

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **Дослідження сталеві балки, підсиленої методом
збільшення її січення із застосуванням зварювання**

Виконав: студент групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Худзей Артем Вадимович
(Прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент Коруняк Петро Степанович
(Прізвище та ініціали)

Львів-Дубляни 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

Освітній ступінь «Магістр»
Спеціальність 133 - Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
Машинобудування
(назва кафедри)

(підпис)
професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(прізвище та ініціали)

“ ____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Худзею Артему Вадимовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження сталеві балки, підсиленої методом збільшення її січення із застосуванням зварювання

Керівник роботи _____
к.т.н., Коруняк Петро Степанович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЛНУП від 28 лютого 2025 року №140/к-с

2. Строк подання студентом роботи до “ ____ ” _____ 20__ року

3. Вихідні дані до робіт: довідкова література, характеристики прокатних та складних металевих балок та металоконструкцій, робочі креслення та схеми металоконструкцій на основі двотаврових балок, типові технології виготовлення балок з прокату та зварювання металоконструкцій, методики

розрахунку та перевірки балочних конструкцій на міцність та витривалість, програмне забезпечення Solidworks, методики аналізу металоконструкцій в Solidworks Simulation, інструкції з охорони праці та інші довідкові джерела.

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

4.1. Аналіз технології виготовлення, експлуатації та способів підсилення зварних сталевих балок; 4.2. Теоретичне дослідження балки; 4.3. Методика та результати експериментальних досліджень; 4.4. Охорона праці; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу:

Графічні матеріали до роботи виконати у вигляді презентації в середовищі PowerPoint обсягом 10-12 листів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		Завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3	Коруняк П.С. доц. каф. машинобудування			
4	Городецький І.М. доц. каф. інженерної механіки			

7. Дата видачі завдання “ ____ ” _____ 20__ року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Аналіз технології виготовлення, експлуатації та способів підсилення зварних сталевих балок	18.04.25	
2	Теоретичне дослідження балки	20.06.25	
3	Методика та результати експериментальних досліджень	05.09.25	
4	Охорона праці	31.10.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	21.11.25	
6	Оформлення графічної частини	15.12.25	

Студент

_____ Худзей А. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Коруняк П. С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Худзей А. В. «Дослідження сталеві балки, підсиленої методом збільшення її січення із застосуванням зварювання». / Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Гжицького, 2025. 66 с.

Проведено аналіз конструкцій та технологій виготовлення зварних сталевих балок. Розглянуто способи їх підсилення з метою збільшення несучої здатності. Проведено теоретичний аналіз та порівняльні розрахунки двотаврової та підсиленої шляхом приварювання додаткової полоси балки під дією навантаження. Визначено можливість збільшення її зорсткості та несучої здатності. Запропоновано варіанти конструктивних схем підсилення балки. Розроблено методику та проведено дослідження підсилених балок в середовищі Solidworks Simulation та обґрунтовано оптимальну схему підсилення двотаврової балки. Розглянуто питання охорони праці під час виконання зварювально-монтажних робіт.

Табл. 7; рис. 26; бібліогр. джерел 25; дод. 4.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ, ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА СПОСОБІВ ПІДСИЛЕННЯ ЗВАРНИХ СТАЛЕВИХ БАЛОК	7
1.1 Аналіз пошкоджень сталевих металоконструкцій	7
1.2 Особливості посилення сталевих конструкцій	11
1.3 Аналіз технології виготовлення зварних балок	13
1.4 Конструктивні особливості балочних металоконструкцій	15
1.5 Аналіз методу підсилення металевих балок шляхом збільшення їх перерізу	20
1.6 Застосування зварювання для підсилення балок	25
Висновки за розділом	32
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК	33
2.1 Теоретичне обґрунтування роботи двотавра на згин	33
2.2 Дослідження напружено-деформованого пружного стану балки	35
2.3 Дослідження напружено-деформованого пружно-пластичного стану балки	38
2.4 Дослідження напружено-деформованого пластичного стану балки	21
2.5 Теоретичне обґрунтування роботи на згин двотавра, посиленого смугою, прикріпленою до нижньої полиці зварюванням	40
2.6 Розрахунок зварного з'єднання	42
Висновки за розділом	44
3 МЕТОДИКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	45
3.1 Програма експериментальних досліджень	45
3.2 Характеристики об'єкта досліджень	45
3.3 Методика дослідження сталевої балки за допомогою програмного модуля Solidworks Simulation	48
3.4 Результати дослідження розмірно-вагових характеристик балки	52

3.5	Дослідження міцнісних характеристик балок	54
	Висновки за розділом	56
5	ОХОРОНА ПРАЦІ	57
5.1	Аналіз вимог техніки безпеки під час зварювальних робіт	57
5.2	Моделювання виникнення небезпечних ситуацій та їх наслідків	59
	Висновки за розділом	62
	ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	63
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	64
	ДОДАТКИ	67

ВСТУП

Актуальність теми дослідження полягає в тому, що в даний час розвиток галузі машинобудування, і сфери виготовлення зварних металоконструкцій зокрема, нерозривно пов'язаний з реконструкцією, розширенням та технічним переозброєнням виробництва. У процесі експлуатації будівель, споруд та інших технічних об'єктів часто виникає необхідність посилення металевих прокатних та складних балок.

Посилення балок може проводитися різними способами. До них належать зміна розрахункової схеми конструкції, введення додаткових елементів, збільшенням їх перерізу.

Питанням посилення сталевих балок шляхом збільшення перерізу приділяється значна увага. науковцями досліджувалися ефективність схем підсилення, технологічні аспекти кріплення посилюючих елементів. Однак, відносно невідомими є питання вибору оптимальної схеми підсилення балки з точки зору її розмірних, масових та міцнісних характеристик.

Мета досліджень – отримання інформації про вплив схеми підсилення зварної сталеві балки на її несучу здатність.

Завдання:

1. Аналіз технологій виготовлення, експлуатації та способів підсилення зварних сталевих балок.
2. Теоретичне обґрунтування роботи балок.
3. Розробка варіантів та схем підсилення зварної двотаврової балки.
4. Експериментальне дослідження роботи балок, підсилених методом збільшення їх січення за рахунок приварювання додаткових елементів.
5. Аналіз одержаних результатів.

Предметом дослідження є аналіз стану підсилюваних балок під статичним навантаженням.

Об'єкт дослідження – сталева зварна балка двотаврового перерізу.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ, ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА СПОСОБІВ ПІДСИЛЕННЯ ЗВАРНИХ СТАЛЕВИХ БАЛОК

1.1. Аналіз пошкоджень сталевих металоконструкцій

Експлуатація сталевих конструкцій протягом тривалого часу призводить до фізичного та морального зношування, виникає необхідність пристосовувати існуючі конструкції до нових умов роботи, викликаних реконструкцією, збільшенням навантажень, надбудовою. На роботоздатність сталевих конструкцій та терміни їхньої служби мають вплив дефекти, відхилення якості, форми та фактичних розмірів їх елементів, конструкцій та вузлів з'єднань від вимог нормативних документів або проекту, а також пошкодження, які виникають у процесі експлуатації та можуть розвиватися і надалі, що призводить до відмов у роботі усієї конструкцій.

Пошкодження сталевих конструкцій, які вони можуть отримувати в процесі експлуатації, можуть бути наступними:

- спричинені силовими впливами: втрата стійкості, тріщини, розриви. Вони виникають внаслідок помилок, допущених під час проектування, зменшення перерізів елементів при їх виготовленні, недоброякісного монтажу конструкцій, збільшення навантажень від технологічного обладнання понад проектні, перевантаження покриттів від снігу тощо. Розглянуті ушкодження найчастіше з'являються внаслідок статичного навантаження окремих конструкцій, а також від динамічних та вібраційних впливів, які виникають від робочого обладнання, встановленого з порушенням технологічних норм проектування. Перевантаження конструктивних елементів каркасів може виникнути внаслідок послаблення їх окремих елементів. Це може статися, якщо в елементах несучих конструкцій прорізаються отвори, зрізуються окремі елементи гратчастих конструкцій.

- під дією механічних впливів: викривлення, загнули, вм'ятини, стирання. Вони виникають внаслідок неправильного транспортування та

монтажу конструкцій, неправильного транспортування різних вантажів як мостовими кранами, так і внутрішньоцеховим та автомобільним транспортом, підвішування до конструкцій важких деталей під час ремонту обладнання, порушень правил технічної експлуатації [1, 11];

- під дією фізичних впливів: крихкі тріщини при значних мінусових температурах, руйнування при високих температурах, короблення. Виникають такі дефекти внаслідок близького розташування елементів конструкцій до джерел тепловиділення, за умови впливу мінусових температур на вуглецеві сталі з підвищеним вмістом фосфору та сірки;

- спричинені хімічним впливом: корозія металу, яка виникає від вологості навколишнього середовища або від агресивних рідин та газів. Корозія може бути місцева, коли під впливом місцевих агресивних факторів уражаються окремі вузли або частина конструкції на ділянках порівняно невеликої довжини, і рівномірна, коли конструкції однаково руйнуються по всій поверхні на значній довжині. Ступінь агресивного впливу газових середовищ визначається їх видом, концентрацією, температурою та відотною вологістю повітря, а також швидкістю обміну агресивного середовища. Швидкість корозії в повітряному середовищі з відотною невисокою вологістю порівняно невелика і знаходиться в межах 0,05...0,07 мм на рік. Така корозія безпечна, оскільки товщини елементів сталевих конструкцій до кінця терміну їхньої експлуатації зменшуються незначно. Швидкість корозії в повітряному середовищі в несприятливих умовах протікає швидше і може досягає до 0,1 мм і більше на рік. Така корозія небезпечна для металоконструкцій, оскільки вона значно зменшує їх товщини та площі перерізів, внаслідок чого вони швидко виходять з ладу. Ступінь агресивного впливу рідких середовищ залежить від їх виду, концентрації та температури, а для розчинів кислот, лугів та солей ще й від водневого показника (pH). Ступінь агресивності твердих середовищ залежить від їх виду, інтенсивності та гігроскопічності агентів, а також від вологості повітря [11].

Оцінка ступеня конкретних ушкоджень проводиться за допустимими відхилення на відповідні дефекти, регламентованими нормами.

При підсиленні металевих конструкцій враховуються такі особливості:

- висока однорідність матеріалу, що зумовлює високий ступінь відповідності роботи елементів та вузлів розрахунковими передумовами та, відповідно малі запаси міцності, закладені під час проектування. В результаті, незначне відхилення від розрахункових положень, порушення необхідної точності у виготовленні, монтажі, невеликі навантаження можуть призвести до суттєвих перенапружень елементів металевих конструкцій;

- висока питома міцність (відношення міцності до маси матеріалу) зумовлює тонкість і гнучкість несучих елементів, а отже, схильність піддаватися різним випадковим впливам під час їх виготовлення, перевезення, монтажу, експлуатації, а саме різного роду деформаціям, які особливо небезпечно для стиснених елементів;

- схильність до крихкого та втомного руйнування за наявності різних концентратів напружень, особливо тріщин у поєднанні з низькими температурами та динамічними навантаженнями;

- наявність зварних з'єднань, які мають відмінні від основного металу фізико-механічні властивості та характеризуються значним розкидом експлуатаційних властивостей залежно від якості накладання зварних швів [1].

Вивченням та аналізом причин утворення пошкоджень інженерних споруд займались різні вчені [1, 11, 12, 15, 17, 23]. За їх даними можна класифікувати три основні групи аварій в металоконструкціях:

- 1 - аварії, спричинені природними явищами;
- 2 - аварії, спричинені недосконалістю інженерно-технічних прийомів;
- 3 - аварії, спричинені соціально-економічними умовами.

Технічні причини руйнувань металоконструкцій можна розділити також на три групи:

- а - втрата стійкості;
- б - дефекти основи;

в - погане виконання робіт.

Також класифікувати причини руйнування металевих конструкцій можна, розділивши їх на такі групи:

- викликані дефектами, пов'язані з помилками проектування;
- викликані дефектами, що виникли у процесі виконання робіт;
- викликані дефектами, пов'язані з експлуатацією;
- викликані недостатньо вивченими умовами робіт та властивостями застосовуваних матеріалів.

Надійність металоконструкцій залежить від багатьох таких чинників, як марки матеріалу, перерізу, форми елементів, якості виготовлення та монтажу, умов експлуатації, своєчасного ремонту.

Основними способами підсилення сталевих конструкцій є:

- зміна конструктивної схеми всього каркасу чи окремих елементів;
- регулювання напружень;
- збільшення площі поперечного перерізу окремих елементів конструкції;
- посилення з'єднуючих елементів;
- підведення конструкцій розвантаження.

Як правило, підсилення металоконструкцій проводять не одним із перерахованих способом, а шляхом їх поєднанням. Вибір найбільш ефективного рішення доцільно проводити через порівняння проектних варіантів із урахуванням умов проведення робіт.

Необхідність посилення обумовлюється факторами, які перешкоджають продовження нормальної експлуатації конструкцій:

- наявністю неприпустимих дефектів та пошкоджень на стадії проектування, виготовлення, транспортування та монтажу, в процесі експлуатації, які не дозволяє забезпечити вимоги міцності, стійкості, холодостійкості чи витривалості;
- експлуатаційним зношуванням, включаючи корозійне зношування;
- зміною умов експлуатації.

Останнім часом через падіння виробництва технічний нагляд за станом конструкцій не проводився на багатьох підприємствах. Аварійність конструкцій є різна. Основними виробничими причинами, які її спричинили, були недоліки будівництва, проектування та експлуатації. Понад 50 % усіх аварій трапляється в термін до одного року експлуатації або під час будівництва через недотримання норм і проектів або поганої якості виготовлення та монтажу.

1.2. Особливості посилення сталевих конструкцій

Виконання робіт з підсилення металоконструкцій вимагає витрат і, як правило, неминучими є деякі обмеження технологічного процесу. Тому посилення або відновлення проектної несучої здатності є крайніми засобами, коли цих цілей не можна досягти ні за рахунок виявлених резервів несучої здатності, ні шляхом зменшення постійних чи тимчасових навантажень. Вибір оптимального варіанта здійснюють на підставі кількох конкурентоспроможних варіантів з урахуванням технологічності виробу.

Посилення може бути:

- аварійним, виконується в екстремальних ситуаціях для термінового відновлення несучої здатності шляхом використання найпростіших методів, розрахованих на короткий термін експлуатації до капітального відновлення;
- тимчасовим, яке здійснюється, якщо необхідно забезпечити у плановому порядку нормальну експлуатацію конструкції до капітального посилення;
- капітальним, яке застосовується для вирішення завдань при реконструкції будівель та споруд;
- перспективним, коли на конструкцію в період експлуатації передбачаються збільшення технологічних навантажень та інші зміни умов експлуатації.

Способи підсилення розрізняють за ступенем навантаженості на даний момент посилення:

- під навантаженням, який є найбільш складним та відповідальним видом посилення. Він вимагає детального обстеження існуючої конструкції, надійної оцінки її напруженого стану та спеціальних прийомів підсилення, які дозволяють включити елементи посилення в існуючу роботу конструкції;

- з частковим розвантаженням – це найбільш поширений спосіб, який передбачає відсутність під час посилення тимчасового навантаження, наприклад снігового, кранового, технологічного тощо;

- з повним розвантаженням – це спосіб з повним зняттям тимчасового навантаження, який застосовується при аварійно-відновлювальних роботах або для конструкцій, основною яких є корисне (тимчасове) навантаження [2].

Класифікацію способів підсилення наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Класифікація способів підсилення металоконструкцій

Під навантаженням; З частковим навантаженням; З повним розвантаженням	Зміна умов експлуатації та непряме посилення	Використання резервів несучої здатності
		Обмеження роботи технологічного обладнання, заміна його на нове з меншою масою
		Заміна існуючих огорожувальних конструкцій на інші з меншою масою
		Підведення додаткових проміжних несучих конструкцій
	Зміна схеми конструкції	Підведення додаткових зв'язків, ребер, діафрагм, розподільчих елементів
		Підведення додаткових опор або підвісок
		Замонолічування опор
		Введення нових стрижневих елементів для зміни статичної схеми
		Введення шарнірів
		Введення стяжок у розпірні системи

Продовження таблиці 1.1

	Штучне регулювання напружень	Попереднє напруження
	Збільшення площі перерізу	Постановка додаткових елементів посилення схеми
	Посилення з'єднань	Збільшення катета та довжини зварних швів
		Постановка нових болтів, заміна заклепок болтами у з'єднаннях
	Підвищення холодостійкості	Деконцентрація
	Підвищення ресурсу з витривалості	Постановка ламелів

1.3. Аналіз технології виготовлення зварних балок

Для виготовлення металоконструкцій важливу роль відіграє такий конструктивний елемент, як балка. Балка – це лінійний елемент несучих конструкцій, який спирається на обидва кінці і працює переважно на згин. За способом кріплення металева балка може бути у вигляді горизонтального чи похилого бруса.

Основним перерізом балок є двотавр. Двотаври можуть бути прокатні та збірні.

Прокатні двотаври виготовляються на спеціальних прокатних станах.

Виготовлення двотаврової балки здійснюється за кілька етапів. Спочатку сталевий лист розрізають на смуги необхідної довжини та ширини. На фрезерному верстаті обробляють кромки для кращого проварювання шва. Заготовку затискають та позиціонують на спеціальному гідравлічному стані.

Наступним етапом є зварювання двотавра. За допомогою автоматів проварюються поясні шви, а ребра жорсткості приварюються вручну, іноді напівавтоматом [15].



Рисунок 1.1 – Схема процесу виготовлення зварної балки

У випадках, коли поясні шви зварюють вручну, процес складання зазнає змін. До пояса нижньої частини балки прикріплюють вертикальну стінку, а вже потім ребра жорсткості. Їх затискають та монтують пояс у верхній частині. Вся конструкція фіксується хомутами та приварюється.

Для подальшого кращого нанесення лакофарбового покриття, готовий виріб обробляється дробоструминною установкою, яка видаляє бруд, іржу, масляний наліт.

Кожна балка складається зі стінок та полиць, які з'єднуються спеціальними зварними швами. Залежно від різновиду їх конструкція може змінюватись.

Процес виготовлення виконується у кілька технологічних етапів (рис.).

Для кожного виду та процесу обробки є свій стандарт, який регламентує усі основні показники та характеристики балок. Параметри, які суворо контролюються та перевіряються у готовій продукції це:

- вага готового виробу;
- площа поперечного перерізу;

- висота та ширина готової продукції;
- радіус закруглень після зварювання;
- кут нахилу граней.

В умовах виробництва виділяють три основні різновиди сталевих балок:

- таврові – це металопрокат із основним перетином у вигляді літери «Т»;
- двотаврові – так як елемент має додаткову полицю з протилежного боку,

він стає більш жорстким, і відповідно більш міцним;

- швелер – це металопрокат із основним перетином у вигляді літери «П».

Дана конструкція також універсальна і має безліч сфер застосування в промисловості.

1.4. Конструктивні особливості балочних металоконструкцій

В побудові металоконструкцій основним типом перерізу металевих балок є двотавровий симетричний. Двотавровий перетин вигідніший, оскільки в цьому перерізі розподіл матеріалу найкраще відповідає розподілу нормальних напружень від вигину балки. Тому металеві балки конструюють головним чином двотаврового перерізу, чому сприяє хороша робота металу на дотичні напруження. Це дозволяє робити стінку балки досить тонкою.

Враховуючи залежності від навантаження та прольоту в металоконструкціях застосовують балки прокатні та збірні. Збірні балки можуть бути зварні та клепані [15].

Класифікація балок за типом стінки показано на рис. 1.2:

- суцільна;
- перфорована отворами;
- перфорована розрізкою та наступним зварюванням стінки прокатного двотавра;
- попередньо напружена.

Перфоровані балки погано сприймають поперечні сили. Їх застосовують в конструкціях з великими прольотами та відсутності зосереджених

навантажень. Періодична зміна перерізу сприяє концентрації напружень. Порівняно з прокатними двотаврами в них знижується витрата матеріалу на 25...30%, а порівняно зі зварними знижується трудомісткість виготовлення на 25...35%. У штучному виконанні вони неефективні, тому що трудомісткі та енергетично витратні. Їх переваги виявляються лише в умовах високоомеханізованого поточного виробництва.

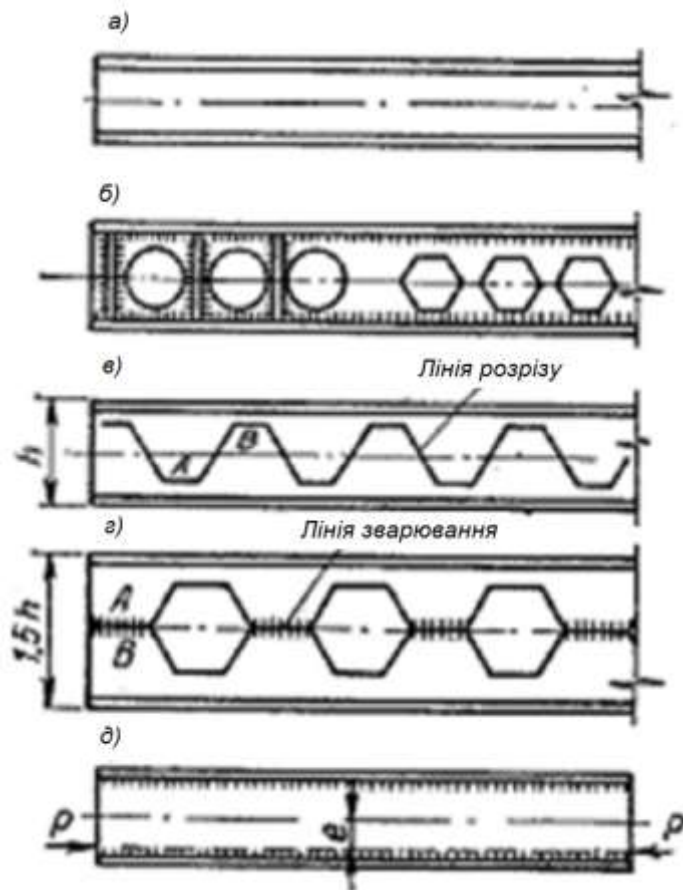


Рисунок 1.2 - Класифікація балок за типом стінки

а - суцільна; б - перфорована отворами;
в, г - перфорована розрізуванням та наступним зварюванням стінки
прокатного двотавра; д - попередньо напружена

Поділ на типи балок двотаврового перерізу відбувається з огляду на умови їх застосування та співвідношення розмірів. Виділяють три основні типи:

- нормальні двотаври – Б;
- широкополічні двотаври – Ш;

– колонні двотаври – К.

Довідкові величини, які поширюються на сталеві гарячекатані двотаври з паралельними гранями полиць заввишки 100 – 1000 мм та шириною 55 – 400 мм, а саме розміри, площі поперечного перерізу, лінійна щільність наведені в [7].

Контроль якості граничних відхилень за розмірами та геометричній формі двотаврів ведеться згідно [10]. Проведення контролю якості за граничними відхиленнями по довжині профілю мірної та кратно мірної довжини повинні відповідати значенням, наведеним у табл. [7].

Важливим пунктом є відстань, на якій проводиться перевірка, яка становить не менше 500 мм від торця профілю. Вимірювання висоти профілю проводиться по осі – Y-Y.

Таблиця 1.2 - Граничні відхилення по довжині профілів згідно з [7].

Довжина профілю, мм	Інтервал значень параметрів, мм	Граничне відхилення, мм
До 12 000 включно	$h < 790$	+60
	$h \geq 790$	+80
Понад 12000		+100

Поперечний двотавровий перетин має відповідати [7].

Перетин звичайного двотавра показано на рис. 1.3.

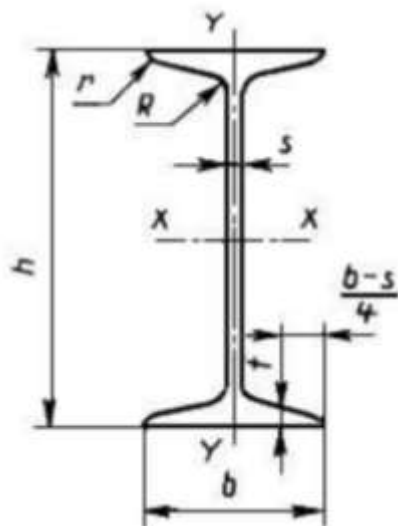


Рисунок 1.3 – Поперечний переріз двотаврового типу

h - висота двотавра; b - ширина полиці; s - товщина стінки; t - товщина полиці; r - радіус сполучення

Металеві балки класифікують за робочою схемою:

- однопрогонові (розрізні);
- багатопрогонові (нерозрізні);
- консольні (з однією опорою у вигляді защемлення).

Частіше з все в металоконструкціях застосовуються однопрогонові розрізні балки. Вони найбільш зручні у виготовленні та монтажі в порівнянні з багатопрольотними. Однак за витратою металу вони менш вигідні, ніж нерозрізні та консольні.

Нерозрізні балки, завдяки наявності опорного моменту, зменшують основні моменти в прольотах, економічніші за витратою матеріалу. Їх велика чутливість до змін температури та усадки опор, а також необхідність робити крайні прольоти меншими за середні для збереження сталості перерізу, роблять такі конструкції балок індивідуальними, немасовими, а їх застосування відносно рідкісним [15].

Основний недолік консольних балок є великі прогини. Найбільший прогин консолі виявляється у 9...16 разів більше, ніж у аналогічній розрізній балки. Економія матеріалу досягається за рахунок того, що момент, який діє у розрізній балці, в аналогічній нерозрізній балці розподіляється між перерізами в прольоті та на опорах.

Розрахунок елементів, які піддаються згинанню, ведеться як за першою групою граничних станів (в'язке або втомне руйнування, втрата стійкості, текучість матеріалу), так і за другою (досягнення граничних переміщень). Для балки це, як правило, прогин у середині прольоту або на кінці консолі, віднесені відповідно до довжини прольоту балки чи консолі.

У пружній області роботи матеріалу граничний стан згинального елемента визначається досягненням максимальними нормальними або дотичною напруженнями граничних значень хоча б в одній точці перерізу. За граничні значення при цьому приймають для нормальних напружень основний розрахунковий опір розтягу, стиску або згину R_y , а для дотичних напружень –

розрахунковий опір зрізу R_s , які використовують у розрахунках з поправкою на умови роботи [23].

Розрахункові зусилля в перерізі балки – це згинальний момент $M_{\max}$ та поперечна сила $Q_{\max}$.

Балки поділяються на три класи залежно від напружено-деформованого стану (НДС) розрахункового перерізу:

1-й клас - працюють в пружній стадії (напруження по всій площі перерізу не перевищують розрахункового опору сталі);

2-й клас - працюють в пружнопластичній стадії (в одній частині перерізу напруження менші R , а в іншій - рівні R_y);

3-й клас - працюють в пластичній стадії (по всій площі перерізу напруження рівні R - утворюється так званий пластичний шарнір).

Клас напруженого стану перерізу при проектуванні слід призначати в залежності від допустимих пластичних деформацій, доцільних розмірів перерізу елемента в цілому, товщини стінок і поясних листів. Слід враховувати призначення конструкції, характер навантажень та впливів, небезпеки крихкого руйнування, агресивність середовища, конструктивні обмеження, ступінь вогнестійкості та інші фактори.

У згинальних елементах в пружній стадії повністю навантаженими в граничному стані виявляються лише крайні волокна, а середні недовантажені, що показано на рис. 1.4. Поява текучості матеріалу в фібрових зонах елемента не призводить до вичерпання його несучої здатності, оскільки зростання напружень обмежено межею текучості, а в глибині перерізу, де тільки пружні деформації, напруження залишаються пропорційні деформаціям і менші межі текучості [16]. Частина перерізу, де деформації та відповідно напруження не перевищують граничних значень утворює пружне ядро, в якому відсутня текучість, а, отже, прогин балки має кінцеве значення.

По мірі зростання моменту деформації збільшуються, пружне ядро, де напруження менше межі текучості зменшується. Повне вичерпування несучої здатності елемента настане, коли відбувається пластифікація всього перерізу,

при якому по всій його висоті напруження дорівнюють межі текучості. У розглянутому двотавровому перетині утворюється умовний пластичний шарнір. На практиці руйнування металевих балок відбувається завжди у пружнопластичній стадії.

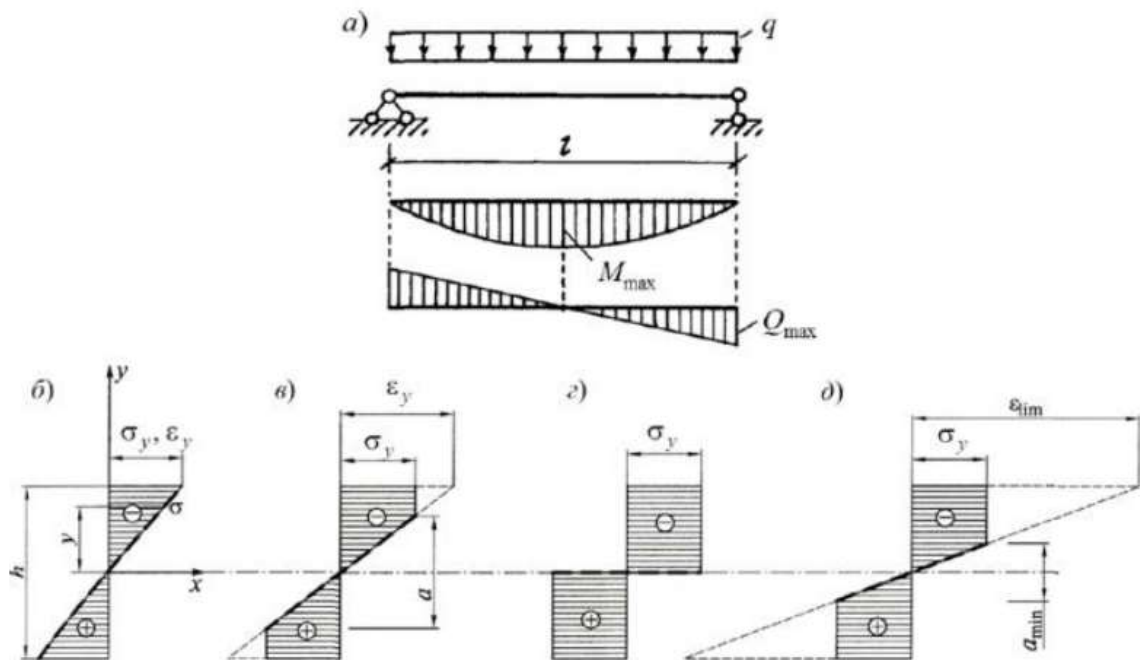


Рисунок 1.4 – Три класи роботи згинального елемента

Для розрізних балок із сталі з межею текучості до 530 МПа, які несуть статичне навантаження, допускається робота з урахуванням обмеженого розвитку пластичних деформацій, що також дозволяє скоротити витрату сталі.

1.5. Аналіз методу підсилення металевих балок шляхом збільшення їх перерізу

При недостатній несучій здатності окремих елементів балкових конструкцій провадиться їх посилення. При посиленні металевих конструкцій необхідно виконати розвантаження щонайменше 60 % чи встановити тимчасові додаткові опори.

Відповідно до [12] виділяють такі способи посилення металевих конструкцій:

- збільшення перерізів елементів;
- зміна конструктивної схеми;
- встановлення додаткових зв'язків, ребер, діафрагм, розпорок;
- підведення нових додаткових конструкцій чи елементів;
- посилення з'єднань елементів;
- попереднє напруження конструкцій.

Посилення проводиться за допомогою встановлення додаткових деталей, внаслідок чого збільшуються розрахункові перерізи конструкцій або їх елементів, а також ліквідуються дефекти та пошкодження або їх наслідки.

При посиленні конструкцій способом збільшення перерізів рекомендується використовувати метал у вигляді листового, сортового та фасонного прокату. Даний спосіб підсилення застосовується при поточному та капітальному ремонті несучих конструкцій, а також за необхідності збільшення несучої здатності конструкцій у зв'язку із збільшенням навантажень на них внаслідок виникаючих реконструкцій.

Вибір марок сталі для елементів посилення необхідно проводити в залежності від значущості підсилюваної конструкції або її елементів, умов експлуатації та товщини застосовуваного прокату, керуючись вказівками щодо застосування сталі для сталевих конструкцій, зазначених у [7].

Граничний рівень початкового напруження при підсиленні за допомогою зварювання залежно від класу конструкцій представлено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Граничний рівень початкового напруження при підсиленні за допомогою зварювання залежно від класу конструкцій

Номер групи, до якої належить металоконструкція	Граничний рівень початкових напружень
1 група	$\sigma_{\max} \leq 0,2 R_y$
2 група	$\sigma_{\max} \leq 0,4 R_y$
3 група	$\sigma_{\max} \leq 0,6 R_y$
4 група	$\sigma_{\max} \leq 0,8 R_y$

Під час конструювання та розрахунку підсилення елементів необхідно дотримуватись таких вимог:

- необхідно, щоб елементи підсилення перерізу присднувалися таким чином, щоб центри тяжкості збігалися (розцентрування не більше 5%). Якщо умова не дотримується, то необхідно враховувати додаткові згинальні моменти від розцентрування;
- необхідно забезпечити надійне включення до спільної роботи з основним перетином;
- при підсиленні конструкцій необхідно враховувати послідовність включення елементів;
- якщо елементи підсилення юазуються на зварюванні, необхідно застосовувати флангові шви виключаючи використання швів в поперек елементів;
- під час розрахунку під навантаженням на стійкість необхідно враховувати початкові та допустимі деформації елементів, які виникають на стадії підсилення;
- з метою забезпечення несучої здатності існуючу конструкцію в період виконання підсилення та повного включення елементів у спільну роботу з основним перетином обмежується величина найбільших напружень у розрахунковому перерізі.

Якщо зазначені умови не виконуються, то потрібна додаткове розвантаження чи підведення тимчасових опор.

Деякі варіанти конструктивних схем посилення сталевих балок наведено на рис. 1.5.

Під час виконання підсилення центрально-розтягнутих та стиснутих металевих конструкцій слід прагнути до збереження центрування посилюваних елементів та вузлів з'єднань, тобто додаткові елементи необхідно розташовувати так, щоб положення центру тяжіння елемента після підсилення не змінювалося або проводити перевірку міцності підсиленого елемента з урахуванням ексцентриситету.

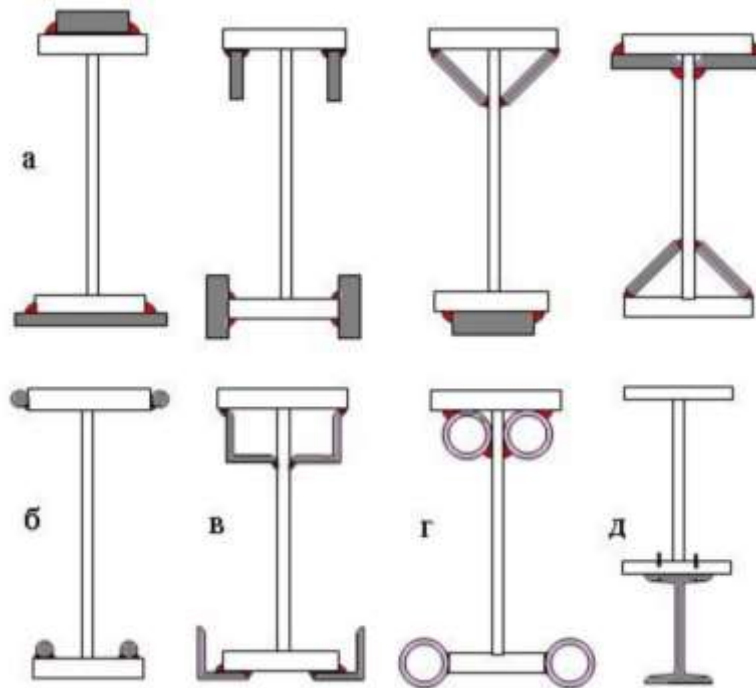


Рисунок 1.5 – Підсилення сталевих балок збільшенням їх поперечного перерізу із застосуванням:

а – пластин; б - стрижнів; в – кутників

При підсиленні згинальних елементів найбільш раціональним по витратах сталі є схеми, представлені на рисунку 1.6, які передбачають симетричне або близьке до симетричного підсилення з розташуванням підсилюючих елементів якомога далі від центру тяжіння перерізів елемента, який підсилюється.

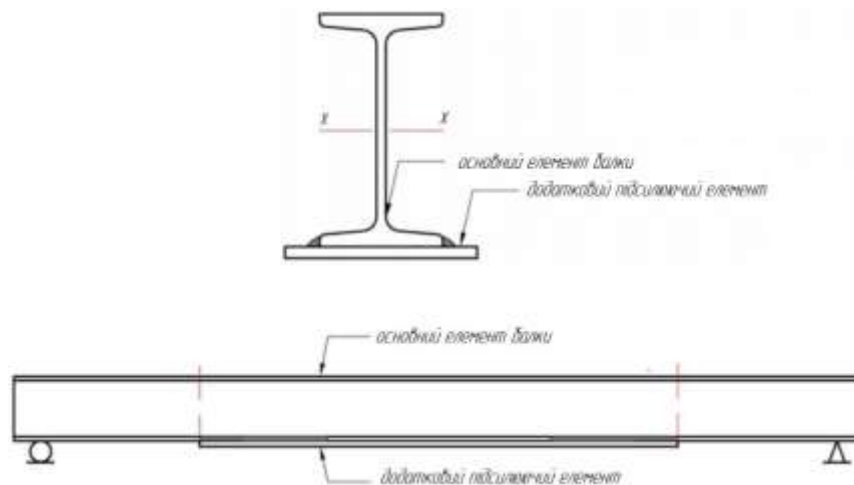


Рисунок 1.6 – Підсилення згинального елемента шляхом збільшення його перерізу

Масштаб: торець балки – 1:2, вид збоку – 1:10

Під час посилення балок, як правило, немає необхідності розташовувати елементи по всій довжині підсилюваного елемента, а можна обмежитися тільки ділянкою з максимальним згинальним моментом [16].

Найбільш простий спосіб підсилення балки – прикріплення смуги до її нижнього поясу. При великій ширині смуги можна уникнути стельових швів, але при надто великій ширині нижньої накладки виникає значна концентрація напружень по кромках балки.

Підсилення згинальних металевих конструкцій має наступні особливості:

- збільшення поперечного перерізу елемента можна обмежувати лише зоною дії максимальних згинальних моментів, де посилення вимагається за розрахунками;
- при конструюванні підсилень слід досягати найбільш ефективного розміщення додаткових деталей (на якомога більшій відстані від нейтральної осі не посиленого перерізу);
- вплив зварювальних деформацій при підсиленні, які можуть збільшувати прогин.

Контроль якості проводиться на кожному етапі підсилення металевих конструкцій. Поверхня елементів підсилення та підсилюваних конструкцій, підготовлених під складання має відповідати третьому класу шорсткості за [10]. Поверхню необхідно ретельно просушити та почистити, кромки, підготовлені під зварювання, обробити до металевого блиску.

Елементи конструкцій, які зазнають розтягу, стиску або згину, підсилені шляхом збільшення перерізу з'єднуються між собою зварюванням або болтовими з'єднаннями нових додаткових деталей. Несуча здатність елемента при цьому зростає зі збільшенням його перерізу або жорсткості.

При конструюванні підсилення зварні шви та болтові з'єднання необхідно розташовувати у зручних для виконання та контролю якості місцях.

1.6. Застосування зварювання для підсилення балок

Зварювання – це процес розплавлення металу за допомогою зварювальної дуги з подальшим утворенням міжатомних зв'язків між зварними елементами.

В залежності від просторового положення зварного шва зварювання виконують дугою різних довжин. Розрізняють такі довжини зварювальних дуг:

- коротка дуга – довжина від 2 до 4 мм;
- нормальна дуга – довжина від 4 до 6 мм;
- довга дуга – довжина понад 6 мм.

Найоптимальнішою довжиною дуги при зварюванні є коротка. При зварюванні довгою дугою, метал більше розбризкується, горіння дуги не стабільне, що призводить до нерівномірності зварювального процесу. Це може впливати на якість зварювального шва.

В залежності від виду зварювання та обладнання, яке для нього застосовується можливе використання таких видів зварювальних дуг:

- пряма дуга, коли контакт відбувається між електродом і зварюваним елементом;
- непряма дуга, коли контакт відбувається між двома електродами, а сам зварюваний елемент не включений у зварювальний електричний ланцюг;
- трифазна дуга, коли контакт відбувається між електродами, а також між кожним електродом і зварюваною поверхнею.

Найчастіше застосовується зварювання прямою дугою.

У процесі зварювання застосують два види струму: постійний та змінний.

Полярності, на яких виконують зварювання постійним струмом, діляться на два типи: пряму та зворотню. При прямій полярності на електроді присутній знак мінус (негативна полярність), а на металі деталі знак плюс (позитивна полярність). При зворотній полярності на електроді знак плюс (позитивна полярність), а на металі знак мінус (негативна полярність).

Електроди для зварних робіт поділяються на два типи:

1. Плавкий електрод. Під час роботи з таким електродом виникає висока сила струму в ланцюзі. При ручному способі зварювання сила струму варіюються від 100 А до 400 А, а при напівавтоматичному - від 350 А до 600 А. В автоматичних режимах сила струму варіюється від 600 до 1000 А.

2. Неплавкий електрод. Даний вид електрода може бути виготовлений з вольфраму. Також можливе застосування вугільного електрода.

Напруга зварювання в сучасних зварювальних апаратах становить від 40 В до 70 В.

Частка теплової енергії, яка виникає при утворенні зварювальної дуги, йде на розплавлення металу, тоді коли решта переходить у атмосферу, на розплавлення флюсів або оболонки електрода.

Теплова потужність дуги називається ефективною, якщо тепла енергія витрачається на нагрівання та розплавлення металу заготовки. Її ще називають тимчасовою одиницею зварювальної дуги.

Глибина розплавлення основної частини металу деталі, яка характеризує проплавлення або провар шва, змінюється з урахуванням ефективності теплової потужності дуги. Проплавлення зварного шва виражається як коефіцієнт проплавлення у двох випадках: по самому шву або межі зони сплавлення.

Краї металу розплавляються під впливом теплової енергії електричної дуги. При подальшій роботі зварювальної дуги утворюється зварювальна ванна з розплаву основного металу. Зварювальна ванна в процесі зварювання покривається шлаком або газами.

Струменеве зварювання являє собою процес, коли електродний метал переноситься у вигляді крапель (від 25 до 50 крапель за секунду). При зварюванні в аргоні та вуглекислому газі, враховуючи високу щільність струму, електродний метал переноситься більш дрібним потоком.

При зварюванні сталі коефіцієнт розплавлення буває від 5 до 20 г/А-год.

Коефіцієнт наплавлення характеризується ефективністю заповнення шва, так як при роботі з електродом, він не весь переходить у метал шва, а частково йде на розбризкування чи окислення.

Коефіцієнти наплавлення менший можливого коефіцієнта розплавки на 5 % - 25%, оскільки враховуються втрати електродних металів. Менші значення притаманні зварюванню під флюсом, а більші відносяться до ручного дугового зварювання.

Необхідні геометричні параметри швів та їх механічні властивості повинні забезпечуватися технологією зварювання за найменшого внутрішнього напруженні та деформації металу.

При збільшенні перерізу балок шляхом приварювання додаткових елементів в процесі зварювання може знижуватися їх несуча здатність. Ступінь зниження залежить від режиму зварювання, товщини та ширини елемента, напряму зварювання. Для поздовжніх швів зниження міцності не перевищує 15%, а для поперечних може досягати 40%. Тому накладання швів упоперек елемента при його підсиленні під навантаженням категорично забороняється.

Під час виконання зварних з'єднань слід враховувати появу додаткових та залишкових зварювальних деформацій. Наприклад, посилення ферм слід починати з елементів та вузлів нижнього поясу, а потім робити посилення верхнього пояса.

У зв'язку з частковою втратою міцності елементів при зварюванні, а також перерозподілом напружень, як за перерізом елемента, так і між елементами підсилення під навантаженням виконують при напругах, які не перевищують $0,8R_y$, де R_y - розрахунковий опір для сталі, з якої виготовлений елемент.

Основними типами монтажних зварних з'єднань є: стикове, напускове, таврове та кутове, показані на рис. 7 [5].

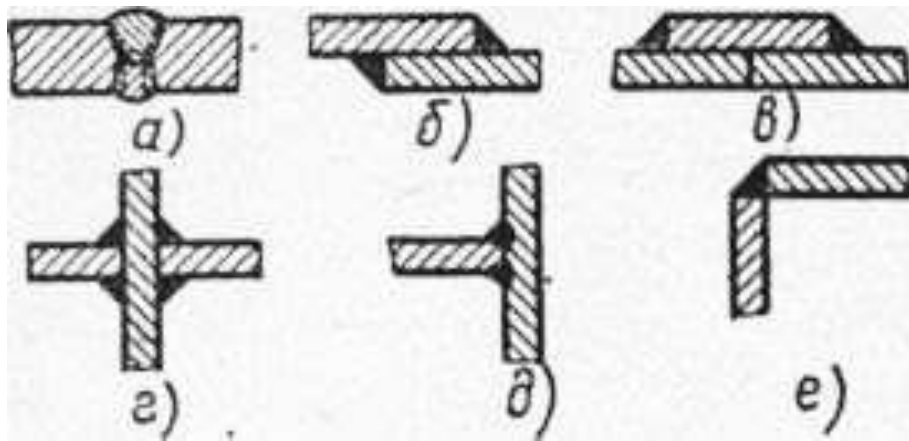


Рисунок 1.7 – Основні типи зварних з'єднань

а – стикове, б, в – напускове, г, д – таврове, е – кутове

Проектуючи зварне з'єднання для створення посиленої конструкції необхідно враховувати такі положення:

- приймати мінімально необхідну кількість та мінімальні розміри зварних швів;
- передбачати застосування високопродуктивних механізованих способів зварювання;
- передбачати застосування ефективних зварювальних матеріалів (електродів, електродних дротів, захисних газів, флюсів);
- передбачати таке розташування та розміри зварних швів, за яких максимально скорочувалася б необхідність кантування конструкцій під час їх виготовлення, а також зменшилися б розміри з'єднуваних деталей;
- забезпечувати вільний доступ до місць накладання швів та зручне просторове положення з урахуванням обраного способу та технології зварювання. а також прийнятого методу неруйнівного контролю швів;
- збільшення перерізів швів не підвищує працездатність конструкцій, а у деяких випадках знижує її.

При підсиленні шляхом збільшення перерізу здебільшого використовують напускове з'єднання, в якому посилюваний і підсилюючий елементи розташовані паралельно і частково перекривають один одного, що значно спрощує збирання та зварювання швів.

Під час проектування та розрахунку зварних з'єднань розміри зварних кутів швів і сама конструкція з'єднань, проводиться, враховуючи такі вимоги:

- катет кутового шва $k_f \leq 1,2 \cdot t$, де t – мінімальна товщина зварюваних елементів;
- катету кутового шва k_f при розрахунку повинен відповідати вимогам [3];
- розрахункова довжина кутового шва має становити не менше $4k_f$, але не менше 40 мм;
- розрахункова довжина флангового шва має бути не більше $85\beta_f k_f$. Враховуючи шви, в яких зусилля діє по всій їх протяжності коефіцієнт β_f приймається згідно [3].
- розмір напуску приймається не менше $5t$, де t – товщина найтоншого елемента у зварному з'єднанні;
- співвідношення розмірів катетів кутових швів – 1:1; якщо товщина зварюваних елементів різна, існує допуск приймати шви з нерівними катетами;
- шов необхідно виконувати так, щоб виходив плавний перехід до основного металу. Це забезпечить підвищення розрахункового опору втомі зварних з'єднань.

Розрахунок зварного з'єднання на зріз із запроектованими кутовими швами при дії моменту M , який виникає в площині, перпендикулярної площини розташування швів по металу шва визначається за формулою:

$$\frac{M}{W_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (1.1)$$

де W_f - момент опору розрахункових перерізів зварного з'єднання металу шва прийнятий;

R_{wf} - розрахунковий опір кутових швів зрізу по металу шва, який визначається відповідно до [12]:

$$R_{wf} = \frac{0,55 \cdot R_{wun}}{\gamma_{wm}}, \quad (1.2)$$

де $\gamma_{wm} = 1,25$ – при $R_{wun} \leq 450$ МПа.

Якість зварних швів перевіряється зовнішнім оглядом відповідно до [8].
Критерії перевірки наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Критерії перевірки якості зварних швів

Вид контролю	Метод контролю	Характеристики методу		
		Дефекти	Чутливість	Особливості методу
Технічний огляд	Зовнішній огляд	Поверхневі дефекти	Виявлення несучільності відхилення розміру та форми зварного з'єднання від заданих величин більше 0,1мм, поверхневе окислення зварного з'єднання	Метод дозволяє виявити дефекти мінімального розміру, які виявляються при огляді та вимірюванні зварного з'єднання з використанням оптичних приладів зі збільшенням 10х вимірювальних приладів

Слід застосовувати такі види зварювання:

- автоматичне зварювання під флюсом слід застосовувати при укрупнювальному збиранні конструкцій для швів значної протяжності;
- механізоване (напівавтоматичне) зварювання самозахисним порошковим дротом може бути застосоване при укрупненні та монтажі металоконструкцій для зварювання швів у нижньому, похилому та вертикальному положеннях;

- механізоване (напівавтоматичне) зварювання у вуглекислому газі (дротом суцільного перерізу) слід використовувати для укрупнювального та монтажного зварювання металоконструкцій у будь-якому положенні шва за умови захисту місця зварювання від вітру;

- де не можна використовувати автоматичне та механізоване зварювання, має застосовуватися ручне дугове зварювання.

Контроль якості швів зварних з'єднань сталевих конструкцій здійснюється методами розкриття шва висвердлюванням для контролю кутових швів [12], газовою пробою (при товщині металу до 10 мм) та метод хімічних реакцій (при товщині металу до 16 мм) для контролю стикових швів [12]. Шви не повинні мати напливів, тріщин, перепалів та перерв, різкого переходу до основного металу. Дефекти швів не повинні виходити за межі.

Шви зварних з'єднань та конструкції після закінчення зварювання повинні бути очищені від шлаку, бризок та підтікань металу. Приварені складальні пристосування слід видаляти без застосування ударів та пошкодження основного металу, а місця їх приварювання зачищати до основного металу із видаленням всіх дефектів.

Монтажні зварні з'єднання при статичних випробуваннях мають мати міцність не нижчу міцності основного металу, регламентованої стандартом. Твердість та відносне видовження металу всіх швів, ударна в'язкість металу стикових швів та навколошовної зони (по лінії сплавлення) повинні відповідати вимогам [8].

Перевагою методу використання зварних з'єднань є:

- низька маса з'єднання;
- невисока трудомісткість виготовлення;
- простота монтажу з'єднання;
- економія сталі на 10-20% через відсутність необхідності додаткових накладок;
- досягнення повного геометричного стику;
- можливість автоматизації;

- невисока вартість устаткування;
- зниження вартості монтажних робіт в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва.

Недоліком зварних з'єднань є:

- крихке руйнування при дії низьких температур та динамічних навантажень, внаслідок сприйнятливості до концентрації напружень;
- ймовірність виникнення різних дефектів самих швів;
- виникнення залишкових напружень, які знижує міцність та викликають необхідність проведення механічної обробки після старіння;
- місцеве нагрівання в зоні термічного впливу поблизу шва тягне до зміни механічних властивостей металу;
- зниження міцності швів внаслідок неправильного вибору параметрів технологічного процесу

Висновки за розділом

У процесі експлуатації металевих конструкцій з прокатних та складних балок часто виникає потреба їх підсиленні через збільшення на них навантаження та ураження корозією.

Підсилення балок виконують різними способами, зокрема: зміною розрахункової схеми навантаження, введенням додаткових навантажених елементів, збільшенням перерізу елементів конструкцій.

Питанням посилення сталевих балок шляхом збільшення перерізу приділяли значну увагу. Досліджувалися ефективність схем підсилення, технологічні аспекти приєднання елементів посилення.

Дослідження ефективності підсилення зварних сталевих балок зі зміною їх січення шляхом застосування зварювання є актуальним питанням.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК

Розрахункова схема конструкції повинна відображати умови її роботи та фактичний стан, встановлений даними обстежень. При потребі, в деяких випадках, слід виконувати розрахунок з використанням декількох варіантів розрахункових схем та розподіл жорсткостей.

Для конструкцій, які не мають дефектів та пошкоджень, розрахунок допускається обмежувати зіставленням значень внутрішніх зусиль (моментів, поперечних сил) від розрахункових навантажень зі значеннями зусиль, а при зміні тільки навантажень без зміни їх характеру та способу прикладання – зіставленням їх значень [16].

2.1 Теоретичне обґрунтування роботи двотавра на згин

Розглянемо приклад розрахунку та аналізу балки довжиною 1,5 м, навантаженої двома симетричними силами, розташованими на відстані 0,5 м від опор, як це показано на рис. 2.1.

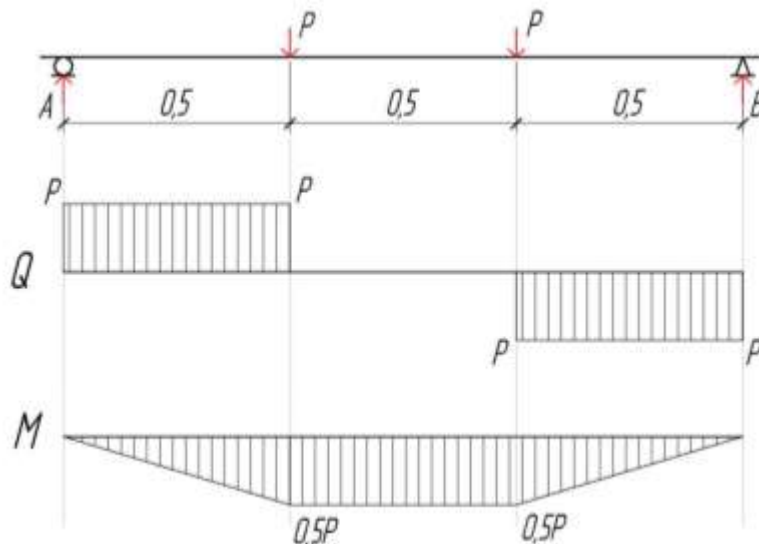


Рисунок 2.1 – Схема навантаження балки

Схема закріплення балки: шарнірно оперта. До неї прикладається навантаження, а саме - дві зосереджені сили однакової величини, симетрично розташовані відносно середини прольоту.

Прямий вигин розділяють на чистий та поперечний. При чистому прямому вигині в поперечних перерізах балки виникає лише один внутрішній силовий фактор - згинальний момент. При прямому та поперечному вигині в перерізах балки виникають два силові фактори (внутрішні зусилля): згинальний момент M і поперечна сила Q .

Практика показує, що згинальний момент у більшості випадків має вирішальне значення при підборі перерізу та перевірці міцності балочних конструкцій. Під дією навантаження балка прогинається так, що її нижні волокна подовжуються, а верхні вкорочуються, тобто вигин супроводжується появою нормальних напружень. При поступовому переході в перерізі від волокон, які видовжуються, до тих, які вкорочуються (або навпаки) розташований проміжний шар волокон, який не змінює своєї довжини. Цей шар називається нейтральним, а лінія його перетину з площиною поперечного перерізу балки – нейтральною лінією чи віссю.

Таким чином, нейтральна лінія є геометричним місцем концентрації точок, у яких нормальні напруження дорівнюють нулю. Для з'ясування характеру розподілу та значення напружень, викликаних згинальним моментом, звернемося до випадку чистого згину. При чистому згині деформації волокон пропорційні їх відстані від нейтрального шару, а нормальні напруження змінюються лінійно за висотою перерізу.

Згинальний момент M_x та координату y найзручніше брати по абсолютному значенню, а знак напруження встановлювати виходячи з характеру деформації балки (при розтязі – плюс, при стиску – мінус), тобто, по епюрі M , ординати якої відкладають із боку розтягнутих волокон. Неважко здогадатися, що максимальні значення напруження виникають у точках, найбільш віддалених від нейтральної лінії.

При поперечному згині діють як нормальні, а й дотичні напруження. Останні ускладнюють картину деформації, призводячи до викривлення поперечних перерізів балки, внаслідок чого порушується гіпотеза плоских перерізів.

Проте ретельне дослідження у цій галузі показують, що спотворення, які вносяться дотичними напруженнями, незначно впливають на нормальні напруження. Таким чином, під час визначення нормальних напружень у разі поперечного згину цілком може бути застосовна теорія чистого згину. Дотичні напруження в розрахунках на міцність зазвичай не враховується.

Проведемо вибір розрахункових перерізів та контрольних точок. На рис. 2.1 показана розрахункова схема балки, епюри згинальних моментів та поперечних сил. За характером епюр видно, що в середній частині балки між зосередженими силами, має місце чистий згин під дією згинального моменту $M_{\max}$, а в крайніх відсіках – поперечний вигин під дією згинального моменту, який змінюється в межах від 0 до $M_{\max}$ при постійній поперечній силі, яка дорівнює $Q_{\max}$. Конструктивний розрахунок за граничними станами виконують, як правило, у таких поперечних перерізах та розрахункових точках, де виникають найбільші нормальні, дотичні та головні напруження. У досліджуваній балці найбільші нормальні напруження будуть там, де $M = M_{\max}$. Найбільші дотичні напруження, як відомо з курсу опору матеріалів, діють на рівні нейтрального шару у перерізі, де $Q = Q_{\max}$. У досліджуваній балці це має місце у приопорних відрізках у будь-якій точці, розташованій на осі балки. Найбільше основне напруження в стінках балок виникає в місцях поєднання її з полицями, тобто. у крайніх нижніх та верхніх точках. У поєднанні з головними стискаючими напруженнями, що діють на рівні нейтрального шару, вони можуть стати причиною втрати тонкої стійкості стінки. Найбільш ймовірним місцем втрати стійкості стінки є середина приопорних відрізків [23].

Таким чином, можливості встановлення обмежуються роботою балок на чистий згин.

Максимальне навантаження, яке може сприймати сталевий двотавр в межах пружної роботи, можна визначити за формулою:

$$P_{max} = \frac{W_x \cdot \sigma_T}{a}, \quad (2.1)$$

де σ_T - межа текучості сталі;

a – відстань від опори до прикладених двох зосереджених навантажень;

W_x – момент опору перерізу бруто щодо осі.

Максимальний розрахунковий згинальний момент для еталонного зразка визначається за формулою (2.2) виходячи з епюри моментів, зазначених на рис. 2.1:

$$M_{max} = 0,5 \cdot P_{max}, \quad (2.2)$$

де P_{max} – максимальне навантаження, яке може сприймати досліджуваний двотавр.

Опорні реакції балки, опертої на двох шарнірах визначаються формулою:

$$A = B = P_{max}, \quad (2.3)$$

2.2. Дослідження напружено-деформованого пружного стану балки

При стані балки в напружено-деформованому стану 1-го класу, коли напруження, які виникають по всій площі перерізу не можуть перевищити розрахунковий опір $|\sigma| \leq R_y$, тобто, у аналізованого нами двотавровому перерізі пружний стан [23], балка розраховується на згин та на зріз згідно [16].

На згин під дією моменту в одній із головних площин:

$$\frac{M}{W_{xn,min} \cdot R_y \cdot \gamma_c}; \quad (2.4)$$

де R_y - розрахунковий опір сталі на стиск, розтяг, згин, визначений за межею текучості;

γ_c - коефіцієнт умов роботи [16];

M - максимальний розрахунковий згинальний момент, знайдений за формулою (2.2);

$W_{xn,max}$ - момент опору перерізу нетто щодо осі.

На зріз при дії перерізу поперечної сили:

$$\frac{P \cdot S}{I \cdot t \cdot R_s \cdot \gamma_c}, \quad (2.5)$$

де P – поперечна сила;

S - статичний момент зсувної частини перерізу балки відносно нейтральної осі;

I - момент інерції перерізу балки;

t - товщина стінки двутавра;

γ_c - коефіцієнт умов роботи [16];

R_c - розрахунковий опір сталі зсуву.

Розрахунковий опір сталі зсуву визначається за формулою:

$$R_c = 0,58 \cdot R_y \quad (2.6)$$

Епюри нормальних (σ) і дотичних (τ) напружень для пружного стану перерізу балки показано на рис. 2.2.

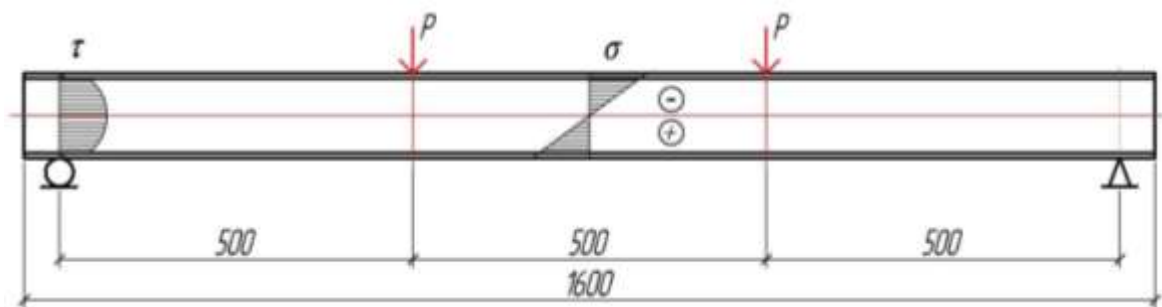


Рисунок 2.2 – Епюри нормальних та дотичних напружень для пружної роботи

Таким чином, враховуючи формулу (2.1) та (2.2) нормальні напруження в перерізах двотаврових балок визначаються відповідно за наступною формулою:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq R_y; \quad (2.7)$$

де M - максимальний розрахунковий згинальний момент;

W_x - момент опору перерізу балки відносно осі;

R_y - розрахунковий опір сталі на стиск, розтяг, згин, визначений за межею текучості.

Також, враховуючи формули (2.1) і (2.5), дотичні напруження в перерізах двотаврових балок визначаються за формулою:

$$\tau = \frac{Q \cdot S_x}{I_x \cdot s} \leq R_s. \quad (2.8)$$

де Q - зусилля зрізу;

I_x - відповідно момент інерції перерізу відносно осі;

S_x - статичний момент зсуваючої частини перерізу відносно осі;

s - товщина стінки;

R_s - розрахунковий опір сталі на зріз.

Робота на зріз у прокатних балках за відсутності ослаблень опорних перерізів зазвичай забезпечена завдяки відносно великій товщині стінок балок. Таким чином, основним є забезпечення умов роботи на вигин за нормальними напруженнями.

2.3. Дослідження напружено-деформованого пружно-пластичного стану балки

При подальшому навантаженні текучість починає проникати всередину перерізу. З'являються верхні та нижні зони текучості при збереженні пружного внутрішнього ядра. Такий стан характеризується як напружено-деформований стан 2-го класу і називається пружно-пластичним. Відповідно до вимог [1], допускається розвиток деякої частки пластичних деформацій.

Епюри нормальних (σ) і дотичних (τ) напружень для пружно-пластичного стану перерізу досліджуваної балки показані на рис. 2.3.

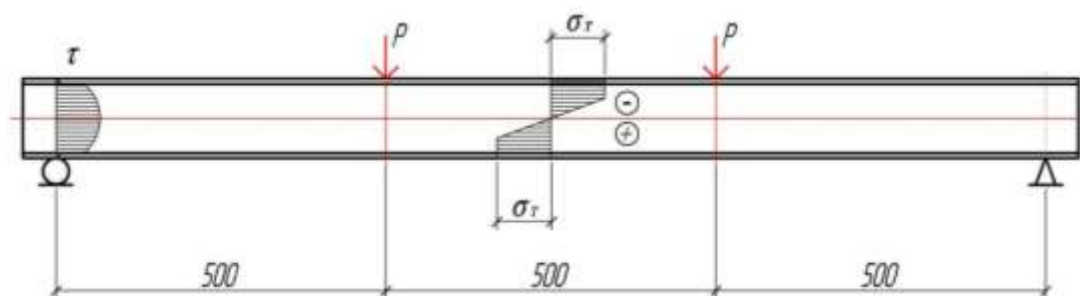


Рисунок 2.3 – Епюри нормальних та дотичних напружень для пружно-пластичної роботи

Нормальні напруження з урахуванням можливості розвитку пластичних деформацій визначаються за формулою:

$$\sigma = \frac{M}{c_x \cdot \beta \cdot W_x} \leq R_y \cdot \gamma_y \quad (2.9)$$

де M - максимальний розрахунковий згинальний момент;

W_x - момент опору перерізу балки відносно осі;

β - коефіцієнт, який приймається в залежності від величини дотичних напружень;

c_x - коефіцієнт, який враховує розвиток пластичних деформацій, залежно від схеми перерізу; для двотаврових балок можна для спрощення з достатньою точністю прийняти $c_x = 1,1$;

γ_c - коефіцієнт умов роботи.

2.4. Дослідження напружено-деформованого пластичного стану балки

Епюри нормальних (σ) і дотичних (τ) напружень для пластичного стану перерізу балки показано на рис. 2.4.

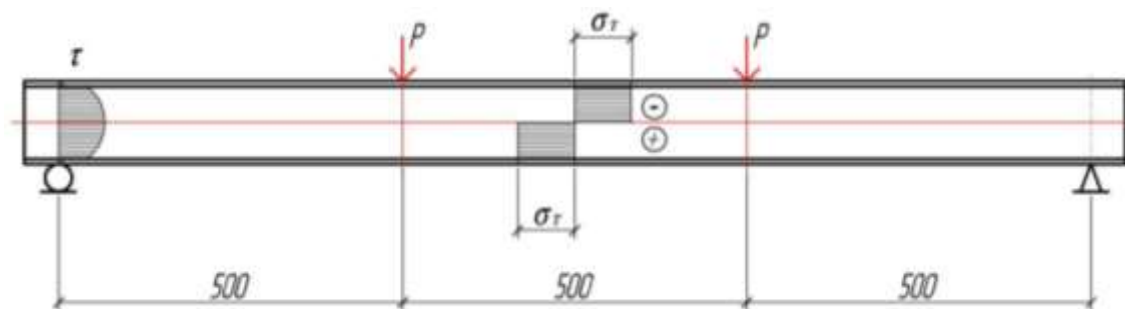


Рисунок 2.4 – Епюри нормальних та дотичних напружень пластичної роботи (умовний пластичний шарнір)

При подальшому навантаженні напруження текучості продовжують поширюватися і на границі пронизують весь перетин. Настає напружено-деформований стан 3-го класу, коли по всій площі перерізу $|\sigma| = \sigma_y$, тобто у розглянутого нами двотаврового перерізу настає пластичний стан [1]. Такий стан називають «Умовним шарніром пластичності».

2.5. Теоретичне обґрунтування роботи на згин двотавра, посиленого смугою, прикріпленою до нижньої полиці зварюванням

Посилення двотавра проводиться смуговим елементом з перетином 100х6 мм, довжиною 900 мм відповідно до рис. 2.5.

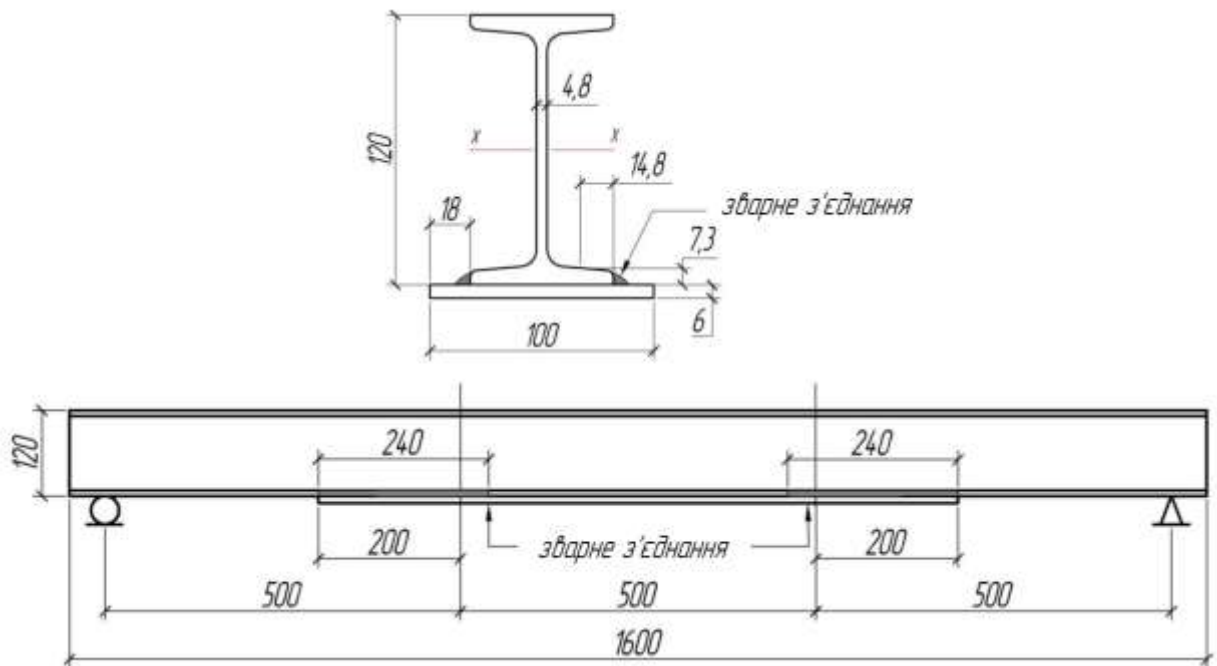


Рисунок 2.5 – Схема посилення двотаврової балки

Масштаб: торець балки – 1:2, вид збоку – 1:10

Розрахунок зразка, посиленого шляхом збільшення перерізу, на несучу здатність також ведеться з розрахунку теорії чистого згину, але, оскільки при посиленні поперечний переріз змінюється, то змінюється центр тяжіння, що в свою чергу змінює момент опору в перерізі відносно осі.

Для визначення нормальних напружень необхідно визначити положення горизонтальної осі з урахуванням зміни перерізу: прикріплення смуги. Для цього необхідно визначити центр тяжкості нового перетину.

Розрахунок центру тяжкості ведеться відносно осі – рис. 2.6.

$$W_x^{\text{стиск}} = \frac{I_x}{8,6} = \frac{587,27}{8,6} = 68,3 \text{ см}^3 \quad (2.13)$$

Оскільки $W_x^{\text{стиск}} < W_x^{\text{рост}}$, максимальне навантаження на момент настання текучості визначатиметься в даному випадку для стиснених волокон і знаходиться за формулою:

$$P_{\max} = \frac{W_x^{\text{стиск}} \cdot \sigma_T}{a} \quad (2.14)$$

де σ_T - межа текучості сталі Ст3пс;

a - відстань від опори до двох прикладених зосереджених навантажень;

$W_{x1}^{\text{стиск}}$ - момент опору перерізу відносно осі, визначений за (2.13).

Максимальний розрахунковий згинальний момент, при моменті опору для розтягнутих волокон, для посиленого зразка визначається за формулою (2.15), також виходячи з епюри моментів, зазначених на рис. 2.1:

$$M_{\max} = 0,5 \cdot P_{\max}, \quad (2.15)$$

де $P_{\max}$ - максимальне навантаження, яке може сприймати посилений сталевий двутавр, визначена за формулою (2.14).

Моменти опору посиленого перерізу для розтягнутих $158,7 \text{ см}^3$ і стисненого $68,3 \text{ см}^3$ волокон досить значно більше моменту опору непідсиленого двотавра: у 2,72 та 1,16 рази, що є передумовою висновку про ефективність запропонованого варіанти посилення. Для остаточного висновку необхідно провести експериментального дослідження.

2.6. Розрахунок зварного з'єднання

Прикріплення підсилювального елемента (смуги) здійснюється за допомогою зварювання. Для розрахунку швів вище було визначено силу P .

Основний тип зварного з'єднання прийнято - напускове з'єднання, без скосу кромки. Характер кутового шва – односторонній. Умовне позначення зварного шва - Н1, відповідно до [3].

Довжина швів визначатиметься з умови роботи на зріз під час дії зрушуючої сили.

Розміри зварних кутових швів та конструкція з'єднання повинні задовольняти такі вимоги:

- катет кутового шва k_f не повинен перевищувати $1,2t$, де t - найменша з товщин зварюваних елементів;
- розрахункова довжина кутового шва повинна бути не менше $4k_f$ та не менше 40 мм.

Розрахунок зварного з'єднання з кутовими швами, під дією сили, яка проходить через центр тяжкості з'єднання, слід виконувати на зріз (умовний) по одному з двох перерізів, як показано на рис. 2.7.

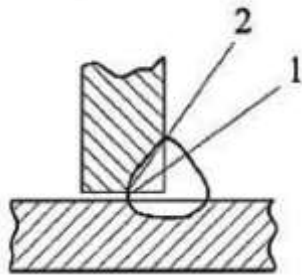


Рисунок 2.7 – Розрахункові перерізи зварного з'єднання з кутовим швом
1 – по металу шва; 2 – по металу межі сплавлення

За умови $\frac{\beta_f \cdot R_{wf}}{\beta_z \cdot R_{wz}} \leq 1$ розрахунок зварного з'єднання з кутовими швами за металом шва проводиться за формулою:

$$\frac{P}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot R_{wf} \cdot \gamma_c} \leq 1 \quad (2.16)$$

За умови $\frac{\beta_f \cdot R_{wf}}{\beta_z \cdot R_{wz}} > 1$ розрахунок зварного з'єднання з кутовими швами за металом межі сплавлення визначається за формулою:

$$\frac{P}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot R_{wf} \cdot \gamma_c} > 1 \quad (2.17)$$

де у формулах (2.16) і (2.17):

l_w - розрахункова довжина швів у зварному з'єднанні, рівна сумарній довжині всіх його ділянок не враховуючи по 1 см на кожній безперервній ділянці шва;

β_f та β_z – коефіцієнти, прийняті за [5];

R_{wf} - розрахунковий опір зрізу (умовному) кутових швів по металу шва;

R_{wz} - розрахунковий опір зрізу (умовному) кутових швів по металу межі сплавлення.

Вимоги до кутових швів представлені у таблиці 2.1 відповідно до [28] і враховуватимуться під час проведення досліджень.

Таблиці 2.1 – Вимоги до кутових швів

Вимоги до конструкції шва	Значення
Розрахункова довжина кутового шва має бути $4k_f$ та не менше 40 мм	$16 \text{ мм} \leq x \leq 40 \text{ мм}$
Розрахункова довжина флангового шва має бути не більше $85 \beta_f k_f$	$\leq 238 \text{ мм}$
Розмір напуску повинен бути не меншим п'яти товщин тоншого зі зварюваних елементів	$\geq 39 \text{ мм}$

Висновки за розділом

Спосіб підсилення балок методом збільшення їх січення шляхом приварювання додаткових підсилюючих елементів є дієвим методом збільшення їх несучої здатності. Він дозволяє збільшити момент опору посиленого перерізу у 2,72 рази при розтязі балки та в 1,16 рази при згині двотавра. Це є передумовою висновку про ефективність запропонованого варіанти підсилення.

При посиленні балок слід намагатися збільшити їх згинальну жорсткість. Найефективнішим є симетричне підсилення, однак воно завжди можливо у реальних умовах.

При посиленні балки шляхом приєднанням додаткових смуги до нижньої полиці, найслабшою частиною балки з позиції посилення буде верхня зона.

3. МЕТОДИКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень

Програма експериментальних досліджень сталевій зварної балки, підсиленої методом збільшення її січення із застосуванням зварювання розроблена для визначення ефективності застосування даного методу для зварних металоконструкцій та передбачала виконання кількох завдань:

- Розробити модель зварної балки;
- Запропонувати спосіб її підсилення;
- Визначити конструктивні та масові характеристики запропонованих варіантів зварної сталевій балки;
- Виконати статичний аналіз навантаженої балки різних січень в середовищі Solidworks Simulation;
- Оцінити вплив параметрів січення зварної балки на її несучу здатність;
- Обґрунтувати оптимальний спосіб підсилення зварної сталевій балки.

Експериментальні дослідження планується проводити з використанням програмного середовища Solidworks 2025, яке дозволяє виконувати моделювання металоконструкцій та їх аналіз.

3.2. Характеристики об'єкта досліджень

Для експериментальних досліджень сталевій зварної балки, підсиленої методом збільшення її січення із застосуванням зварювання обрано зварну балку двотаврового перерізу довжиною 1500 мм. Балка складається з стійки 1 та приварених до неї полиць 2. Матеріалом балки вибрано звичайну вуглецеву сталь товщиною 8 мм.

Балку підсилювали шляхом приварювання до неї бокових 3 та горизонтальних 4 накладок з тієї ж сталі товщиною 8 мм. Загальний вигляд балки наведений на рис. 3.1.

Характеристики елементів зварної конструкції наведені в таблиці 3.1.

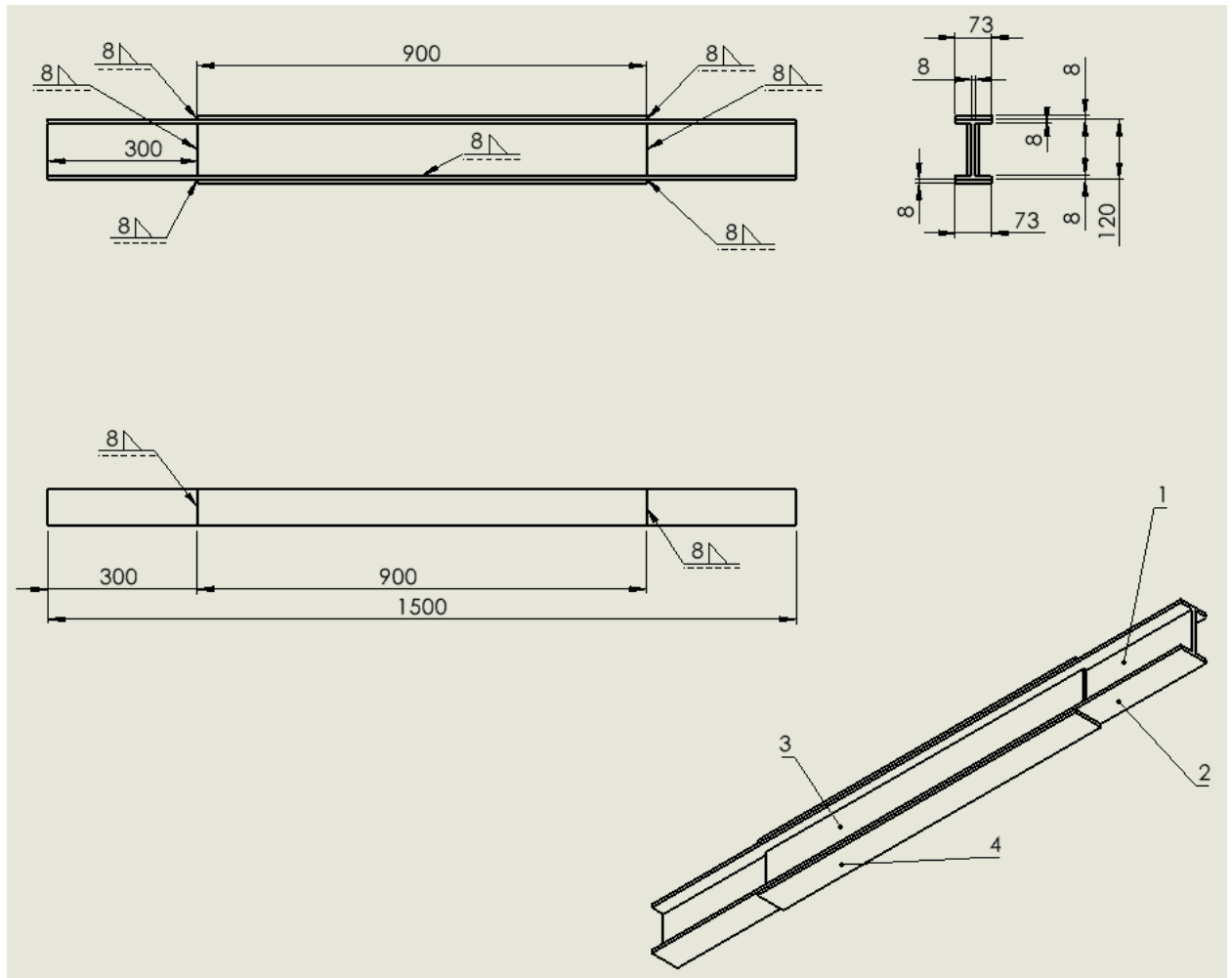


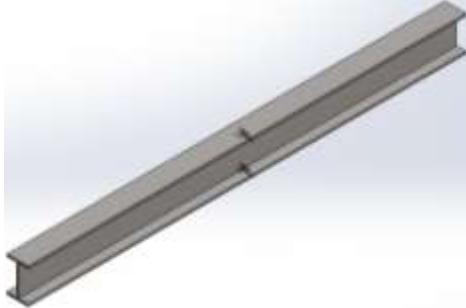
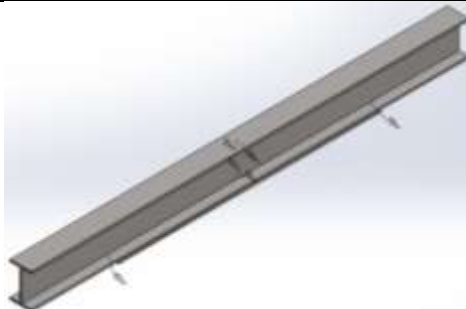
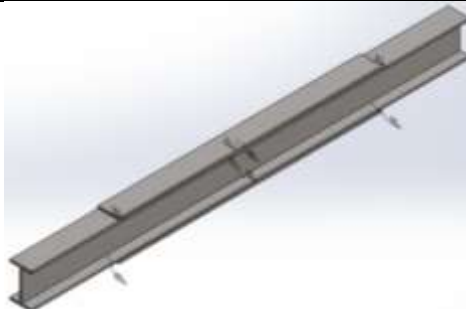
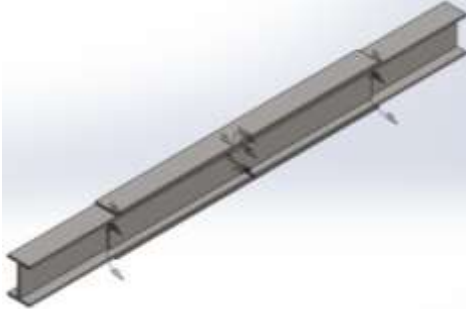
Рисунок 3.1 – Робоче креслення зварної сталеві балки

Таблиця 3.1 – Характеристики елементів зварної балки

№ поз.	Назва	Розміри, мм	Площа січення, см ²	Маса, кг	Кількість, шт
1	Стійка	1500×104×8	8,32	9,8	1
2	Полиця	1500×73×8	5,84	6,88	2
3	Накладка бокова	900×104×8	8,32	5,88	2
4	Накладка горизонтальна	900×73×8	5,84	4,13	2

Характеристики варіантів зварної балки, які будуть досліджуватися з використанням програмного середовища Solidworks 2025 наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Характеристики зварних балок

№ балки	Ескіз	Складові елементи		Площа січення, см ²	Маса, кг
		№	К-сть		
1		1	1	20	23,55
		2	2		
2		1	1	36,64	35,31
		2	2		
		3	2		
3		1	1	25,84	27,68
		2	2		
		4	1		
4		1	1	31,68	31,81
		2	2		
		4	2		
5		1	1	48,32	43,57
		2	2		
		3	2		
		4	2		

3.3. Методика дослідження сталевій балки за допомогою програмного модуля Solidworks Simulation

Дослідження сталевій балки, підсиленої методом збільшення її січення із застосуванням зварювання виконуємо з використанням програмного модуля Solidworks Simulation. Для цього на першому етапі роботи нами було побудовано 3D-моделі балок різної конструкції (див. табл. 3.2). Для досліджень використовувались базові налаштування програми Solidworks 2025.

Далі приступаємо до аналізу зварної балки. Для цього відкриваємо вкладку Simulation і створимо нове дослідження. Вказавши назву дослідження вибираємо тип дослідження «Статичне».

На початку дослідження слід задати матеріал деталі. Для цього в менеджері досліджень виберемо деталь, далі виберемо функцію застосування матеріалу і з відкритого меню вибираємо просту вуглецеву сталь.

Наступним етапом досліджень є фіксація опорних поверхонь балки. Для виконання статичного аналізу балки зафіксуємо її торцеві поверхні з обох кінців за допомогою функції фіксованої геометрії вказавши на торцеві поверхні балки.

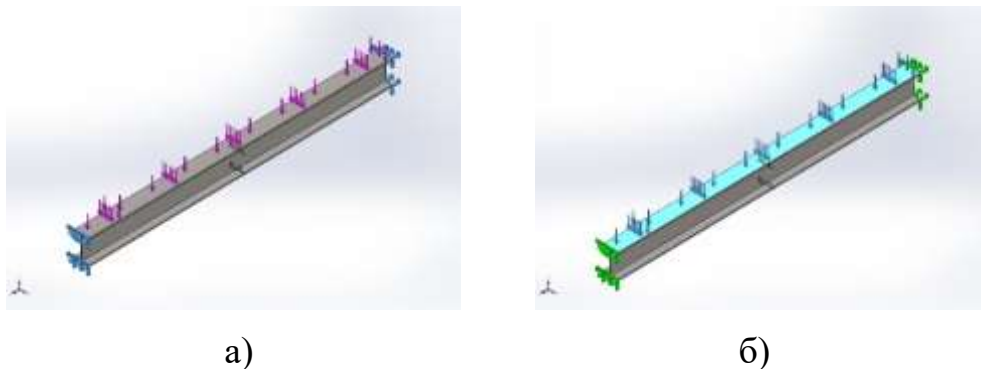


Рисунок 3.2 – Фіксація опорних поверхонь балки (а) та навантаження балки

Далі необхідно було задати навантаження, яким навантажуватиметься балка. Для цього в менеджері досліджень виберемо функцію зовнішніх навантажень, виберемо параметр «Сила» з можливого переліку навантажень. Для завдання умов прикладання дії сили до балки вибираємо ту поверхню балки, до якої буде

прикладатися навантаження, вказуємо напрям дії навантаження та задаємо значення навантаження у відповідних одиницях вимірювання. Для дослідження балок різного січення приймаємо значення прикладеного до них навантаження рівним 50 кН. Сила ваги балки в даному випадку не враховувалась.

Для подальшого аналізу необхідно накласти сітку на досліджувану модель. В меню налаштування сітки можна задати її щільність та інші параметри. В наших дослідженнях ми залишали параметри сітки за замовчуванням.

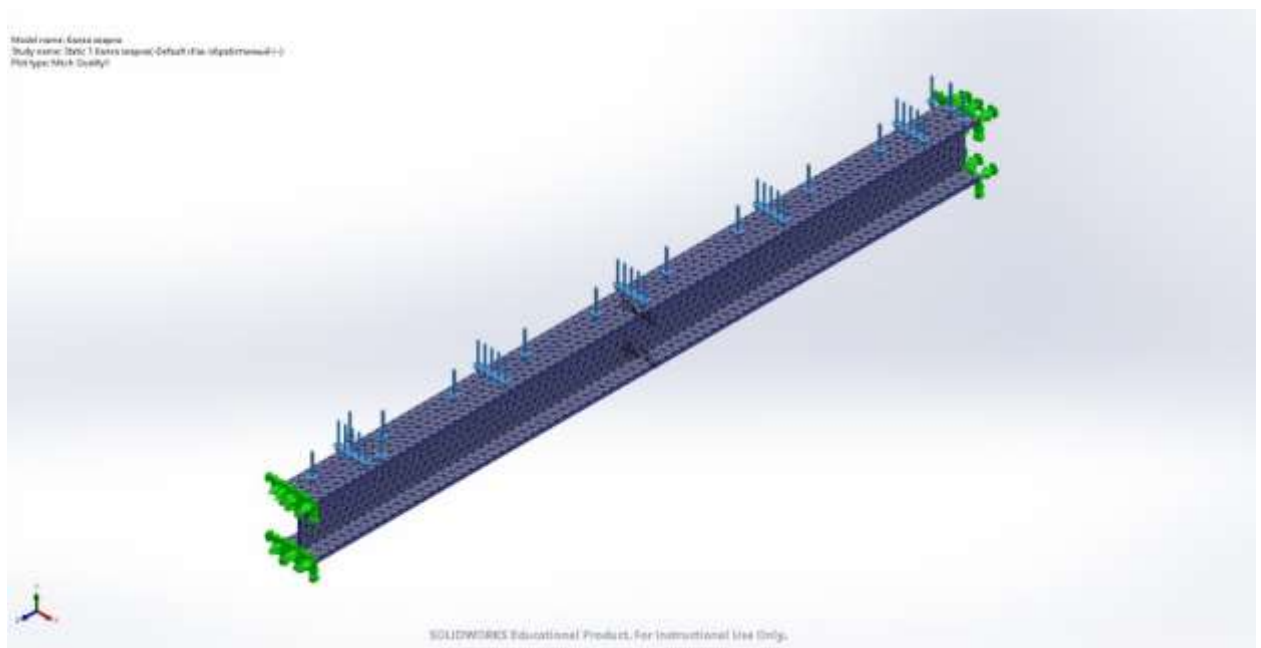


Рисунок 3.3 – Накласти сітку на досліджувану модель

На цьому підготовчі роботи до проведення аналізу зварної балки закінчуються, і далі можна приступати до безпосереднього її аналізу.

Статистичний аналіз балки запускається шляхом вибору в менеджері досліджень відповідної функції на наступним підтвердженням дії. Програма автоматично запускає розрахунок, тривалість якого залежить від складності конструкції виробу та заданих виду, параметрів і умов аналізу.

За результатами аналізу програма формує три епюри: епюру напружень, епюру переміщень та епюру деформацій. Для наглядності система

автоматично збільшує відображення деформацій. При потребі параметри графіки епюр можна налаштувати, зробивши їх більш реалістичними.

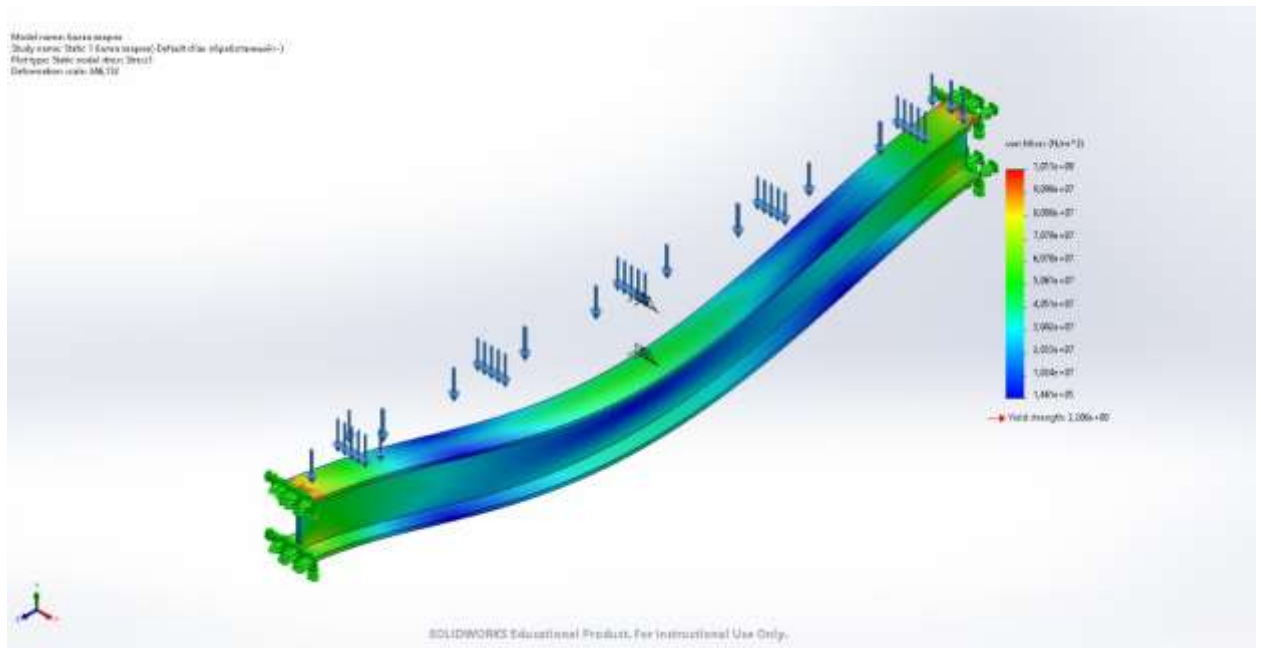


Рисунок 3.4 – Епюра напружень, які виникають в статично навантаженій зварній сталевій балці під дією навантаження 50 кН

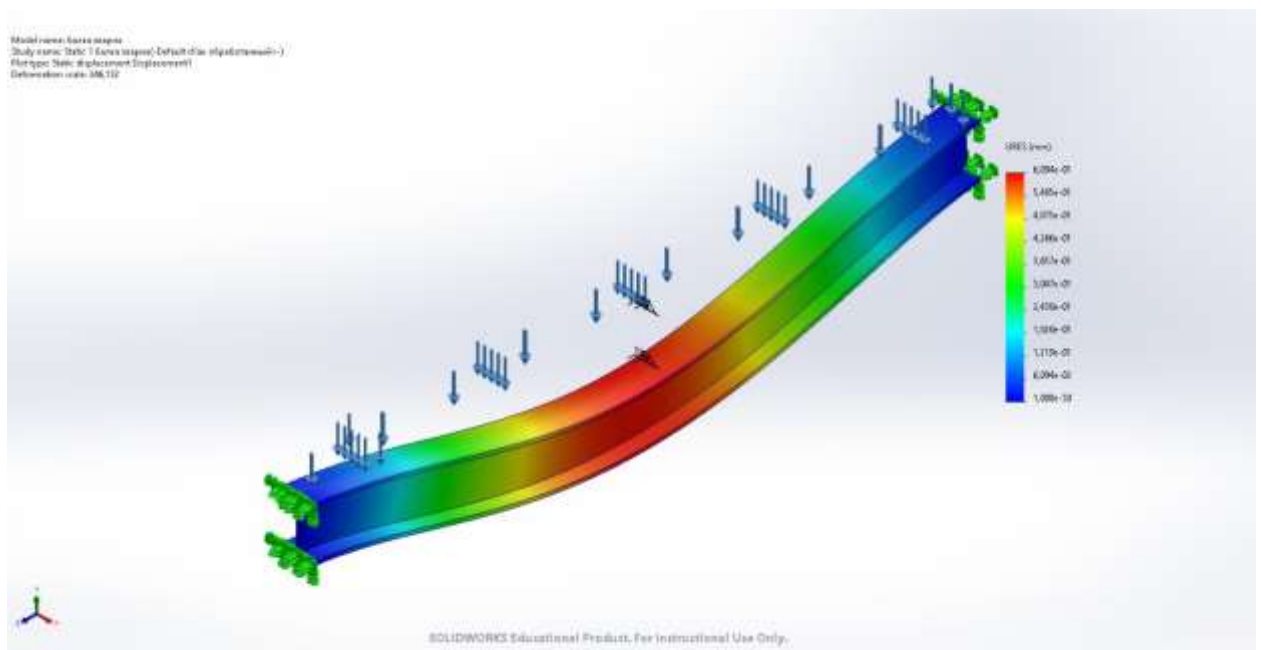


Рисунок 3.5 – Епюра переміщень статично навантаженої зварної сталевій балки під дією навантаження 50 кН

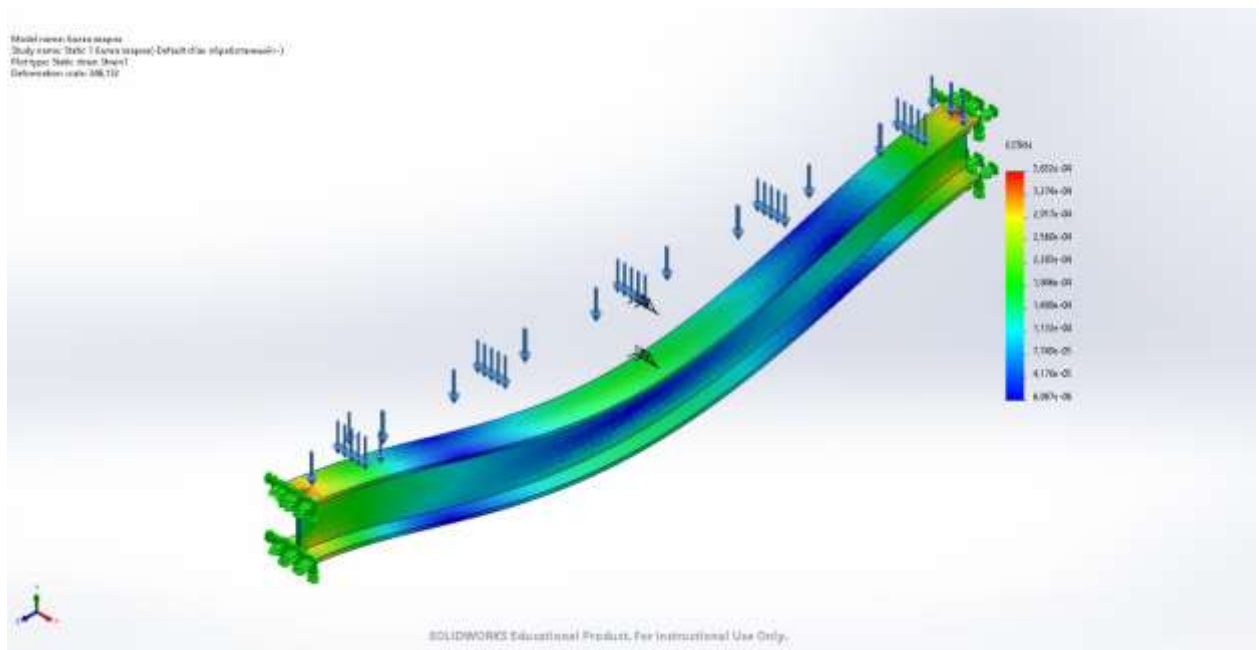


Рисунок 3.6 – Епюра деформацій статично навантаженої зварної сталевій балки під дією навантаження 50 кН

Основним параметром перевірки надійності конструкції є коефіцієнт запасу міцності. В середовищі Solidworks Simulation можна отримати епюру запасу міцності усієї зварної конструкції. Для цього, вибравши функцію «Результати» задамо операцію визначення епюри запасу міцності.

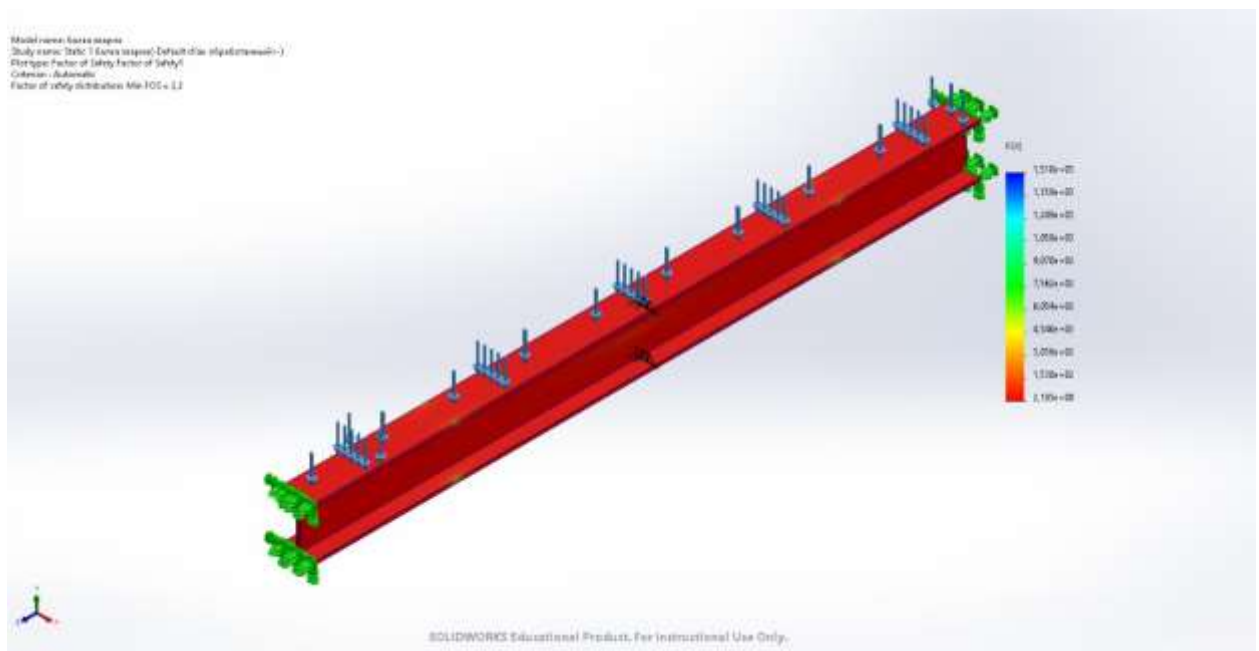


Рисунок 3.7 – Епюра запасу міцності статично навантаженої зварної сталевій балки під дією навантаження 50 кН

У вікні програми з'явиться дана епюра зі шкалою його розподілення по усій балці. Також програма порахує мінімальне значення запасу міцності у найбільш навантаженому місці конструкції.

На цьому аналіз конструкції балки буде завершено. Для збереження результатів аналізу в доступному для користувача форматі є можливість їх Perezбереження на ПК у форматі doc середовища Word.

3.4. Результати дослідження розмірно-вагових характеристик балки

З метою збільшення несучої здатності двотаврової балки в роботі пропонується її зміцнення методом збільшення поперечного січення шляхом приварювання до неї додаткових елементів. Конструкція зварної двотаврової балки дозволяє приварювати до неї додаткові накладки у вигляді полос з листової сталі різної товщини. Такі накладки можна приварювати з обох боків вертикальної стінки двотавра, а також до обох полиць балки. Приварювання накладок рекомендується в місцях з найбільшим проявом стріли прогину та деформації балки. Як видно з рис. 3.5, таким місцем є середина балки.

Приварюючи до балки додаткові елементи ми збільшуємо її січення. Зміну площі січення різних варіантів балки відображає діаграма на рис. 3.8.

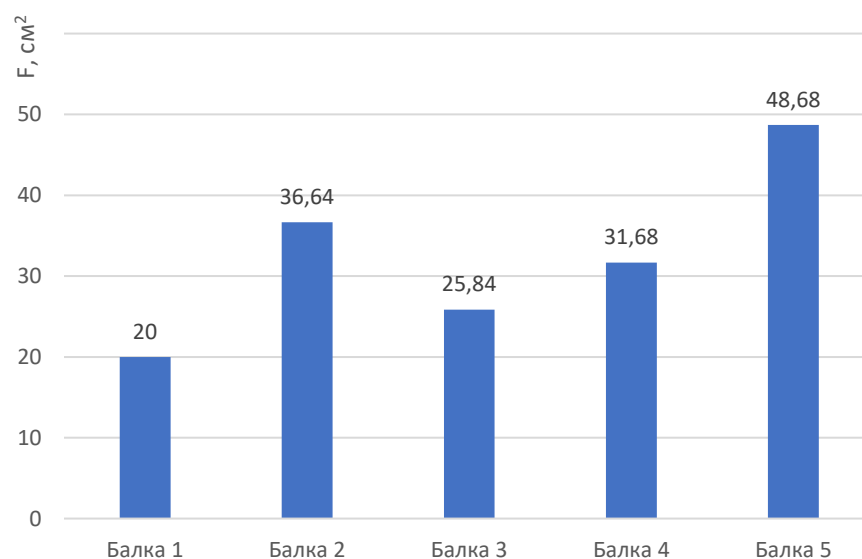


Рисунок 3.8 – Діаграма зміни площі січення різних варіантів балки

Як бачимо з діаграми на рис. 3.8, найбільшу площу січення вдається отримати після приварювання бокових накладок до вертикальної стійки (варіант 2) та після приварювання усіх чотирьох підсилюючих елементів (варіант 5). В першому випадку, площа січення зростає на 45,4 %, а в другому – на 58,9 %. Приварювання однієї (варіант 3) або двох (варіант 4) накладок до полиць балки дозволяє збільшити її січення на 22,6 % та 36,9 % відповідно.

Одночасно зі збільшенням січення балки буде збільшуватись і її загальна вага. Зміну маси балки, в залежності від варіанту їх підсилення та різного січення характеризує діаграма на рис. 3.9.

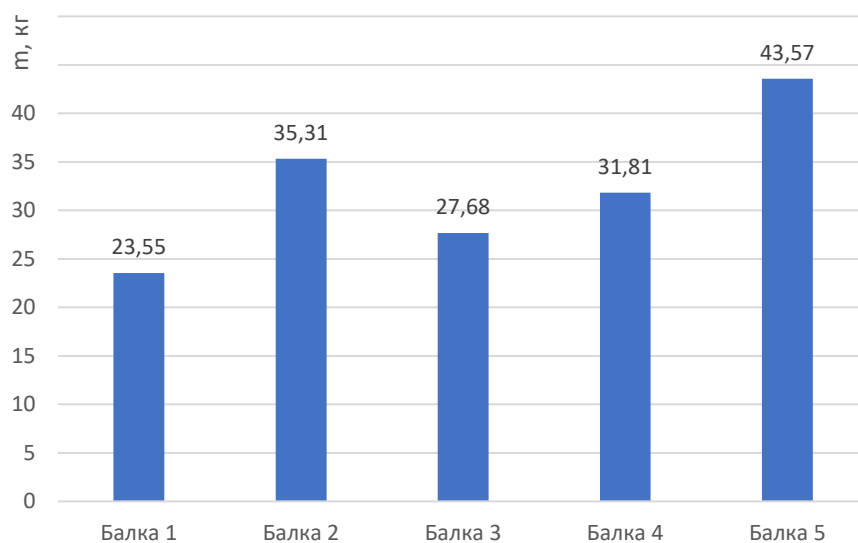


Рисунок 3.9 – Діаграма зміни маси різних варіантів балки

Кожному варіанту підсилення балки відповідає своє значення приросту її ваги. Картина збільшення ваги майже точно повторює картину збільшення площі січення балки і носить лінійний характер. Так, маса балки, підсиленої двома боковими наставками (варіант 2) зросла на 24,8 %, при підсиленні однієї полиці (варіант 3) маса збільшилась на 14,9 %, а при підсиленні обох (варіант 4) – на 26 %. Приварювання підсилюючих елементів до всіх площин балки (варіант 5) збільшує її масу на 45,9 %.

Оптимальним варіантом має бути той, який дозволяє максимально збільшити січення балки з мінімальним збільшенням її маси. Порівняти взаємний вплив цих двох показників можна за кривими на рис. 3.10.

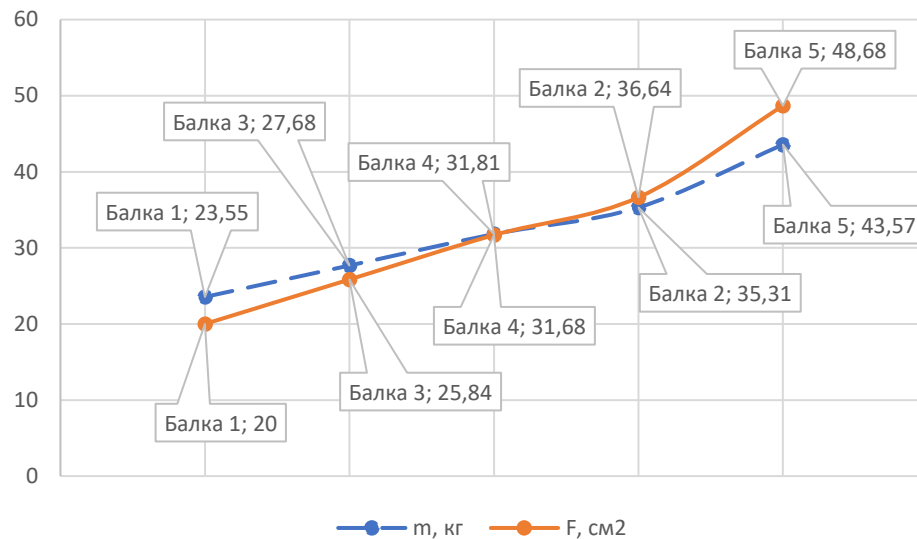


Рисунок 3.10 – Криві зміни січення та маси сталевих зварних балок

Аналізуючи криві на рис. 3.10 можна припустити, що більш ефективними з точки зору співвідношення приросту площі січення та маси балки будуть варіанти 2 і 5. У варіанті балки 4 збільшення її січення є пропорційним збільшенню маси, що можна також вважати допустимим варіантом підсилення. Для варіанту 3 приріст маси балки перевищує приріст площі січення, а отже такий варіант підсилення буде неефективним.

3.5. Дослідження міцнісних характеристик балок

Збільшення площі січення несучих елементів зварних металоконструкцій не завжди говорить про можливість збільшення їх міцності та несучої здатності. Основною міцнісною характеристикою, за якою оцінюють надійність конструкції, є коефіцієнт запасу міцності. За результатами аналізу різних варіантів підсилення балки в середовищі Solidworks Simulation були отримані епюри та мінімальні значення їх запасу міцності.

Для аналізу значень запасу міцності різних варіантів зварної балки побудуємо відповідну діаграму (рис. 3.11).

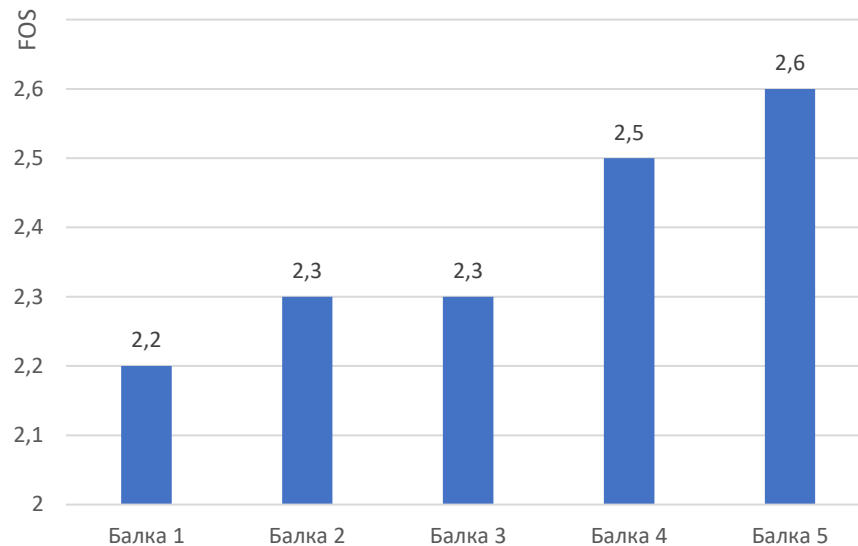


Рисунок 3.11 – Діаграма запасу міцності різних варіантів зварної балки

Як можна побачити з даної діаграми, 2 і 3 варіанти підсилення балки шляхом приварювання двох бокових накладок до стійки або приварювання однієї горизонтальної підкладки до полиці дозволяє збільшити запас міцності всього на 4,3 %. Приварювання двох накладок до полиць балки (варіант 4) дозволяє підняти значення запасу міцності на 12 %, а зміцнення накладками усіх площин двотавра (варіант 5) дає можливість збільшити запас міцності балки на 15,4 %.

Аналізуючи отримані результати можна припустити, що оптимальним і найбільш ефективним варіантом зміцнення балки буде варіант №5, який передбачає приварювання підсилюючих підкладок до усіх площин двотавра. Одна, як свідчить діаграма на рис. 3.9, цей варіант призводить до збільшення маси зварної металоконструкції майже вдвічі. Тому проаналізуємо сумісний вплив приростів площі січення, маси та запасу міцності для усіх варіантів підсилення зварної балки.

Аналіз сумісний вплив приростів площі січення, маси та запасу міцності для усіх варіантів підсилення зварної балки виконаємо за графічними залежностями, представленими на рис. 3.12.

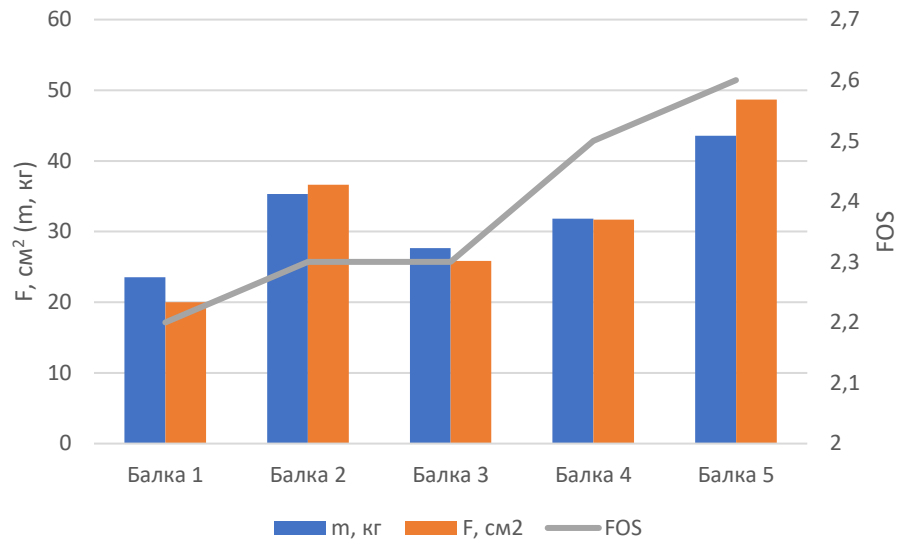


Рисунок 3.12 – Залежності приростів площі січення, маси та запасу міцності зварної балки

Аналізуючи рис. 3.12 можна зробити висновок, що оптимальним і найбільш ефективним варіантом зміцнення балки буде варіант №4, який передбачає приварювання підсилюючих накладок до полиць двотавра. В такому варіанті підсилення збільшення січення пропорційне збільшенню маси балки і зростає приблизно на чверть. При цьому, збільшення запас міцності становить 12 %.

Висновки за розділом

Підсумовуючи отримані результати досліджень можна зробити висновок, що оптимальним варіантом підсилення зварної сталеві балки методом збільшення її січення є варіант приварювання підсилюючих накладок до полиць балки в місцях максимального прогину та деформації.

Такий варіант підсилення дозволяє збільшити січення балки на 36,9 % при рості маси балки на 26 %. При цьому, запасу міцності зростає на 12 %.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз вимог техніки безпеки під час зварювальних робіт

До роботи зварювальником допускати осіб, які досягли 18-річного віку, навчені і атестовані на II кваліфікаційну групу з електробезпеки, пройшли медичний огляд, вступний і первинний на робочому місці інструктажі з охорони праці, які вже оволоділи безпечними методами виконання робіт і пройшли перевірку знань вимог охорони праці.

Зварювальник повинен бути забезпечений необхідними засобами індивідуального захисту відповідно до типових норм.

Перебуваючи у зварювально-монтажному цеху, необхідно:

- звертати увагу на сигнали, що подаються з вантажопідіймальних кранів, кантувачів і рухомого транспорту;

- не стояти і не проходити під вантажем, піднятим краном, а також між верстатами, колонами, огорожами, стінами будівлі і ін., близько розташованими до пересувного вантажу;

- під час руху по цеху користуватися тільки встановленими проходами, що не перелазити через конвеєри, рольганги і т.п.

Перед початком роботи обов'язково слід одягти спецодяг, перевірити справність обладнання, електропроводки, трубопроводів та газової арматури, наявність і справність заземлення.

Витяжна вентиляція повинна бути встановлена над столом для зварювання.

Про всі помічені недоліки, несправності в обладнанні і про виниклі небезпеки повідомити майстру. До роботи можна приступати тільки після усунення всіх несправностей і дозволу майстра.

Не слід дивитися на дугу незахищеними очима. Необхідно користуватися захисною маскою зі світлофільтром.

Забороняється залишати без нагляду установку з підключеними стисненим повітрям і включеним напругою.

Під час роботи забороняється тримати шланги під пахвою, на плечах або затискати ногами. Забороняється допускати зіткнення шлангів з струмопровідними проводами.

При перегрів зварювального апарата робота повинна бути зупинена до повного його охолодження.

Не допускати попадання на шланги іскор, вогню або важких предметів, а також впливу високих температур.

Забороняється приєднання до шлангів вилок, трійників і т.п. для живлення декількох апаратів.

Не допускати проведення ремонту апаратури у робочому стані. У разі несправності негайно припинити роботу і повідомити майстру.

При щоденному обслуговуванні необхідно перевіряти справність підвідних проводів; справність контактних затискачів і роз'ємів на панелі з затискачами; заземлення джерела живлення; заземлення зварної конструкції або столу.

Справність захисних засобів слід перевіряти перед кожним застосуванням. Захисні засоби, у яких закінчився термін чергового випробування, застосовувати забороняється.

Для запобігання виникненню пожеж необхідно дотримуватися таких вимог:

- не захаращувати доступи і проходи до протипожежного інвентарю, вогнегасників, гідрантів;
- зберігати горючі та легкозаймисті речовини в спеціально відведених місцях з дотриманням заходів пожежної безпеки;
- палити тільки в спеціально відведених місцях, забезпечених протипожежним інвентарем і урнами;
- використаний обтиральний матеріал зберігати в металевому ящику з щільно закривається кришкою;

- не підходити з відкритим вогнем до шлангів і балонів;
- не чистити і не прати робочий одяг бензином і іншими легкозаймистими рідинами.

При виникненні ситуацій, які можуть привести до аварій і нещасних випадків (наприклад, при пробі ізоляції в ланцюзі, протіканні шлангів), необхідно припинити роботу, відключити подачу електроенергії, вивести з небезпечної зони людей і повідомити про виниклу ситуацію керівнику робіт.

При виникненні аварії негайно вжити заходів з надання потерпілим першої допомоги, викликати машину швидкої допомоги.

При виявленні пожежі негайно повідомити в пожежну охорону по телефону 101, сповістити керівництво і до прибуття пожежних приступити до ліквідації вогнища пожежі наявними засобами в залежності від загорівся матеріалу.

При нещасному випадку надати потерпілому першу долікарську допомогу, повідомити про подію керівництву. По можливості зупинити обстановку, якщо це не призведе до аварії або травмування інших людей. При необхідності викликати бригаду швидкої допомоги по телефону 103 або допомогти доставити потерпілого в медичний заклад.

4.2 Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час зварювання

Одним із основних способів моделювання небезпечних ситуацій є метод графічно окресленого логічного моделювання потенційних аварій, травм і катастроф. Цей метод базується на побудові схем, відмов і помилок працівників (операторів) різних систем. Потрібно вести математичну обробку даних, з метою одержання ймовірності виникнення травматичних випадкових подій. Розрахунки спрямовані на зниження нещасних випадків на виробництві.

Вивчаючи модель процесів формування та можливого виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій, з якої починається небезпечний

процес і до виникнення небезпечних наслідків. Якщо провести дослідження то обов'язково можна знайти подію (явище), що є причиною травмонебезпечних та аварійних ситуацій.

Розглянемо випадок виробничого травматизму під час механізованого зварювання. У даному випадку відбувається травма працівника, внаслідок ураження електричним струмом, отруєння шкідливими газами чи отримання опіку. Головну подію розміщують у верхній частині аркуша паперу і зверху донизу розміщують інші події. У побудованій моделі базові події мають форму круга. Нерозкриті базові події зображують у вигляді ромба, прямокутник подія, що виникає як результат дії фактора.

Математичну обробку побудованої моделі починають з крайньої лівої гілки, події якої пронумеровані знизу у вгору починаючи з базових подій і закінчуючи головною. Значення подій вказуємо безпосередньо на символи зображення події. Ймовірності виробничих подій визначаємо за даними виробництва. Наприклад, базова подія “охорона праці”. Для визначення ймовірності ми повинні встановити наскільки (%) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об'єкт. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 20 або 30%, то ймовірність відповідно становить 0,2 і 0,3 [4]. При відсутності контролю ймовірність “не здійснення контролю” становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідна ймовірність дорівнює 0. Для виконання математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі застосовують складені формули відповідно до положень.

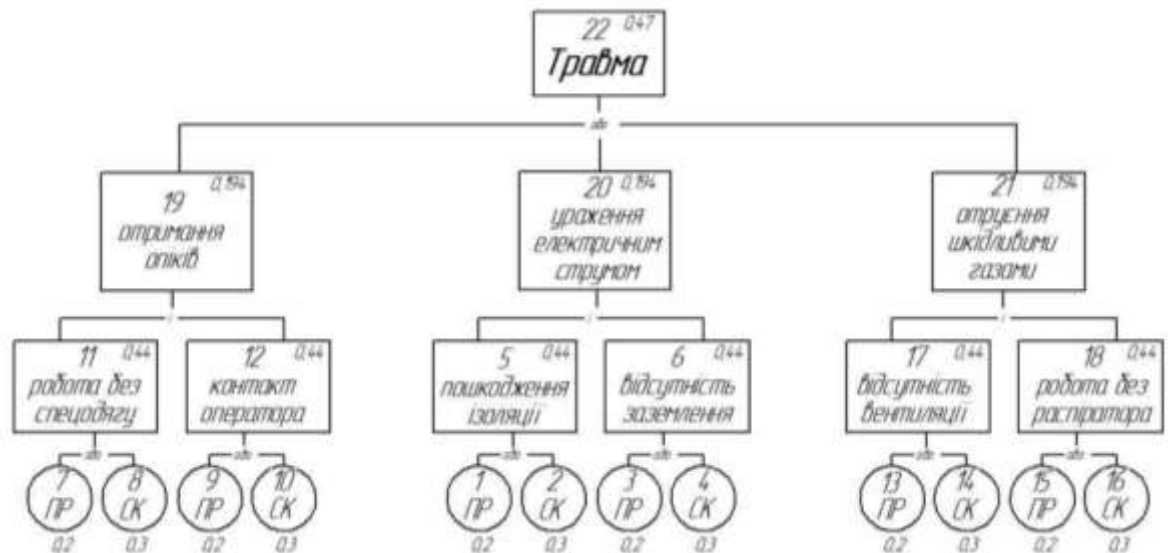


Рисунок 4.1. Модель процесу формування та виникнення травми

На даній схемі графічно відображено математичну обробку даних на виробництві про нещасні випадки.

Ймовірність події P_5 визначаємо наступним чином

$$P_5 = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 = 0,2 + 0,3 - 0,2 \cdot 0,3 = 0,44 \quad (4.1)$$

Ймовірність подій P_6 , P_{11} , P_{12} , P_{17} і P_{18} буде рівною події P_5 , оскільки базові події для них є однаковими.

Ймовірність події P_{19}

$$P_{19} = P_{11} \cdot P_{12} = 0,44 \cdot 0,44 = 0,194 \quad (4.2)$$

Ймовірності подій P_{20} і P_{21} будуть рівною події P_{19} , оскільки події P_5 , P_6 , P_{17} , P_{18} рівні між собою.

Ймовірність події P_{22}

$$P_{24} = P_{19} + P_{20} + P_{21} - P_{19} \cdot P_{20} - P_{19} \cdot P_{21} - P_{20} \cdot P_{21} \quad (4.3)$$

$$P_{24} = 0,194 + 0,194 + 0,194 - 0,194 \cdot 0,194 - 0,194 \cdot 0,194 - 0,194 \cdot 0,194 = 0,47$$

Таким чином, на робочому місті під час виконання операцій

4.3 Рекомендації щодо покращення безпеки праці

Для запобігання небезпеки ураження електричним струмом необхідно, щоб джерела живлення мали автоматичні пристрої, що відключають їх при обриві дуги протягом не більше 0,5 с.

З метою зменшення небезпеки ураження електричним струмом зварювальнику слід дотримуватися наступних заходів [8, 13]:

- надійна ізоляція всіх, проводів, пов'язаних з живленням джерела струму і зварювальної дуги;

- надійний пристрій електродотримача з гарною ізоляцією, яка гарантує, що не буде випадкового контакту струмоведучих частин електродотримача зі зварним виробом або руками зварника;

- робота у справно-сухому спецодязі і рукавицях. При роботі в тісних відсіках і замкнутих просторах обов'язкове використання гумових калош і килимків, джерел освітлення з напругою не більше 6-12 В;

Для запобігання небезпеки ураження бризками розплавленого металу і шлаку використовують спецодяг (брюки, куртку і рукавиці) з брезентової або спеціальної тканини. Куртки при роботі не слід вправляти у штани, а взуття повинне мати гладкий верх, щоб бризки розплавленого металу не потрапляли всередину одягу, так як в цьому випадку можливі важкі опіки.

Висновки за розділом

Впровадження рекомендацій щодо покращення безпеки праці в систему охорони праці на зварювальному виробництві дозволить уникнути небезпечних ситуацій та травматизму, передбачених логічною моделлю.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. У процесі експлуатації металевих конструкцій з прокатних та складних балок часто виникає потреба їх підсиленні через збільшення на них навантаження та ураження корозією. Підсилення балок виконують різними способами. Одним з найбільш ефективних, на нашу думку, є збільшення їх січення шляхом приєднання додаткових зміцнюючих елементів за допомогою зварювання.

2. Теоретичний аналіз свідчить, що спосіб підсилення балок методом збільшення їх січення шляхом приварювання додаткових підсилюючих елементів є дієвим методом збільшення їх несучої здатності. Він дозволяє збільшити момент опору посиленого перерізу у 2,72 рази при розтязі балки та в 1,16 рази при згині двотавра.

3. Застосування програмного модуля Solidworks Simulation для статичного аналізу балок різної конструкції дозволяє швидко і точно розрахувати роботу балки під навантаженням та отримати епюри напружень, переміщень, деформацій, а також запасу міцності усієї зварної конструкції та отримати необхідну інформацію для обґрунтування вибору оптимального варіанта схеми підсилення балки.

4. Підсилення двотаврової балки шляхом приварювання до неї бокових та горизонтальних накладок дозволяє збільшити її січення майже вдвічі, що забезпечує збільшення запасу міцності на 15,4 % при зростанні загальної ваги металоконструкції приблизно на 44 % .

5. Оптимальним, на нашу думку, варіантом підсилення зварної сталеві балки методом збільшення її січення є варіант приварювання підсилюючих накладок до полиць балки в місцях максимального прогину та деформації. Такий варіант підсилення дозволяє збільшити січення балки на 36,9 % при рості маси балки всього на 26 %. При цьому, запас міцності зростає на 12 %.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Биків Д., Підгурський І. Дослідження напружено-деформівного стану сталевих перфорованих балок з різними видами отворів. *Матеріали VI Міжнародна студентська науково-технічна конференція «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання»*, 27-28 квітня 2023 року. С. 35.
2. Биків Д., Кос А., Підлужний О., Підгурський І., Підгурський М. Методи виготовлення сталевих перфорованих двотаврових балок з регулярною та нерегулярною структурою отворів. *Матеріали I-ї Міжнародної науково -технічної конференції «ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА» присвяченої 80 - ти річчю з дня народження професора Ч.В. Пульки*, 2024. С. 76-79.
3. Власенко А.М. Основи зварювання. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 106 с.
4. Городецький І. В, О. Тимочко. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях: методичні рекомендації до виконання розділу у роботах ОКР "Магістр" студентами факультету механіки та енергетики. Львів: Львівський НАУ, 2011. 16 с.
5. Гуменюк І.В. Іваськів О.В., Гуменюк О.В. Технологія електродугового зварювання: Підручник. Київ: Грамота, 2006. 512 с.
6. ДБН А.3.2-2-2009 Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення (НПАОП 45.2-7.02-12) [Чинний від 01.04.2012]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2012. 122 с.
7. ДБН В.2.6–198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. [На заміну ДСТУ Б В.2.6-194:2013 та ДБН В.2.6-163:2010. Чинний від 01.01.2015]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 209 с.
8. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994. 48 с.

9. ДСТУ 8541:2015 Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови. [На заміну ГОСТ 19281 -89. Чинний від 01.07.2016]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 18 с.
10. ДСТУ 8539:2015 Прокат для будівельних сталевих конструкцій. Загальні технічні умови. [Чинний від 2016-07-01]. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64876
11. Клименко Ф. Є. Барабаш В. М., Стороженко Л. І. Металеві конструкції: підручник. Львів: Світ, 2002. 312 с.
12. Контроль якості та технічна діагностика зварних конструкцій. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для підготовки бакалаврів з прикладної механіки за спеціалізацією «Технології та устаткування зварювання». /Укл. Болотов Г.П., Болотов М.Г. Чернігів: ЧНТУ, 2019. 31 с.
13. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навч. посіб. для практ. робіт з охорони праці для студентів зварювальних спеціальностей. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 181 с.
14. Методичні вказівки по розрахунку режимів зварювання з дисципліни «Технологічні основи зварювання плавленням» для спеціальності 5. 05050401 «Зварювальне виробництво». Укладач Шевченко М.П. Маріупольський машинобудівного коледжу ДВНЗ «ПДТУ». 2016. 28 с.
15. Нілов О.О. Металеві конструкції. Загальний курс / За загальною редакцією О.О. Нілова та ін. Київ: Видавництво «Сталь», 2010. 869 с.
16. Опір матеріалів. Повний розрахунок прокатної балки. Складний опір: методичні рекомендації, завдання та приклади виконання розрахунково-графічних робіт /уклад.: А. М. Станкевич, І. В. Жупаненко, Д. В. Левківський. Київ: КНУБА, 2013. 52 с.
17. Підгурський І.М., Слободян В.В., Підлужний О.М., Биків Д.З., Підгурський М.І. Моделювання напружено-деформівного стану балок з різною перфорацією стінки. *Збірник матеріалів тез доповідей XII*

Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем - 2022» (м. Чернігів, 26–27 травня 2022 р.) Т. 2. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2022. С. 105.

18. Підгурський М., Сташків М., Підгурський І., Сенчишин В., Підлужний О., Биків Д., Слободян В., Підвисоцький О., Гоголюк В. Дослідження міцності перфорованих балок з однорядним та дворядним розташуванням отворів. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій“, 10-11 листопада 2022 року*. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 87–88.

19. Про охорону праці : Закон України від 14.10.92 р. № 2695-XII. Вид. офіц. Голос України 1992. 24 лист. № 49, ст.669.

20. Про затвердження Правил охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями : Наказ Міністерства енергетики України від 19.12.2013 р. № 966. Вид. офіц. Офіційний вісник України 2014. 28 бер. № 24, ст. 59.

21. Руденко П.О. Проектування технологічних процесів у машинобудуванні. Київ: Вища школа, 1993. 414 с.

22. Шевченко М.П. Методичні вказівки по розрахунку режимів зварювання з дисципліни «Технологічні основи зварювання плавленням» для спеціальності 5. 05050401 «Зварювальне виробництво». Маріуполь, ДВНЗ «ПДТУ», 2019. 28 с.

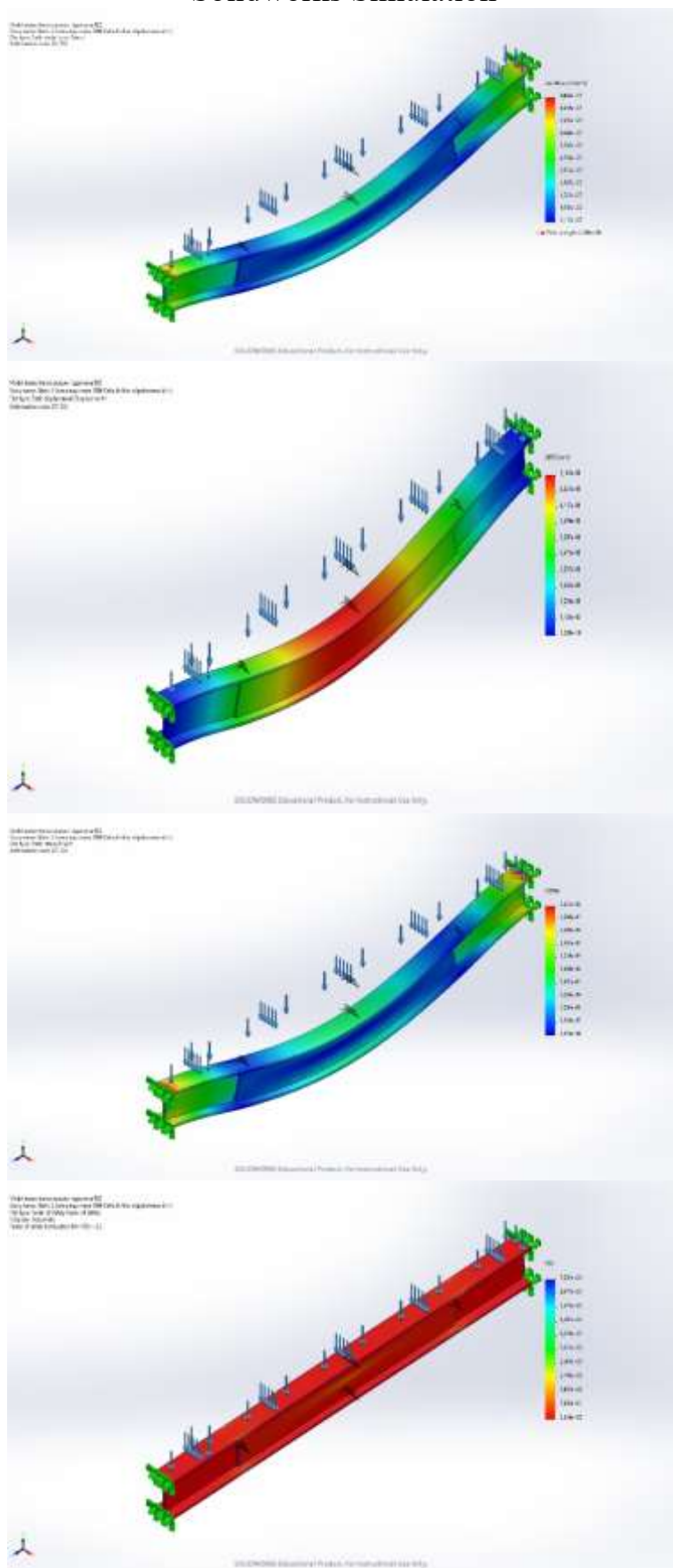
23. Шмиг Р. А. Розрахунок металевих балок : навч. посіб. / За заг. ред. Р. А. Шмига. Львів: Ліга Прес, 2016. 62 с.

24. Pidgurskyi I., Slobodian V., Bykiv D., Pidgurskyi M. Investigation of the stressstrain state of beams with different types of web perforation. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol 103, no 3, 2021. pp. 79–87.

25. Shaikh Ajim, Pawar Tejsvi, Wagh Vrushali, Jadhav Mrunal, Mujawar S. Shirin, Wagh Prakash. *Design and Analysis of Perforated I-Section Beam*. Journal NX-ISSN No: 2581-4230. – 22-23 February 2019, pp. 25-28.

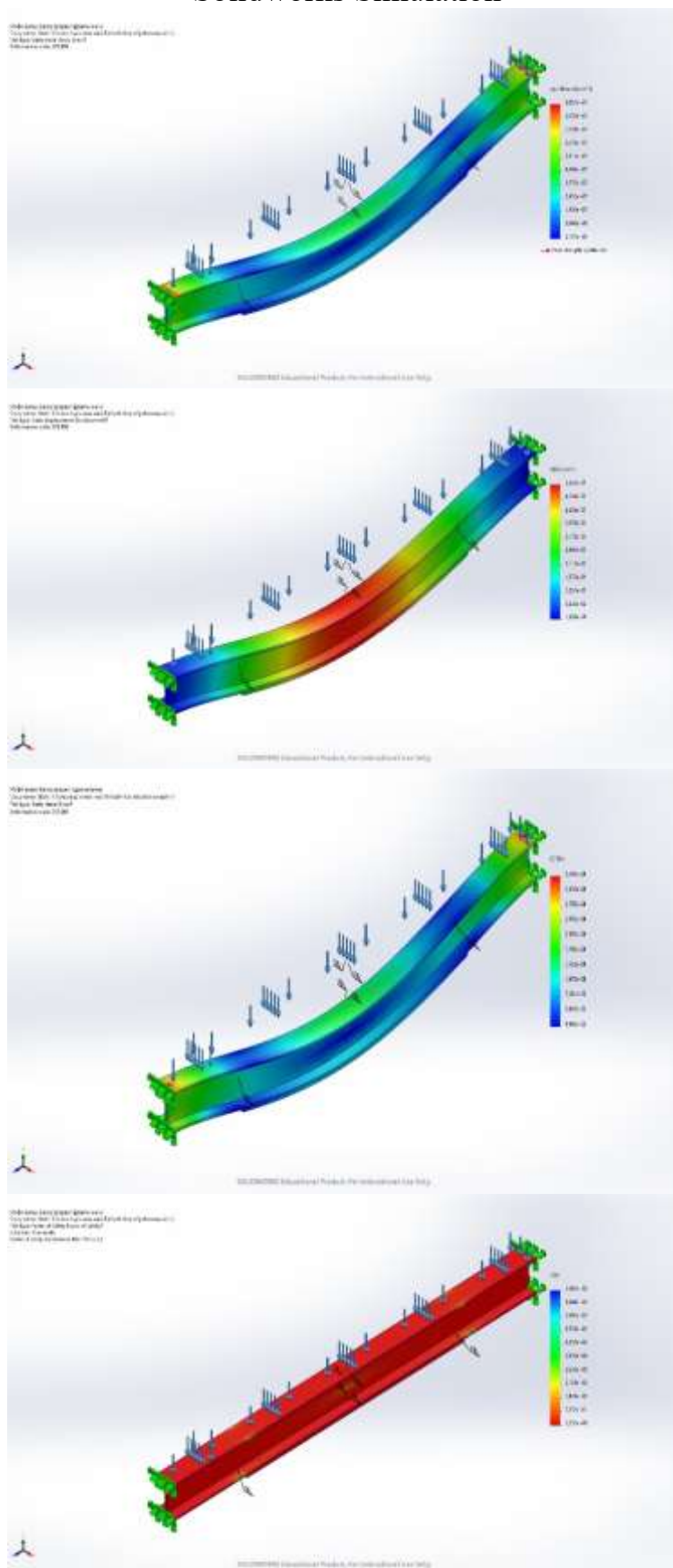
ДОДАТКИ

Додаток 1 Результати дослідження балки, зміцненої за варіантом №2 в середовищі Solidworks Simulation



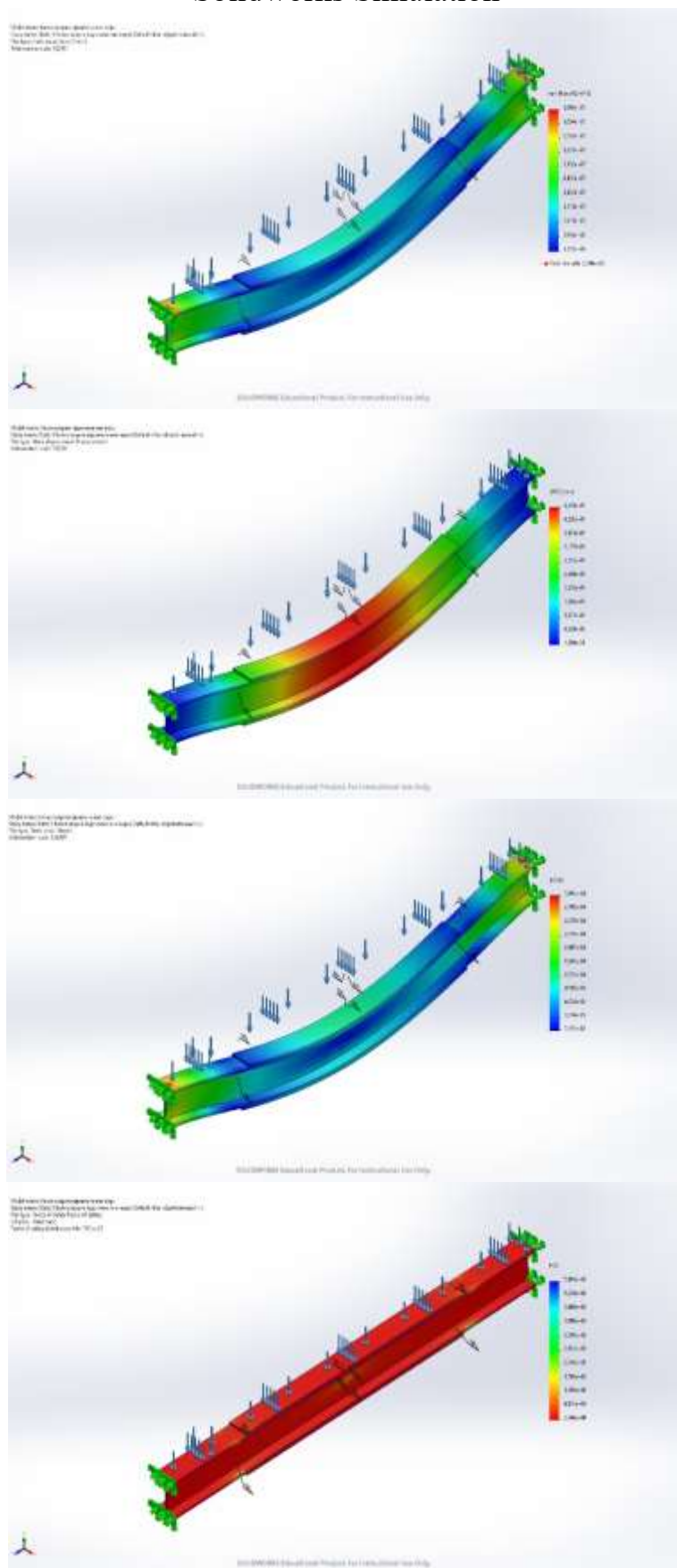
Додаток 2

Результати дослідження балки, зміцненої за варіантом №3 в середовищі Solidworks Simulation



Додаток 3

Результати дослідження балки, зміцненої за варіантом №4 в середовищі Solidworks Simulation



Додаток 4

Результати дослідження балки, зміцненої за варіантом №5 в середовищі Solidworks Simulation

