізесом перевищує межу міцності матеріалу.

Виконавши моделюючий розрахунок зварної ферми в SolidWorks Simulation, виявлено місце формування максимальних напруження у зварній фермі, які рівні $\sigma_{\max} = 287$ МПа (рис. 3.16).

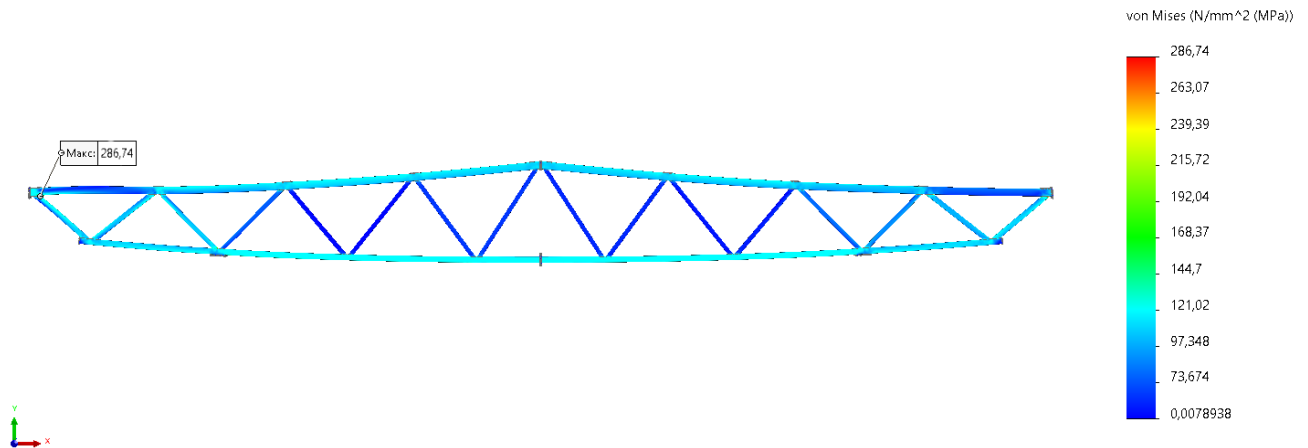


Рисунок 3.16 – Виявлення місця формування максимальних напружень у фермі при дії статичних навантажень.

Як видно на рисунку 3.16, максимальні напруження $\sigma_{\max} = 287$ МПа у зварній фермі при дії статичних навантаження формуються в опорному вузлі. Детальніша візуалізація місця виникнення максимальних напружень подана на рисунку 3.17.

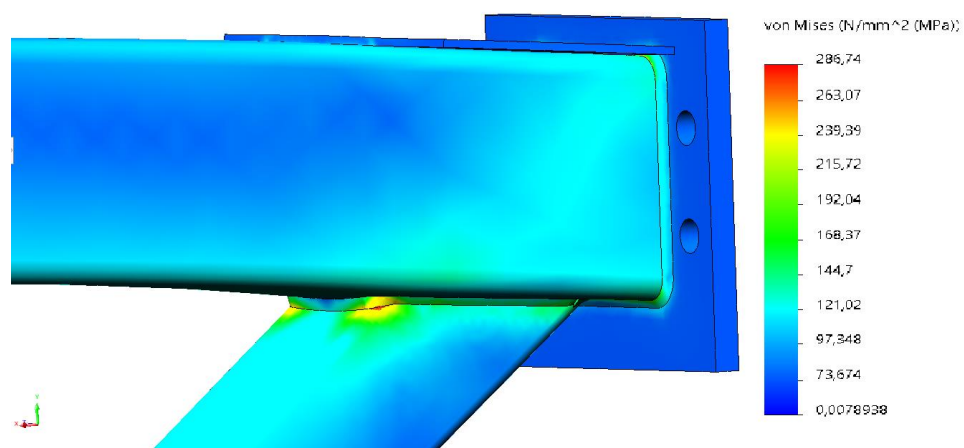


Рисунок 3.17 – Візуалізація місця локалізації максимальних напружень у вузлових елементах безфасонкової уніфікованої ферми при дії статичних навантажень.

На рисунку 3.17 видно, що максимальне напруження $\sigma_{\max} = 287$ МПа виникає в місці переходу зварного шва до основного матеріалу опорного розкосу ферми.

При дії статичних навантажень в опорному вузлі зварної ферми, де виникає максимальне напруження, формується пластична деформація основного матеріалу опорного розкосу (рис. 3.18).

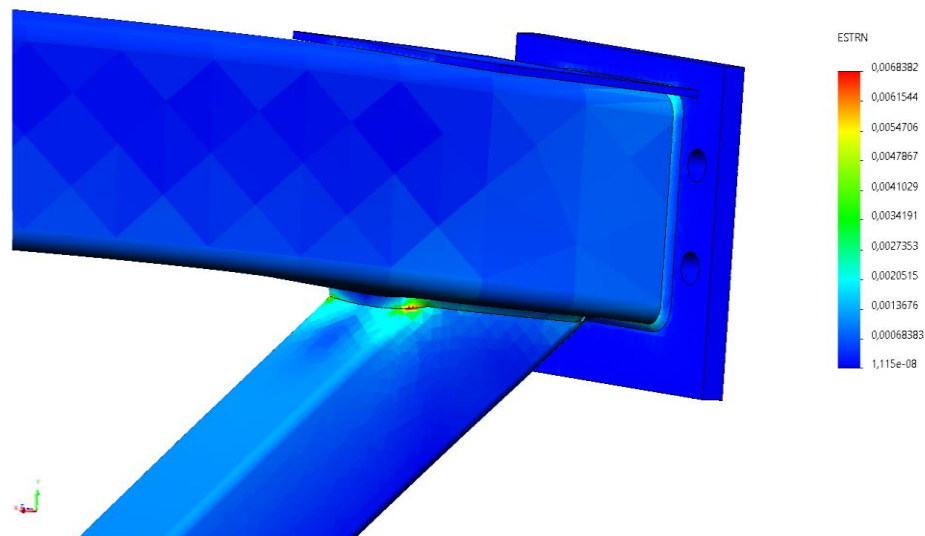


Рисунок 3.18 – Візуалізація місця формування максимальних еквівалентних деформацій в опорному вузлі.

Пластична деформація досягає формує напруження в матеріалі на рівні граничного стану. Подальше збільшення навантажень приведе до руйнування вузлового елемента і ферми в цілому.

3.6 Дослідження довговічності ферми при циклічних навантаженнях

Втома – процес поступового накопичення пошкоджень, утворення та розвитку тріщин у матеріалі під дією циклічного навантажування. Втомне пошкодження – незворотна зміна фізико-механічних властивостей матеріалу об'єкта і поява втомної тріщини від дії циклічного навантаження.

Тріщиностійкість характеризує здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при наявності тріщини.

Для дослідження впливу зварного шва на тріщиностійкість зварної ферми від дією циклічних навантажень прийнято режим навантаження, який наведено в таблиці 3.3, та графічно зображено на рисунку 3.19.

Таблиця 3.3

Режими циклічного навантажування для дослідження зварної ферми

Параметри	Значення
Максимальне навантаження	$P_{max} = 406 \text{ кН}$
Мінімальне навантаження	$P_{min} = 374 \text{ кН}$
Амплітуда навантаження	$P = 32 \text{ кН}$
Коефіцієнт асиметрії циклів	$R = P_{min}/P_{max} = 0,5$
Тривалість циклу	$T = 7 \text{ с.}$

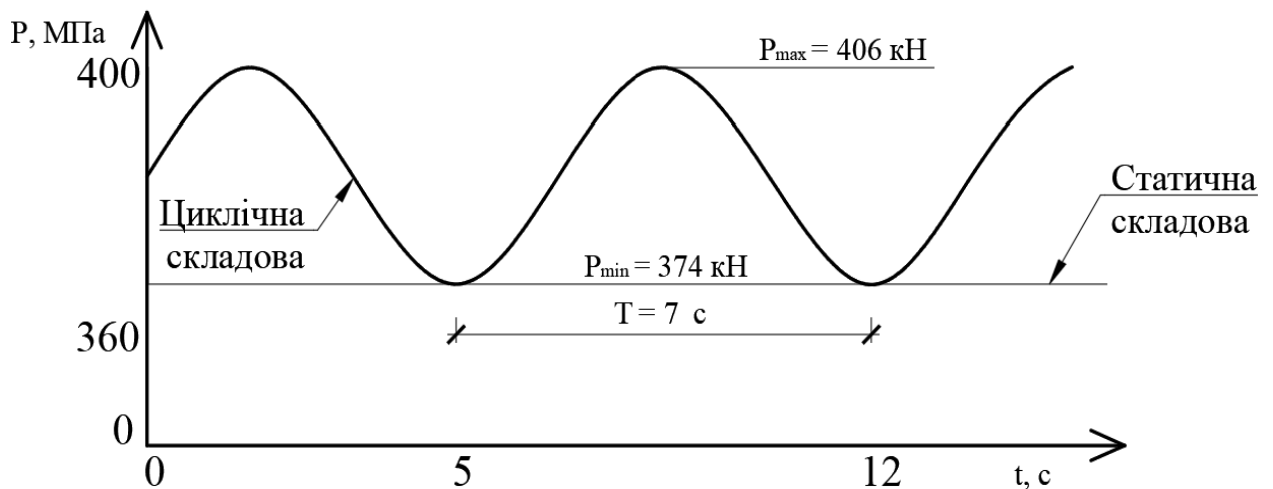


Рисунок 3.19 – Режим комплексного силового впливу на досліджувану ферму

Під статичною складовою прийнято навантаження від власної ваги ферми, ваги конструкцій покрівлі та розрахункової ваги конструкцій крана.

Під циклічною складовою прийнято вантажопідйомність підвісного крана $P = 32$ кН.

Для дослідження поведінки зварного шва при силовому впливі комп'ютерним моделюванням на ферму побудовано криву втомного руйнування сталі СтВЗпс на ділянці термічного впливу від зварного шва. (рис.3.20).

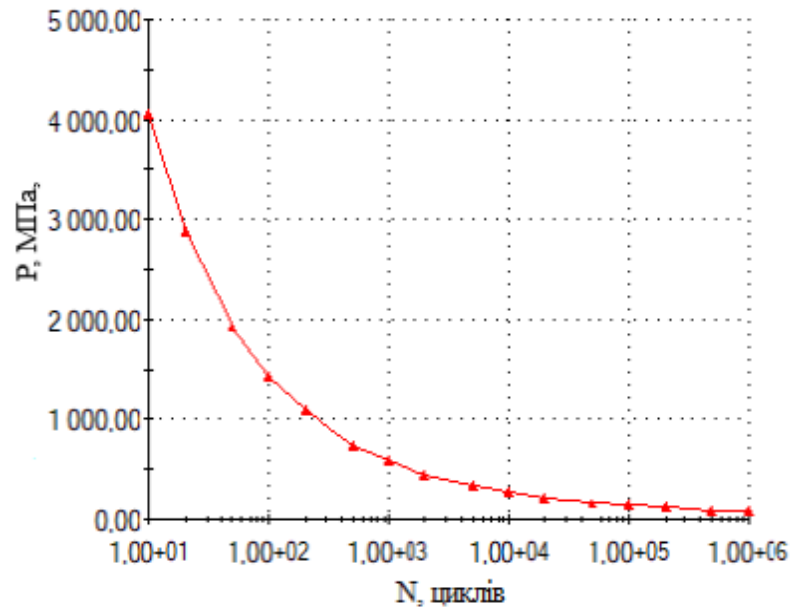
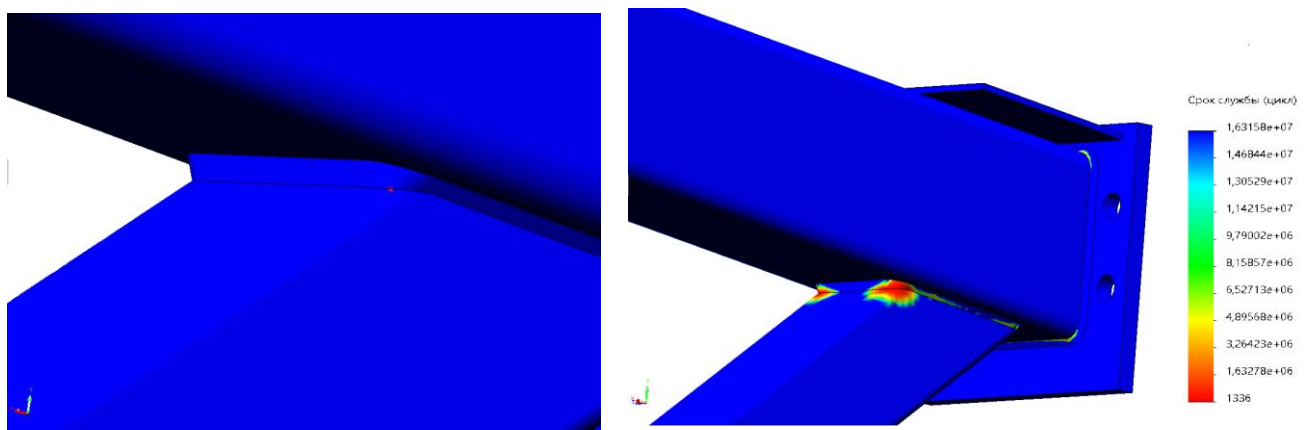


Рисунок 3.20 – Крива втоми для ділянки термічного впливу від зварного шва на сталі ВСт3 пс

Виконавши комп'ютерне моделювання досліджуваної ферми на дію циклічного навантаження для прийнятого зварного шва катетом $k_f = 5$ мм по контуру опорного розкоса, отримано візуалізовану картину місця зародження втомної тріщини і динаміку її поширення до руйнування конструкції (рис. 3.21).



а)

б)

Рисунок 3.21 – Візуалізація опорного вузла ферми при дії циклічних навантаженнях

а) зародження тріщини; б) поширення тріщини до руйнування.

Поява тріщини виникає в місці σ_{\max} після 1356 циклу (рис. 3.21,а).

Для визначення впливу параметра зварного шва, а саме довжини зварного шва, на тріщиностійкість опорного вузла металевої ферми, прийнято однаковий катет шва $k_f = 5$ мм і різні конфігурації зварного шва.

Для першого варіанту конфігурації прийнято тільки два флангові шви із загальною довжиною $l_{\text{заг}} = 300$ мм (рис. 3.22.1).

Для другої конфігурація шва прийнято два флангові шви з переходом в лобові на 20 мм із загальною довжиною $l_{\text{заг}} = 380$ мм (рис. 3.22.2).

Для третьої конфігурації шва прийнято два флангові шва з одного боку повний лобовий шов, а з іншої перехід в лобовий на 20 мм із загальною довжиною $l_{\text{заг}} = 46$ мм (рис. 3.22.3).

Для четвертої конфігурація шва прийнято класичне виконання для гнuto-замкнутих прямокутних профілів зварного шва по контуру опорного розкосу до верхнього поясу із загальною довжиною $l_{\text{заг}} = 600$ мм (рис. 3.17).

Як видно з візуалізацій (рис. 3.22) залежність довжини зварного шва впливає на тріщиностійкість опорного вузла ферми. Значення тріщиностійкості наведено в таблиці 3 та графічно зображено рис. 3.23.

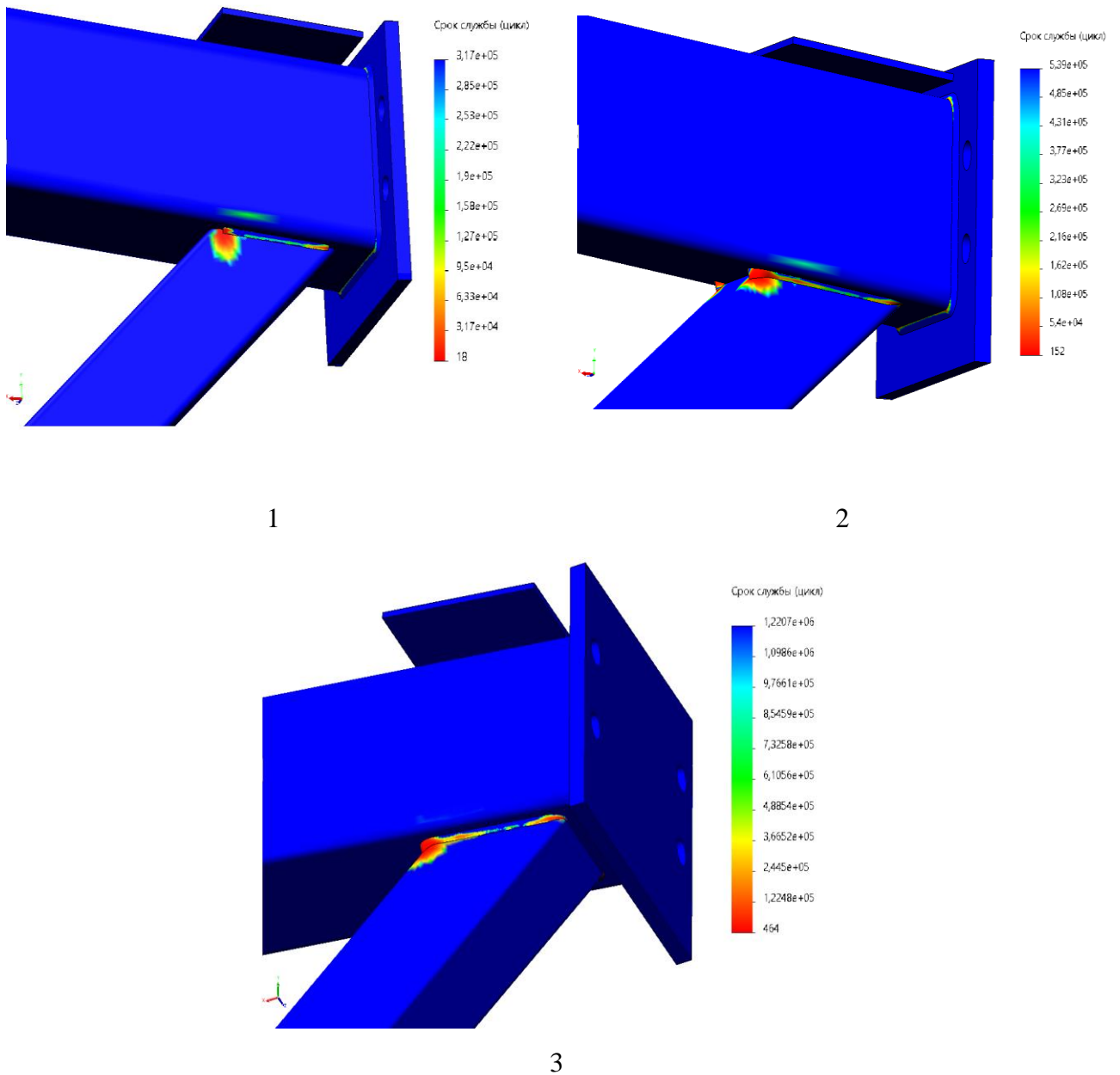


Рисунок 3.22 – Візуалізація опорного вузла ферми при дії циклічних навантаженнях з конфігурацією зварного шва

- 1) два флангові шва ; 2) два флангові шви з переходом в лобові на 20 мм;
- 3) два флангові шва з одного боку повний лобовий шов, а з іншої перехід в лобовий на 20 мм

Таблиця 3

Значення тріщиностійкості для різної довжини зварного шва при дії циклічних навантаження

№ п/п	Загальна довжина шва $l_{\text{шва}}$, мм	Поява тріщини N, циклів	Руйнування N, циклів	Допустимий строк експлуатації T, років
1	300	18	316641	0,879
2	380	152	538568	1,496
3	460	464	1220651	3,39
4	600	1336	16315808	45,32

За результатами комп'ютерного моделювання зварної ферми отримано графічні діаграму залежності, подані на рис. 3.23, 3.24, які характеризують залежність тріщиностійкості вузла від довжини зварного шва.

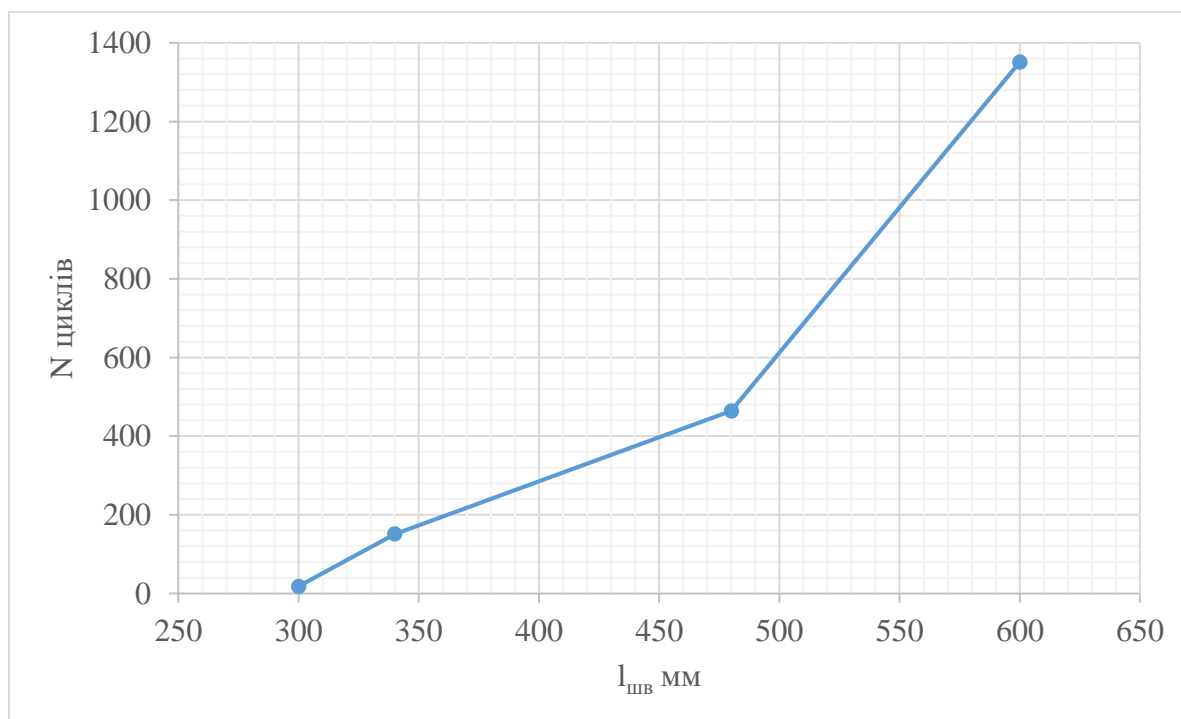


Рисунок 3.23 – Діаграма залежності періоду до зародження тріщини типового вузла від довжини зварного шва

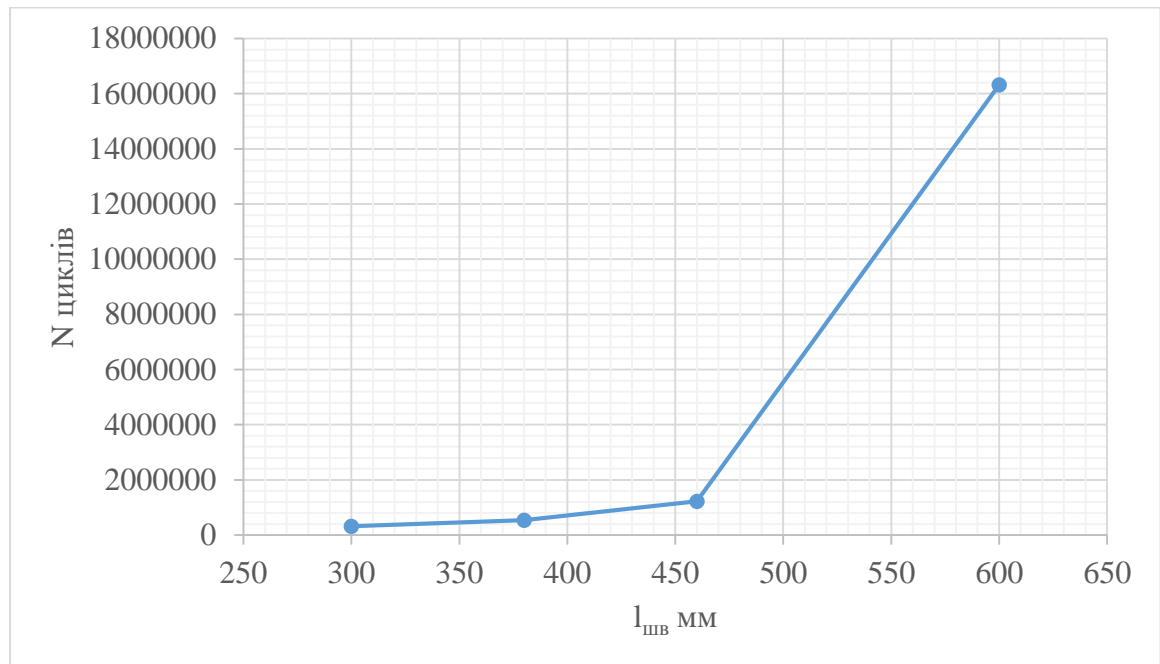


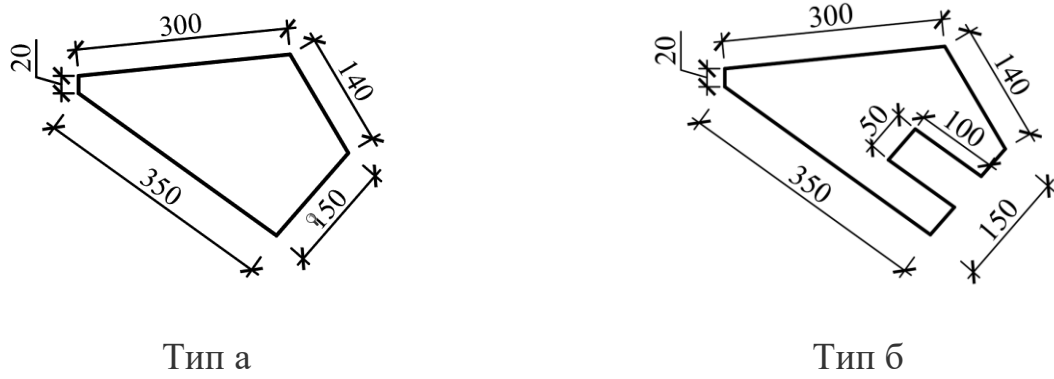
Рисунок 3.24 – Діаграма залежності довговічності типового вузла від довжини зварного шва

За отриманими результатами в процесі комп'ютерного моделювання зварної ферми можна зробити висновок, що для забезпечення допустимого ресурсу потрібно підібрати іншу конфігурацію опорного вузла із більшою довжиною зварного шва для того щоб забезпечити нормативний строк експлуатації.

3.7 Зміна довговічності ферми при зміні параметрів зварних швів

Виходячи з попередніх результатів, типовий безфасонковий опорний вузол ферми не задовольняє допустимий ресурс використання зварної ферми, оскільки нормативний ресурс промислових будівель та споруд становить 60 років.

Для збільшення допустимого ресурсу ферми, прийнято рішення використати фасонки з різною конфігурацією, для збільшення загальної довжини зварного шва (рис.3.25).

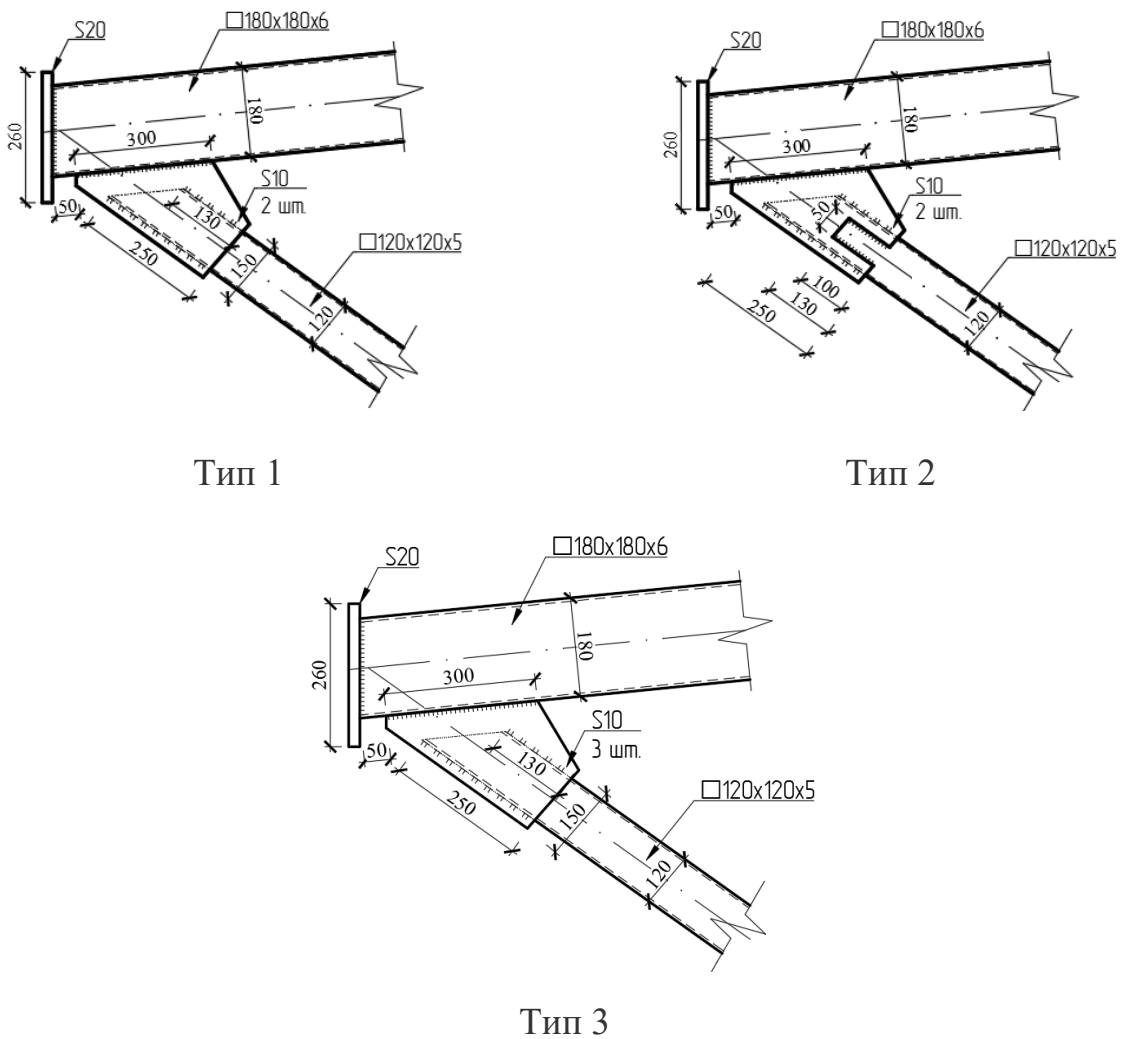


Тип а

Тип б

Рисунок 3.25 – Конфігурація фасонки

Для визначення впливу довжини зварного шва на тріщиностійкість зварної ферми сконструйовано три типи опорних вузлів зварної ферми з використання двох типів фасонки (рис. 3.26).



Тип 1

Тип 2

Тип 3

Рис. 3.26 – Схема фасонкових варіантів опорного вузла

Фасонковий опорний вузол типу 1 з використанням двох фасонки типу «а» товщиною $t = 10$ мм із загальною довжиною зварного шва $l_{\text{заг}} = 1960$ мм.

Вузол типу 2 з використанням двох фасонки типу «б» із загальною довжиною зварного шва $l_{\text{заг}} = 2360$ мм Збільшення зварного шва йде за рахунок додаткового проріз у фасонці розміром 100×50 мм.

Вузол тип 3 з використанням трьох фасонки типу «а» із загальною довжиною зварного шва $l_{\text{заг}} = 3330$ мм.

При використанні фасонкового типу опорного вузла зварної ферми збільшується загальна довжина зварних швів, при цьому вузол виходить жорсткішим, ніж типовий вузол без фасонки.

За результатами дослідження комп'ютерним моделюванням ферми з фасонкових конструкцій опорних вузлів на дію циклічних навантаження отримано такі візуальні дані (рис.3.27 – 3.29).

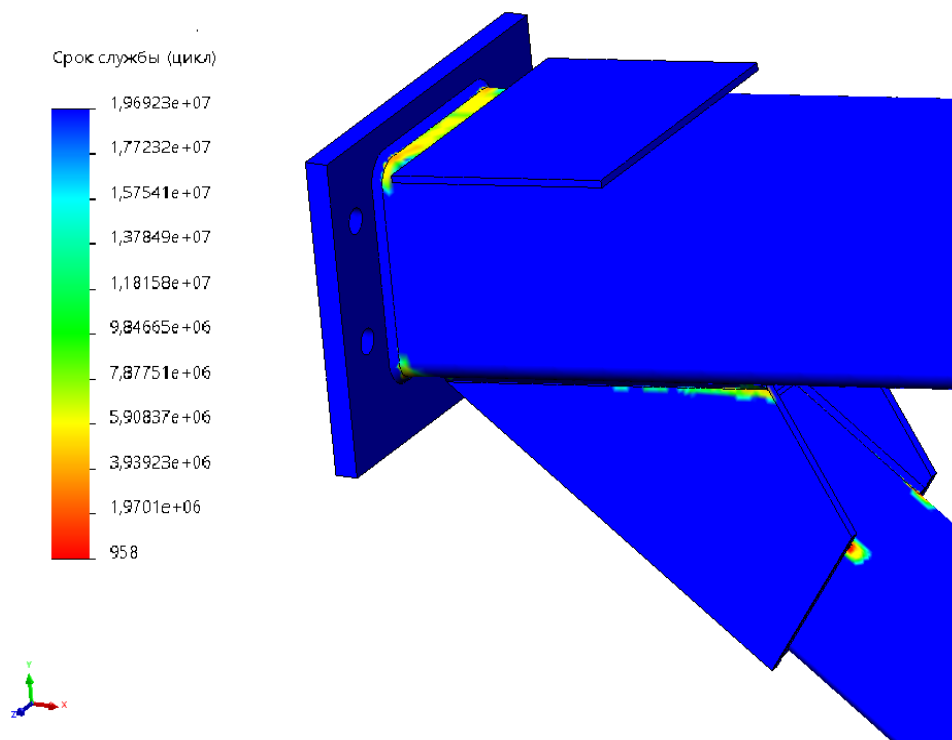


Рисунок 3.27 – Візуалізація поширення тріщини в опорному вузлі з двома фасонками при дії циклічних навантаженнях

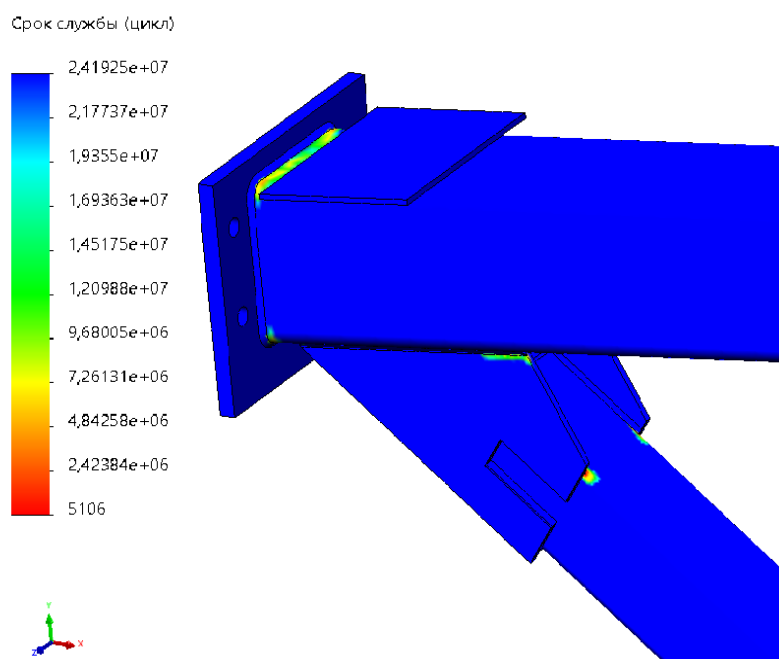


Рисунок 3.28 – Візуалізація поширення тріщини в опорному вузлі з двома фасонками з прорізами при дії циклічних навантаженнях

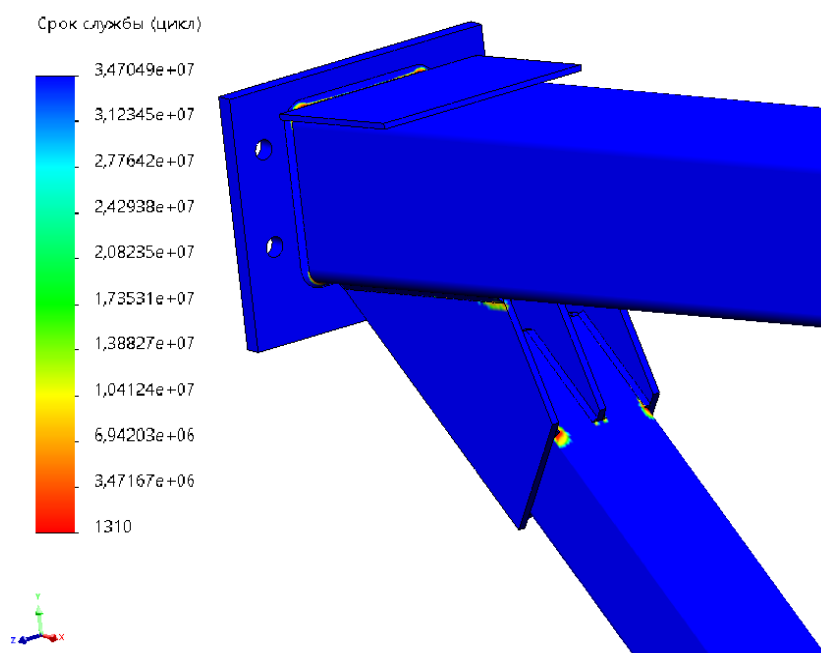


Рисунок 3.29 – Візуалізація поширення тріщини в опорному вузлі з двома фасонками при дії циклічних навантаженнях

За результатами виконаного дослідження опорного вузла ферми з різною конфігурацією, отримані результати сформовано в таблиці 3.4

Таблиця 3.4

Результати дослідження залежності тріщиностійкості опорного вузла зварної ферми від довжини зварного шва

Тип вузла	Загальна довжина шва $l_{\text{шва}}$, мм	Поява тріщини N, циклів	Руйнування N, циклів	Допустимий срок експлуатації T, років
Типовий	600	1336	16315808	45,32
1	1960	958	19692341	54,7
2	2360	5106	24192456	67,2
3	3330	1310	34704906	96,4

За результатами комп'ютерного моделювання фасонкових конструкцій опорних вузлів зварної ферми отримано графічні залежності, подані на рис. 3.30, 3.31, які характеризуються залежність тріщиностійкості вузла від довжини зварного шва.

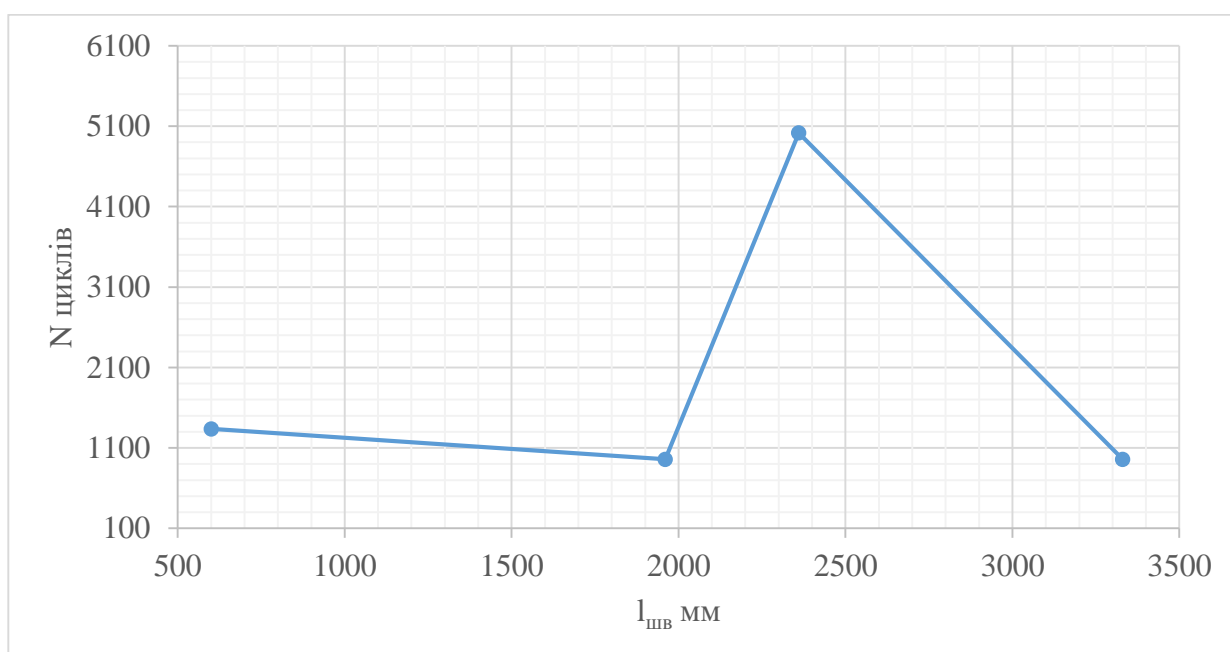


Рисунок 3.30 – Залежність періоду зародження тріщини від довжини зварного шва

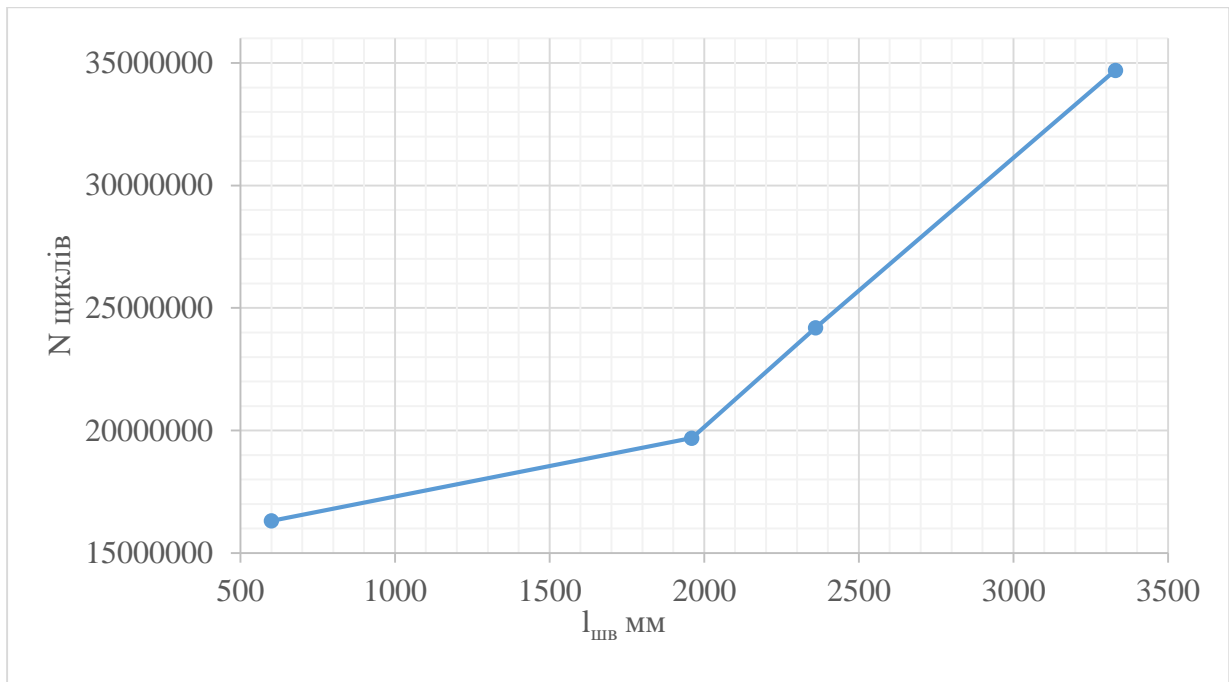


Рисунок 3.31 – Залежність довговічності вузла від довжини зварного шва

За рис. 3.30 не можна зробити однозначного висновку про вплив довжини зварного шва на період експлуатації до зародження тріщини.

За рис. 3.31 очевидно, що довговічність зварної ферми, яка експлуатується при циклічних навантаженнях, знаходиться в прямій залежності від довжини зварного шва. Така залежність практично наближається до лінійної.

Умови експлуатації задовольняють ферми з фасонками типу 2 і 3.

3.8 Висновок за розділом 3

1. Адаптовано методика комп'ютерного моделювання в середовищі SolidWorks для дослідження зварної ферми, яка експлуатується за умов циклічних навантажень.

2. Визначено, що локалізація максимальних напружень відбувається у зварних швах опорних вузлів.

3. За результатами досліджень не можна зробити однозначного висновку про вплив довжини зварного шва на період експлуатації до зародження тріщини.

4. Довговічність зварної ферми, яка експлуатується при циклічних навантаженнях, знаходиться в прямій залежності від довжини зварного шва.

5. Отримані в роботі результати доцільно використовувати для подальших наукових досліджень і в інженерній практиці для визначення конструктивних і технологічних параметрів зварних ферм, які експлуатуються при циклічних навантаженнях.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці при монтажі крокв'яних ферм

Для запобігання впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів застосовують засоби колективного та індивідуального захисту.

При монтуванні металоконструкцій найбільш поширені обмежуючі пристрої, переважно захисні та сигнальні загородження. Захисні загородження застосовуються, аби запобігти доступу сторонніх осіб на ділянки, де проводяться роботи. Щоб уникнути падіння людей з висоти, висоту захисних загороджень вибирають не менше 1,1 м. До колективних засобів захисту належать і знаки безпеки, які доносять необхідну інформацію про можливу небезпеку.

Щоб попередити падіння монтажників з висоти, а також для того, щоб упіймати предмети, які впали, застосовати захисні пристрої з синтетичними сітками, їх встановлюють як по периметру будівлі, так і через кожні 3 - 4 м по висоті будівлі.

Засоби індивідуального захисту при виконанні монтажних робіт найчастіше застосовують комбінезони з бавовняних тканин, які захищають від пилу, бруду, дрібних травм. Для захисту від вологи та атмосферних впливів використовують брезентові, бавовняні, прогумовані або просочені спеціальними сумішами комбінезони. Для роботи в зимовий час монтажникам видають ватяні куртки, брюки та валянки.

Під час монтажу металоконструкцій будівель та споруд повинна витримуватися певна послідовність встановлення конструктивних елементів у проектне положення. Порядок і послідовність монтування конструкцій обумовлюються у ПВР. Важливим заходом запобігання виробничому травматизму при монтажі є підготовка конструкцій до підйому на висоту.

Кроквяні та підкроквяні ферми монтують, використовуючи стропи і траверси. При виборі схеми стропування потрібна розрахункова перевірка елементів конструкцій на навантаження, які можуть виникнути на різних стадіях монтажних

робіт. Способи й місця стропування кроквяних та підкроквяних, а також ліхтарних ферм повинні бути вказані в ПВР (технологічних картах). Враховуючи, що під час підйому ферм у їхніх поясах та решітках можуть виникнути зусилля протилежного знака, перед підйомом бажано підсилити деякі елементи.

Після встановлення та закріплення ферми на колонах, але перед тим, як встановлювати зв'язки по верхньому поясу, необхідне тимчасове закріплення її за допомогою розтяжок та розпірок.

У багатьох випадках кроквяні ферми монтують блоками з двох або трьох ферм. Між фермами встановлюють розпірки, які сприймають зусилля стискування. При монтажі окремих конструкцій або блоків не допускається пересування по верхніх поясах кроквяних і підкроквяних ферм. Дозволяється пересування монтажників нижніми поясами цих конструкцій, якщо вздовж ферми натягнуто канат і вжито заходів, аби він не ослаблювався і не провисав. Для переходу між фермами слід користуватися пересувними містками з перилами. Всі роботи необхідно виконувати із застосуванням запобіжного пояса.

4.2 Протидія руйнуванню фермових конструкцій при аварійних ситуаціях

4.2.1 Основні причини аварій будівель і споруд

Статистика показує, що 80 % випадків аварій, що трапляються на будівництві з обваленням несучих конструкцій об'єкта, виникають у наслідок людських помилок, що допускаються при проектуванні, зведенні та експлуатації будівлі чи споруди. Ці помилки формують внутрішній (об'єктний) ризик аварій, від величини якого залежить тривалість експлуатації (ресурс) споруди. Крім техногенних факторів (вибухи, пожежі, транспортні аварії, падіння кранів, локальні перевантаження конструкцій, помилки проєктантів, недбалість будівельників та ін.), існують також і природні фактори (сейсміка, виникнення карстових провалів в основах будівель, зсуви, урагани і т. д.), через вплив яких можливе виникнення часткової або повної руйнації будівлі.

Зношення та пошкодження несучих конструкцій чи їх зв'язків і, як наслідок, зміна міцності, жорсткості елементів розрахункових схем призводять до зниження конструктивної безпеки споруди. При найгіршому поєднанні негативних обставин вони призводять до раптової відмови та прогресуючого обвалення.

Також відомо, що врахування та дотримання всіх вимог нормативних документів не забезпечує необхідний рівень надійності будівлі. Норми встановлюють лише мінімальний рівень безпечної експлуатації та довговічності конструкцій, використовуючи комплекс коефіцієнтів, що до теперішнього часу залишаються емпіричними. Фактично ці коефіцієнти забезпечують на стадії проектування конструкцій їх експлуатаційний ресурс. Настання аварійного стану будівлі чи споруди передбачає наявність зовнішньої причини техногенного (вибуху, пожежі, тощо) або природно-кліматичного характеру (землетрусу, урагану, цунамі, зсуву, селі тощо). Зовнішні причини при невигідному сполученні з внутрішніми причинами (дефект проектування і будівництва, деградації або не якісних матеріалів і т.д.) призводить до обвалення несучих конструкцій будівель і споруд. Діючи в даний час норми не передбачають «захист» у вигляді відповідних коефіцієнтів запасу і надійності, а в ід факторів ризику, пов'язаних з комбінованими аварійним впливами такого «захисту» не передбачено. [54].

4.2.2 Небезпека руйнування несучих конструкцій

Втрата окремими будівельними конструкціями своїх експлуатаційних якостей може приводити до появи і розвитку так званого ефекту «доміно» – послідовного залучення до розвитку процесу руйнування нових груп будівельних конструкцій аж до повного руйнування об'єкта. (рис. 4.1). Таке явище прогресуючого обвалення об'єктів при аварійних відмовах будівельних конструкцій розвивається в результаті комбінованої особливої дії на них робочого навантаження і додаткового навантаження від конструкцій, що втратили свої експлуатаційні якості.



Рисунок 4.1 – Аварії несучих конструкцій

Аварії будівельних конструкцій будівель і споруд створюють загрозу виникнення масштабних гуманітарних і екологічних катастроф. Проблема запобігання катастрофічним аваріям будівельних конструкцій в даний час актуальна і носить фундаментальний характер. Для України ця проблема має особливе значення, у зв'язку із значним зносом будівельних конструкцій основних фондів промислових і цивільних об'єктів.

4.2.3 Поведінка дослідження ферми при перевантаженні

Для будівель і споруд основним видом безпеки є конструкційна, що характеризує здатність несучого каркаса об'єкту чинити опір перевантаженням в надзвичайних ситуаціях і трактується відсутністю в ньому недопустимого ризику аварії.

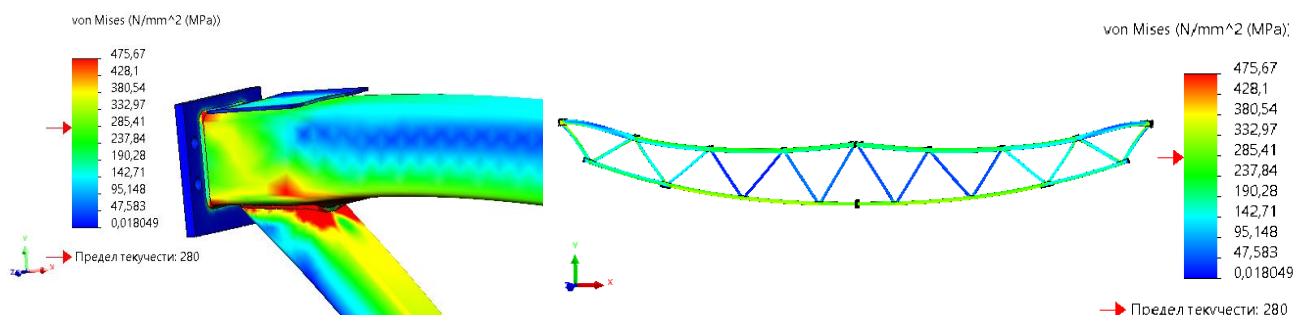


Рисунок 4.2 – Візуалізація перевантаженої ферми при дії статичних навантаження.

Як видно з візуалізацій що при перевантаженні фермових конструкцій виникає локалізація напруження в вузлах ферми, яка призводить до руйнування вузлів так і конструкцій в цілому та всієї будівлі. Фізичною основою процесу руйнування зварних ферм є процес накопичення пошкоджень і деформацій, що розвивається в часі, в структурних елементах.

Тому для уникнення аварійних ситуацій потрібно уникати перевантаження фермових конструкцій різноманітними інженерно-технічними засобами та при експлуатації конструкцій контролювати вантажопідйомність кранів та не допускати накопичування снігового мішка на покрівлі будівлі, оскільки в більшості випадків перевантаження несучих конструкцій - це основний чинник руйнувань будівель.

4.2.4 Попередження руйнуванню досліджуваних ферм

Аварії будівельних конструкцій рідко відбуваються раптово. Зазвичай можна спостерігати ряд передвісників аварії. Якщо своєчасно відмітити ознаки аварії, що наближається, то можна вчасно прийняти профілактичні заходи: вивести людей з небезпечної зони, виробити розвантаження аварійної конструкції, встановити тимчасові кріплення і тому подібне.

Для попередження руйнування ферми слід дотримуватися таких рекомендацій:

1. Періодично обстежувати несучі конструкції для виявлення локальних пошкоджень та усунення їх.
2. Не допускати перевантаження технологічного обладнання яке впливає на несучі конструкції будівлі чи споруди
3. Періодично очищати покрівлю від снігового покриву та снігових мішків..
4. Дотримуватися правил протипожежного захисту.
5. Та інших рекомендацій по експлуатування промислових будівель.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Вибрано одну типову зварну ферму для дослідження.
2. Виконано проектний розрахунок зварної ферми з використанням існуючих інженерних методик.
3. Визначено параметри НДС в конструктивних елементах ферми і у вузлових зварних з'єднаннях.
4. Визначено довговічність конструкції для прийнятих навантажень.
5. Змінюючи параметри зварних швів для вузла ферми, де формуються найвищі параметри НДС, досліджено їх вплив на тріщиностійкість досліджуваної конструкції.
6. Надано рекомендації щодо практичного застосування результатів роботи.

БІБЛІОГРАФІЯ:

1. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: – К.: Укрархбудінформ, 2009. – 37 с.
2. ДБН В-2.6-163:2010 Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу : – К.: Укрархбудінформ, 2009. – 206 с.
3. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування, : К., Мінрегіон України, – 2014, 128 с.
4. 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.
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. Ковальчук Я. О. Фізичне моделювання втомного пошкодження зварної ферми / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера // Матеріали ХІХ наукової конференції ТНТУ ім. Ів. Пулюя, 18-19 травня 2016 року – Т. : ТНТУ, 2016 – С. 143. – (Матеріалознавство, міцність матеріалів і конструкцій, будівництво).
7. 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.
8. Ковальчук Я.О. Тримка здатність будівельної підкроквяної зварної ферми при дії статичних навантажень / Я.О.Ковальчук, Н.Я. Шингера // ХVІ наук. конф. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 5–6 груд. 2012р. : тези доп. – Т. ІІ, Тернопіль, 2012. – С. 88.

9. 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.

10. 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.

11. Ковальчук Я. О. Моделювання напружено-деформівного стану кроквяної 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).

12. Ковальчук Я.О. Моделювання НДС зварної кроквяної 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

13. Ковальчук Я. О. Моделювання поведінки зварної кроквяної 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).

14. Кіндрат Ю. І. Тримкість зварних підкроквяних ферм із трубчастих елементів / Ю. І. Кіндрат, Я. О. Ковальчук // Збірник тез доповідей VII 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.

15. 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).

16. 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).

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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).

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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

34. 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).

35. 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).

36. 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).

37. 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.

38. 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).

39. 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).

40. 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. – № u 2017 11594 ; заявл.27.11.2017 ; опубл. 10.04.2018, Бюл. №7.

41. 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. – № u 2018 08345; заявл.30.07.2018 ; опубл. 25.01.2019, Бюл. №2.

42. Пічугін С.Ф. Визначення напружено-деформованого стану вузла сталевій 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.

43. 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.

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

45. 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.

46. 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 замкнутых профилей // Металеві конструкції. – Том 4. - №1. - 2001. – С. 55-59.

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

48. Зинькова В.А. Методика експериментальних досліджень узлових соединений трубчатых элементов фермы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2012. - № 1. - С. 50-52.

49. 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.

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

51. 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.

52. 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.

53. 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..

54. Проблеми протидії конструкцій прогресуючому обваленню будівель та споруд : монографія / В. М. Першаков, М. С. Барабаш, А. О. Белятинський, К. М. Лисницька. – К. : НАУ, 2015. – 456 с.