МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ

КАФЕДРА МІСЬКОГО БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

магістр
(рівень вищої освіти)

на тему Обґрунтування ефективності розташування підсилювальних елементів під час посилення прокатних балок з розташуванням плит на верхньому поясі

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1923-мбг-дн
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Міське будівництво та господарство
(назва освітньої програми)
Струміліна В.О.
(ініціали та прізвище)

Керівник доц., к.т.н, Савін В.О.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент доц.,к.т.н, Банах А. В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра міського будівництва і архітектури
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код та назва)
Освітня програма Міське будівництво та господарство

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
«01» 10 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Струміліні Вірі Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи (проєкту) Обґрунтування ефективності розташування підсилювальних елементів під час посилення прокатних балок з розташуванням плит на верхньому поясі
керівник роботи проф., д.т.н, Савін В.О.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «30» 09 2024 року № 1486-с .

1 Строк подання студентом роботи 01.02.2025

2 Вихідні дані до роботи Актуальність обраного напрямку досліджень, значимість у сучасному житті, можливість розвинення проблематики, перспективи впровадження майбутніх досягнень, мета роботи, завдання до виконання обраних досліджень, об`єкт досліджень, предмет досліджень, передбачувані методи виконання досліджень

3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Літературний огляд. Аналіз теоретичного обгрунтування роботи балок із різними варіантами посилення. Експериментальне дослідження роботи посилених балок.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'яз... креслень) Презентація із результатами аналітичних обґрунтувань наук... напряму досліджень, результатами експериментальних дослід... результати розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних ме... досліджень

5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Савін В.О.		
2	Савін В.О.		
3	Савін В.О.		

6 Дата видачі завдання 01.09.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим...
1	Літературний огляд	01.10	
2	Розділ 1	01.11	
3	Розділ 2	15.11	
4	Розділ 3	01.12	
5	Розробка графічної частини	15.12	
6	Оформлення роботи	15.01	
7	Попередній захист	01.02	

Студент _____ Струміліна В.О.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ Савін В.О.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Гребенюк О.В.
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Струміліна Віра Олександрівна. Обґрунтування ефективності розташування підсилювальних елементів під час посилення прокатних балок з розташуванням плит на верхньому поясі.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 - Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник В.О. Савін. Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні ЗНУ, кафедра міського будівництва і архітектури, 2025.

У роботі розглядаються результати теоретичного та практичного дослідження сталевої, яка посилюється перерізом балки з розташуванням плит перекриття на верхньому поясі. Отриману схему посилення можна ефективно використовувати для вирішення будівельних завдань при посиленні сталевих балок із розташуванням плит на верхньому поясі.

Ключові слова: СТАЛЬ, БАЛКА, ПЕРЕТИН БАЛКИ, МІЦНІСТЬ ТА ЖОРСТКІСТЬ, ДЕФОРМАЦІЯ, МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ.

ABSTRACT

Strumilina Vira Aleksandrivna. Justification of the Effectiveness of the Arrangement of Reinforcing Elements During the Strengthening of Rolled Beams with Slabs Resting on the Upper Belt.

Qualifying graduation thesis for obtaining a master's degree of higher education in the specialty 192 - Construction and civil engineering, academic supervisor V.O. Savin. Engineering Educational and Scientific Institute named after U.M. Potebny ZNU, Department of Urban Construction and Architecture, 2025.

The work examines the results of theoretical and practical research on steel, which involves cutting a beam from moving the floor slabs on the upper chord. The obtained strengthening scheme can be effectively used to increase the

operational requirements when strengthening steel beams from the slabs on the upper chord.

Key words: STEEL, BEAM, BEAM CROSS-SECTION, STRENGTH AND STIFFNESS, DEFORMATION, METAL STRUCTURES.

ЗМІСТ

	ВСТУП……	7
Розділ 1	ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ……	10
1.1	Загальні характеристики металоконструкцій……	10
1.2	Класифікація та причини пошкоджень (аварій) металевих конструкцій……..	15
1.3	Особливості посилення металевих конструкцій……..	25
1.4	Особливості конструкції та роботи сталевих балок…….	31
1.5	Посилення сталевих балок шляхом збільшення перерізу……	49
1.6	Висновки за першим розділом……	64
Розділ 2	ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ БАЛОК……	65
2.1	Теоретичне обґрунтування роботи згинального двотавра……..	65
2.2	Теоретичне обґрунтування роботи згинального двотавра, посиленого смугою, прикріпленою до нижньої полиці на зварюванні……	72
2.3	Теоретичне обґрунтування роботи згинального двотавра, посиленого двома смугами - 50х10 симетричних двох сторін стінки на зварюванні…….	77
2.6	Висновки за другим розділом…….	80
Розділ 3	АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ…..……..	81
3.1	Методика випробування балок……..	81
3.2	Результати випробування зразка марки Б1, еталонної балки……..	88
3.3	Результати випробування зразка марки Б2, посиленого смугою 100х10, прикріпленої до нижньої полиці……..	90
3.4	Результати випробування зразка марки Б3, посиленого двома смугами 50х10, прикріпленими з обох боків стінки симетрично……	93
3.5	Результати випробування зразка марки Б4, посиленого двома смугами 100х10, прикріпленими з обох боків стінки симетрично……	97
3.6	Результати випробування зразка марки Б5, посиленого двома кутками L75х6, прикріпленими з двох сторін стінки симетрично……	99
3.7	Висновки за третім розділом……..	102
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ……		103
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ……..		104

ВСТУП

Актуальність дослідження. На сьогоднішній день застосування металоконструкцій при зведенні будівель і споруд різного призначення є сегментом, що найбільш динамічно розвивається в будівельній індустрії України. Такі конструкції застосовуються як каркаси швидкомонтованих споруд, прогонових конструкцій транспортних мостів, конструктивних елементів покриттів і перекриттів та інше.

У той же час різні експлуатаційні фактори, такі як силові та температурні дії, дії агресивного навколишнього середовища можуть значно знизити несучу здатність і скоротити життєвий цикл будь-якої металевої конструкції.

Актуальність теми дослідження полягає в тому, що будівельні конструкції, які мають здійснювати свою функцію, не створюючи при цьому загрози життю та здоров'ю людей та їх майну, необхідно своєчасно та з мінімальними втратами посилювати та відновлювати. Необхідно передбачити такий спосіб посилення, який зведе до мінімуму витрати, а також втрати, спричинені простоєм виробництва.

Під посиленням металевих конструкцій слід розуміти різні способи відновлення їх проектних характеристик (несучої здатності та стійкості), знижених у процесі експлуатації конструкцій через вплив різних механічних, хімічних та електрохімічних факторів.

При грамотному посиленні металевих конструкцій можна отримати необхідні показники та підібрати максимально просту та ефективну схему виконання виробничих робіт.

У процесі експлуатації будівель та споруд найчастіше виникають ситуації, що вимагають посилення металевих балок та ригелів

Балочні конструкції виконують у кожному будинку важливе завдання. Розташовані в перекриттях між поверхами, ці елементи, що згинаються, служать опорною підтримкою для плит. Приймаючи на себе масу всього, що розміщується вище за їх рівень, ці конструкції піддаються значному

вертикальному тиску.

Визначальними показниками роботи балкового елемента є міцність та жорсткість. У разі недостатності показників міцності і показників жорсткості для забезпечення експлуатаційних якостей необхідне посилення. Одним із способів збільшення несучої здатності і жорсткості балок є збільшення їх перерізу. Завдяки проведенню робіт з посилення можна значно заощадити кошти та збільшити термін служби конструкцій, внаслідок чого споруда знову повертається до свого нормального життя.

Щодо посилення сталевих балок були вивчені різні джерела: рекомендації щодо посилення, навчальні видання. Порушені питання проектування будівельних металевих конструкцій, їхня робота при різних видах навантажень та деякі конструктивні рішення посилення. При цьому проведений нами пошук у технічній літературі виявив лише окремі розрізнені дані та рекомендації фрагментарного характеру щодо досліджуваної в даній роботі схеми посилення сталевих прокатних балок з розташуванням плит на верхньому поясі.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає в обґрунтуванні раціональності схем посилення балок із розташуванням навантаження на верхніх поясах у разі застосування методу збільшення перерізу.

Завдання дослідження:

- Теоретичне обґрунтування роботи балок із різними варіантами посилення.

- Експериментальне дослідження роботи посилених балок.

- Аналіз отриманих результатів.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є сталева прокатна балка двотаврового перерізу.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є ефективність розташування посилюючих елементів під час посилення сталевих балок з розташуванням плит на верхньому поясі.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань використовувалися узагальнення, аналіз теоретичних та практичних досліджень на тему роботи та комплексні дослідження експлуатаційних властивостей фасадних панелей.

Наукова новизна одержаних результатів. Результати теоретичного та практичного дослідження сталевої, яка посилюється перерізом балки з розташуванням плит перекриття на верхньому поясі.

Практичне значення одержаних результатів. Практична значущість полягає в тому, що отриману схему посилення можна ефективно використовувати для вирішення будівельних завдань при посиленні сталевих балок із розташуванням плит на верхньому поясі.

Особистий вклад дослідника. Постановка мети і завдання дослідження. Збір і аналіз даних для проведення дослідження.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, основних висновків, списку використаних джерел, містить 109 сторінок, 55 рисунок, 9 таблиць, 55 список використаних джерел.

РОЗДІЛ 1
ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Загальні характеристики металоконструкцій

Сучасні будівлі та інженерні споруди не можуть успішно функціонувати без таких універсальних конструкцій, як металоконструкції, особливо, якщо потрібні значні прольоти, висота та навантаження. Необхідність у металевих конструкціях дуже велика і безперервно збільшується.

Металеві конструкції відрізняються великою різноманітністю систем і конструктивних форм, але в той же час вони пов'язані між собою двома основними факторами. По-перше, вихідним матеріалом для всіх конструкцій вважається прокатний метал, що випускається за єдиним видом, сортом, розміром, типом виробу. По-друге, всі конструкції мають єдиний технологічний процес виготовлення, в основі якого лежить холодна обробка металу, і мають єдиний вид з'єднання деталей у конструктивні елементи (на зварюванні та на болтах).

Металеві конструкції мають такі переваги:

- надійність, забезпечується за рахунок однорідної дрібнозернистої структури металу та його пружних властивостей;

- легкість, незважаючи на високу щільність сталі, несучі металоконструкції є досить легкими. За показник легкості приймають співвідношення щільності та міцності металу;

- непроникність, завдяки високому рівню щільності, метали непроникні для рідин та газів;

- індустріальність, металоконструкції виготовляють на заводах за допомогою сучасного автоматизованого обладнання, а монтаж на будівельному майданчику виробляють механізованим способом, що прискорює введення в експлуатацію конструкції, а також мінімізує або повністю виключає важку ручну працю.

Але при цьому металоконструкції не позбавлені й недоліків, серед яких:

- корозія, проблема корозії набагато серйозніша, ніж їй, часто, надають значення. Корозія в буквальному значенні може з'їсти 10-20 відсотків річного виробництва сталі: металоконструкції, вироби, обладнання та інше. Незважаючи на те, що в нашій країні накопичено деякий досвід проведення досліджень і розробок нових матеріалів і технологій з метою визначення ефективних методів захисту, проте на сьогоднішній день поки не вдалося створити такий засіб, який повністю захистив би метали і сплави від згубного корозійного. дії. Поки що ми маємо лише можливість для уповільнення процесу корозії та нівелювання негативних наслідків. Ці завдання можна вирішити за допомогою застосування широкого ряду антикорозійних засобів та технологій;

- порівняно невелика вогнестійкість, сталь є негорючим матеріалом, але, як і всі матеріали, які використовуються в будівництві, не може протягом відносно тривалого часу витримати вплив високої температури, яка виникає при пожежі всередині будівлі. У середньому фактична межа вогнестійкості сталевих конструкцій становить лише 15 хвилин. Це можна пояснити досить швидким зниженням під час пожежі деформаційних та міцнісних характеристик металу в умовах підвищених температур.

Якщо фактична межа вогнестійкості не відповідає необхідному, слід застосовувати засоби для його підвищення. До зазначених засобів відносяться конструктивний вогнезахист та тонкошарові вогнезахистні покриття. До найбільш оптимальних варіантів можна віднести нанесення фарби, що спучується, і порівняно новий спосіб - монтаж вогнетривкої ковдри (мату).

При проектуванні металоконструкцій враховуються такі основні вимоги:

- відповідності умов експлуатації;
- економія металу;
- зручне транспортування;
- технологічність у виготовленні;

- довговічність (фізичний та моральний знос; фізичний знос пов'язаний з процесами корозії, а також з пошкодженнями та дефектами, а моральний – зі зміною умов експлуатації);

- швидкісний монтаж;

- естетичність (гармонійні форми).

До основних напрямів розвитку металобудування належить:

- зниження маси конструкцій;

- технологічність у виготовленні;

- технологічність у монтажі;

- зниження вартості експлуатації конструкцій.

Розвиток даних напрямів виготовлення металоконструкцій може здійснюватися через принцип типізації та уніфікації конструкцій (типові серії, типові будівлі). Що призводить до підвищення якості проектування, виготовлення та монтажу конструкцій, а також зниження вартості їх зведення та експлуатації.

Метал для металоконструкцій вибирають на стадії проектування, ґрунтуючись на результатах техніко-економічного аналізу. Необхідно відзначити, що в більшості випадків для виготовлення металоконструкцій, завдяки своїм характеристикам міцності, застосовують прокатні низьковуглецеві і вуглецеві сталі.

ДСТУ EN 10020:2007 застосовано наступний термін з відповідним визначенням: сталь - матеріал (сплав заліза з вуглецем), в якому масова частка заліза більша, ніж масова частка будь-якого іншого елемента, а масова частка вуглецю становить менше 2%, та склад якого входять також інші хімічні елементи.

У твердому стані сталь є полікристалічним тілом, що складається з безлічі по-різному орієнтованих кристалів (зерен), при цьому, чим дрібніше зерно, тим вище якість металу.

Для сталі характерні кубічні кристалічні решітки (рисунок 1.1):

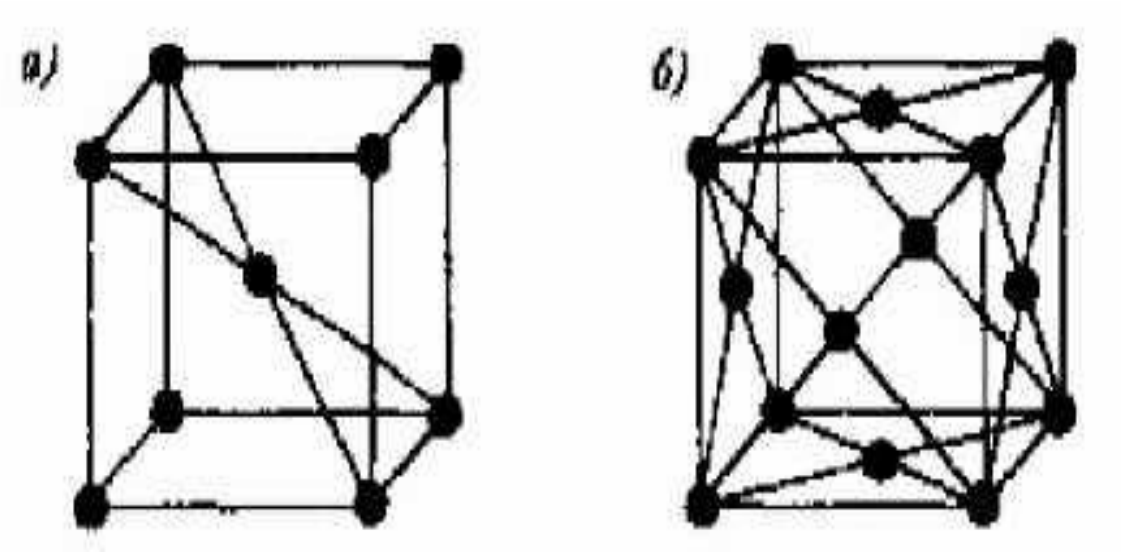


Рисунок 1.1 - Кристалічні решітка сталі
а - об'ємно-центрована (ОЦК), б-гранецентрована (ГЦК)

Структура сталі залежить від умов кристалізації, хімічного складу, режиму термообробки та прокатки.

Сталь, у якій присутні легуючі елементи (що ускладнюють її хімічний склад), називається легованою. При легуванні відбувається збільшення кількості вогнищ кристалізації і, як наслідок, утворення дрібнозернистої структури, що робить сплави міцнішими.

Якість сталі, з якої виготовляють металоконструкції, визначається сукупністю її механічних властивостей: опором статичним впливам (тимчасовим опором і межею плинності при розтягуванні); опором динамічним впливам та тендітному руйнуванню (ударною в'язкістю при різних температурах); показниками пластичності (відносним подовженням); опором розшарування (вигином у холодному стані)»[43].

До того ж, якість сталі визначається ще й опором багаторазовому навантаженню (втомою), зварюваністю та корозійною стійкістю.

Загальної класифікації сталей і сплавів не існує, тому що багато з них можна застосовувати в різних галузях промисловості, тому стали зазвичай класифікують:

- за хімічним складом: вуглецеві (без легуючих елементів),

низьколеговані, леговані, високолеговані.

- за якістю: сталь звичайної якості, якісна, високоякісна та особливо якісна.

- за ступенем розкислення: киплячі (неокислена сталь з високим вмістом неметалічних домішок), спокійні (повністю розкислюється з мінімальним вмістом шлаку та неметалічних домішок) і напівспокійні.

Прокатна сталь, що використовується в сталевих конструкціях, ділиться на дві групи:

- сталь прокатна листова: тонколистова - товщиною до 4 мм. (Використовується у виготовленні гнутих профілів, для покрівельних покриттів); товстолистова - товщина дорівнює 4-160 мм, ширина дорівнює 0,6-3,8 м, довжина дорівнює 6-12 м (використовується в листових конструкціях та в елементах суцільних систем, таких як балки, колони, рами); широкосмугова універсальна - товщина дорівнює 6-60мм, ширина дорівнює 0,2-1,5м, довжина дорівнює 5-12м; просічно-витяжна - товщина дорівнює 4,5-6мм; смугова сталь – ширина до 200мм (використовується для діафрагм, ребер жорсткості); рифлена сталь: товщина дорівнює 2,5-8мм;

- сталь профільна - куточки, швелери, двотаври, таври, труби і т.п.

Марку стали обирають на основі варіантного проектування та техніко-економічного аналізу з урахуванням ДБН В.2.6-198:2014[36]. Вибір марки сталі для будівельних конструкцій залежить від наступних параметрів, що впливають на роботу матеріалу:

- товщина елементів конструкції;

- спосіб з'єднання елементів металоконструкцій;

- динамічні та статичні навантаження, що сприймаються;

- кліматичні умови при монтажі та експлуатації металоконструкції;

- ступінь відповідальності будівель і споруд;

- рівень напруг, що сприймаються.

Залежно від умов роботи матеріалу всі види металоконструкцій поділені на чотири групи відповідно до ДБН В.2.6-198:2014 [36]:

У 1 групу входять зварні конструкції або їх елементи, що працюють в особливо важких умовах, у тому числі максимально утискують розвиток пластичних деформацій, або піддаються безпосередньому впливу динамічних, вібраційних або рухомих навантажень (балки кранових шляхів; балки робочих майданчиків; балки шляхів підвісного транспорту; елементи конструкцій бункерних та розвантажувальних естакад, що безпосередньо сприймають навантаження від рухомих складів і т.д.);

У 2 групу входять зварні конструкції або їх елементи, що працюють при статичному навантаженні за наявності розтягуючих напруг (ферми; ригелі рам; балки перекриттів і покриттів та інші розтягнуті, розтягнуто-згинальні та згинальні елементи), а також конструкції та їх елементи групи 1 за відсутності зварних з'єднань та балки підвісних шляхів з двотаврів за наявності зварних монтажних з'єднань.

У 3 групу входять зварні конструкції або їх елементи, що працюють при статичному навантаженні, переважно на стиск (колони; стійки; опорні плити; елементи настилу перекриттів; конструкції, що підтримують технологічне обладнання та інші стислі та стисло-згинальні елементи), а також конструкції та їх елементи групи 2 за відсутності зварних з'єднань.

У 4 групу входять допоміжні конструкції будівель та споруд (зв'язки, крім зазначених у групі 3; елементи фахверка; сходи; трапи; майданчики; огородження тощо), а також конструкції та їх елементи групи 3 за відсутності зварних з'єднань.

1.2 Класифікація та причини пошкоджень (аварій) металевих конструкцій

У процесі експлуатації металоконструкцій, як показали спостереження, відбувається циклічна зміна їх надійності, що, головним чином, пов'язане з мінливістю величин навантажень і зміною здатності, що несе, в результаті різних пошкоджень.

Для більш повного розуміння причин ушкоджень сталевих конструкцій розглянемо класифікацію, характер навантажень та впливів на металоконструкції.

Тимчасові навантаження, своєю чергою, поділяються на тривалі, короткочасні і особливі.

Відповідно до ДБН В.1.2-2:2006 [38] до постійних навантажень слід відносити: вага частин споруд, у тому числі несучих та огороджувальних будівельних конструкцій; вага та тиск ґрунтів (насипів, засипок), гірничий тиск; гідростатичний тиск.

Тривалі навантаження - це навантаження, зміни розрахункових значень яких протягом розрахункового терміну служби будівельного об'єкта дуже мало в порівнянні з їх середніми значеннями. До цього пункту можна віднести: «вага перегородок, підлив, підбітонок; вага стаціонарного обладнання, інженерних комунікацій; тиск рідин, газів, сипких тіл у ємностях; вага матеріалів, що складуються; температурні та технологічні впливи від обладнання; вага відкладів виробничого пилу; впливу, зумовлені деформаціями основи, зміною вологості, усадкою, повзучістю »[38].

Короткочасні навантаження - це навантаження, тривалість дії розрахункових значень яких значно менше терміну служби споруди. До короткочасних навантажень відносяться: навантаження від обладнання, що виникають у пускозупинному, перехідному, випробувальному режимах; під час перестановки обладнання, вага людей та ремонтних матеріалів у зонах обслуговування обладнання, навантаження від людей, тварин, обладнання на перекриттях житлових, громадських, сільськогосподарських будівель з повними нормативними значеннями; навантаження від рухомого підйомно-транспортного обладнання, включаючи вагу вантажів, що транспортуються, від транспортних засобів, кліматичні (снігові, вітрові, температурні, ожеледні) навантаження; навантаження, що виникають при виготовленні, зберіганні та перевезенні конструкцій.

Особливі навантаження - це навантаження та впливи (наприклад, вибух,

зіткнення транспортних засобів з частинами споруд, аварія обладнання, пожежа, землетрус, деякі кліматичні навантаження, відмова роботи несучого елемента конструкцій), що створюють аварійні ситуації з можливими наслідками.

Розрахунок конструкцій виконується на дію навантажень у різних поєднаннях. Одночасна дія постійних, тривалих та короткочасних навантажень називається основним поєднанням. Імовірність одночасного впливу найбільших навантажень враховується коефіцієнтами сполучень [4].

У своїй книзі «Причини аварій сталевих конструкцій та способи їх усунення» Бєляєв Б.І. та Корнієнко В.С. описують аварійні стани металоконструкцій наступним чином: «вихід з ладу або відмова будівельної конструкції - подія, після якої стає неможливою нормальна експлуатація будівлі чи споруди без проведення відповідних ремонтних чи відновлювальних робіт.

До таких відносять:

1) розлад з'єднань елементів конструкцій один з одним;

2) місцеві порушення цілісності елементів та їх з'єднань (тріщини);

3) місцеві та загальні деформації конструкцій, що перевищують норму;

4) граничний випадок відмови - повний вихід конструкції з ладу, її часткове чи повне руйнування (аварія).

У разі виходу з ладу будівельної конструкції, яка вже закінчена монтажем або перебуває в експлуатації, завжди виникає питання про її надійність. Надійність конструкції зазвичай визначають як сукупність властивостей, якими забезпечується її безперебійна нормальна експлуатація у умовах» [27].

- Катастрофи споруд завжди приковували до себе увагу вчених всього світу, тому існує безліч різних підходів до складання класифікації аварій будівельних конструкцій. Наприклад, Інкін О.В. класифікує аварії за трьома основними групами залежно від причин їх виникнення [17]:

- аварії, спричинені такими природними явищами як ураган, землетрус,

повінь та інше;

- найбільша група, куди відносяться аварії, викликані недоліками інженерно-технічних прийомів;

- аварії конструкцій, спричинені різними соціально-економічними факторами.

До того ж у своїх працях він особливо торкається технічних причин катастроф, які також виділяє в три групи: втрата стійкості, дефекти основи та неякісні роботи.

Варто особливо відзначити, що в основу його класифікації лягли дані про зарубіжні аварії та аварії мостів та гідротехнічних споруд та мало зачіпає аварії металоконструкцій цивільних та промислових споруд.

На відміну від попередньої класифікації, В.М. Конкін розглядав аварії та катастрофи саме металевих конструкцій, і за характером та причинами виникнення він виділяє чотири групи катастроф, які спровоковані наступними дефектами [22]:

- дефекти через помилки проектування;

- дефекти, що виникли у процесі виконання робіт;

- дефекти, що виникли в процесі експлуатації споруди;

- дефекти, що виникли через погано вивчені умови роботи та властивості матеріалів.

Розглянемо докладніше, яким ушкодженням, залежно від їх впливів, можуть піддаватися сталеві конструкції в процесі їх експлуатації:

1) внаслідок силових впливів: втрата стійкості, тріщини, розриви (рисунок 1.2).

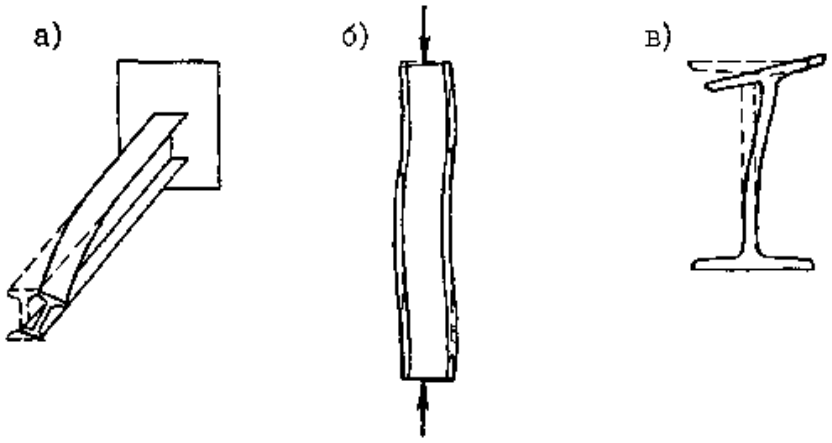


Рисунок 1. 2 - Ушкодження сталевих конструкцій від силових впливів :

а – загальна втрата стійкості балки; б – загальна втрата стійкості стійки; в - втрата місцевої стійкості балки

«Виникають внаслідок помилок, допущених при проектуванні, зменшенні перерізів елементів при виготовленні, недоброякісного монтажу конструкцій, збільшення навантажень від технологічного обладнання проти проектних, перевантаження покриттів від снігу та різних пилоподібних виносів із джерел їх утворення. Ушкодження, що розглядаються, найчастіше з'являються в результаті статичного перевантаження окремих конструкцій, а також від динамічних і вібраційних впливів, що виникають від обладнання, встановленого з порушенням технологічних норм проектування. Перевантаження конструктивних елементів каркаса може виникнути внаслідок ослаблення окремих елементів. Це може статися, якщо в елементах несучих конструкцій прорізаються отвори, зрізаються окремі елементи ґратчастих конструкцій» [32];

2) в результаті механічних впливів: викривлення, загинули, вм'ятини, стирання. «Виникають в результаті неправильного транспортування та монтажу конструкцій, неправильного транспортування різних вантажів як мостовими кранами, так і внутрішньомайданним залізничним та автомобільним транспортом, підвіски до конструкцій важких деталей при

ремонті обладнання, порушень правил технічної експлуатації будівлі» [32];

3) в результаті фізичних впливів: крихкі тріщини при великих негативних температурах, руйнування при високих температурах, жолоблення. «Виникають у результаті близького розташування елементів конструкцій до джерел тепловиділення, при впливі негативних температур на вуглецеві сталі з підвищеним вмістом фосфору та сірки» [32];

4) в результаті корозійного впливу: «Корозія (лат. corrosio - роз'їдання) металів визначається як процес (або результат) мимовільного руйнування металів при їх хімічній, електрохімічній чи біологічній взаємодії з навколишнім середовищем, внаслідок якого атоми металів та сплавів, а також металеві вироби та конструкції з металевого стану переходять у хімічні сполуки» [21].

Корозія металів має складний механізм і гетерогенним, тобто. неоднорідним процесом, це свідчить, що корозійне руйнація не поширюється на поверхні металу чи його сплаву рівномірно, а пошкоджує, зазвичай, лише певні ділянки поверхні, тобто. носить локальний характер. Для розуміння цього процесу слід знати, що всі метали мають зернисту структуру, межі цих зерен складаються з дрібних кристалів, а корозія, у свою чергу, під впливом агресивного середовища поширюється на межі цих зерен. Далі атоми металу окислюються, переходять в іони і взаємодіючи з агресивним зовнішнім середовищем, утворюють продукти корозії.

Розрізняють два основні види корозії металевих будівельних конструкцій: хімічну та електрохімічну (рисунок 1.3).

За характером руйнування можна виділити суцільну, загальну та місцеву корозію.

Суцільна корозія виникає зазвичай під впливом таких чинників, як кислоти, луги, атмосфера і охоплює всю поверхню металу.

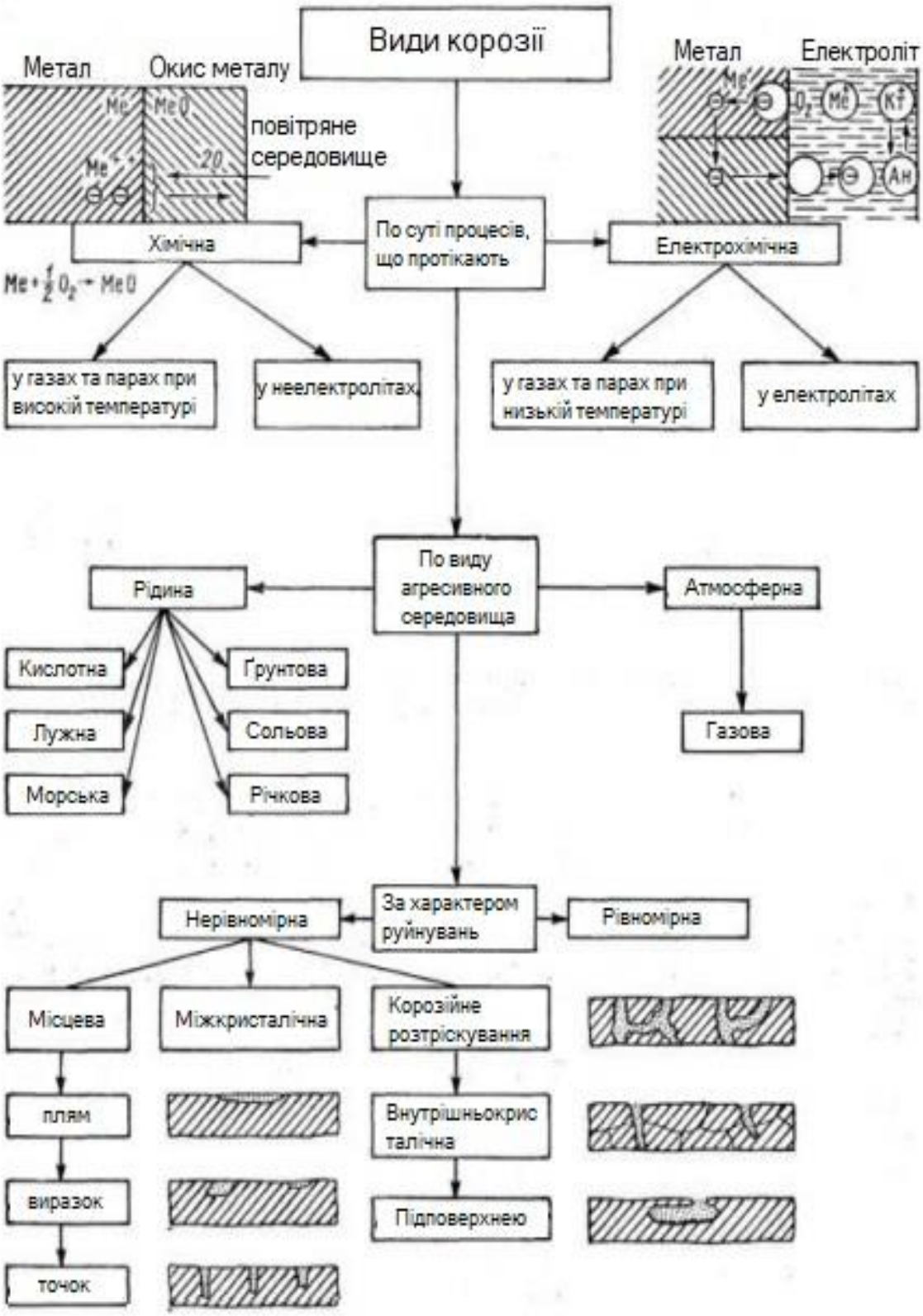


Рисунок 1.3 - Види корозії металевих конструкцій

Місцева корозія навпаки має локальний характер і зачіпає лише окремі ділянки поверхні металу. Якщо процес корозійного руйнування поширюється з однаковою швидкістю, це називається рівномірною корозією, інакше вона називається нерівномірною корозією. Виборча корозія характерна для сплавів і полягає у неоднаковій швидкості руйнування одного з металів у сплаві.

«Швидкість корозії в повітряному середовищі з невеликою відносною 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 служби зменшуються незначно. Швидкість корозії в повітряному середовищі в несприятливих умовах протікає швидко і досягає 0,1 мм і більше на рік. Така корозія небезпечна для конструкцій, оскільки вона значно зменшує їх товщини та площі перерізів, внаслідок чого вони швидко виходять із ладу» [42].

Обстеження металевих конструкцій проводиться з метою перевірки цілісності споруди та виявлення різноманітних дефектів.

На сьогоднішній день виявити дефекти та пошкодження металевих конструкцій дозволяє експертиза, правила проведення якої регламентує ДСТУ 9273:2024 [10].

До завдань комплексу робіт із обстеження можна віднести:

- визначення технічного стану об'єкта за зовнішніми ознаками;
- виявлення корозійних ушкоджень та оцінка ступеня їх тяжкості;
- обстеження металевих з'єднань різного типу;
- визначення якості матеріалу, з якого виконана конструкція.

З проведених робіт робиться висновок про можливість подальшої експлуатації конструкції.

Оцінка ступеня конкретних ушкоджень проводиться у разі допусканим відхиленням відповідні дефекти, регламентовані нормами.

«Відмінні риси металевих конструкцій, що враховуються при посиленні:

- висока однорідність матеріалу, що зумовлює високий рівень відповідності роботи елементів і вузлів розрахунковим передумовам і,

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 перенапруг елементів металевих конструкцій;

- висока питома міцність (відношення міцності до маси матеріалу) зумовлює тонкість і гнучкість несучих елементів, отже, схильність (під впливом різних випадкових впливів при виготовленні, перевезенні, монтажі, експлуатації) різним деформаціям, що особливо небезпечно для стиснених елементів; - схильність до тендітного та втомного руйнування за наявності різних концентратів напруг, особливо тріщин, у поєднанні з низькими температурами та динамічними навантаженнями;

- наявність зварних з'єднань, що мають відмінні від основного металу фізико-механічні властивості і характеризуються значним розкидом експлуатаційних властивостей в залежності від якості накладання зварних швів »[13].

Статистика з аварій/обрушень на період з 2020 р. 2022 р. наступна:

- 42% - низька якість монтажу;

- 18% - неякісне виготовлення конструкцій та матеріалів;

- 18% – незадовільна експлуатація;

- 14% - сукупність причин;

- 8% - помилки при інженерних дослідженнях, проектуванні, недосконаліть нормативної бази.

Частка аварій на будівлях та спорудах з металевими конструкціями з 1981 по 2003 роки в середньому становила 17-19% від їх загальної кількості. В окремі роки (1999) вона досягала 33%. Здебільшого аварії відбуваються на одноповерхових будинках виробничого призначення з металевим каркасом, різного роду будинках модульного типу, резервуарах, водонапірних вежах.

Як приклад можна навести аварію, яка мала місце 13 січня 2021 року у м. Запоріжжі. На території заводу АТ «Запорізький завод феросплавів» обвалився дах виробничого цеху (рисунок 1.4).

Результати будівельно-технічної експертизи: «Ймовірною причиною обвалення покрівлі цеху на території АТ «Запорізький завод феросплавів» стало фізичне зношування матеріалу конструкцій металевих ферм та скупчення снігу на покрівлі».



Рисунок 1.4 - Обвалення даху виробничого цеху

Таким чином, «надійність конструкцій та споруд залежить від багатьох факторів: марки матеріалу, перерізу елементів, їх форми, якості виготовлення та монтажу, умови експлуатації, своєчасного ремонту, у необхідних випадках – посилення конструкцій тощо. п. Всі ці фактори впливають на термін нормальної експлуатації та визначають несучу здатність споруди та її окремих конструктивних елементів. Кожна конкретна аварія є результатом сукупності кількох причин, поєднання кількох несприятливих факторів.

У багатьох випадках, головним чином за повного обвалення конструкції, буває важко встановити основну причину аварії. Наприклад, при огляді ферм, що обрушилися, з погнутими стрижнями мимоволі виникає підозра на можливу втрату стійкості; при більш ретельному вивченні характеру обвалення з'ясовується, що ці стрижні дійсно втратили стійкість, але вже при

обрушенні - при падінні одних конструкцій на інші. Встановлення у кожному даному випадку основний причини аварії має першорядне значение» [17].

Вирішенням проблеми дефектів та пошкоджень сталевих конструкцій в залежності від причин їх появи є їх посилення такими методами як: збільшення площі перерізу елементів, використання додаткових зв'язків, зміна конструктивних схем та деякі інші.

1.3 Особливості посилення металевих конструкцій

«Виробництво робіт із посилення будівельних конструкцій потребує витрат і, як правило, неминучі деякі обмеження технологічного процесу. Тому посилення чи 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 виробляється виходячи з кількох конкурентоспроможних варіантів з урахуванням технологічності» [14].

Посилення може бути:

- «аварійним, виробляється в екстремальних ситуаціях для термінового відновлення несучої здатності, при використанні найпростіших методів, розрахованих на короткий термін експлуатації до капітального відновлення» [15]. Загалом воно має ті ж особливості, що й тимчасове. Однак, є одна серйозна відмінність: конструкція, що посилюється, може перебувати в момент посилення в граничному стані »[15];

- «тимчасовим, який здійснюється, якщо необхідно забезпечити у плановому порядку нормальну експлуатацію до капітального посилення» [15]. «Спосіб даного посилення спрощено, що можна пояснити недовгим терміном служби конструкції і вкрай коротким терміном робіт з посилення. Зазвичай як матеріали такого посилення застосовують канати, троси, тяжи з круглого заліза; приєднання елементів на болтах» [15].

- «капітальним, які застосовуються для вирішення завдань при

реконструкції будівель та споруд» [2];

«Капітальне посилення передбачає тривалий термін служби посиленої конструкції. Стандартним матеріалом посилення у разі виступає будівельна сталь. З'єднання основних та підсилюючих елементів проводиться, в основному, на зварюванні» [2];

– «перспективним, коли на конструкцію в період експлуатації передбачаються збільшення технологічних навантажень та інші зміни умов експлуатації» [2].

«Спосіб посилення розрізняють за рівнем навантаженості на момент посилення:

- під навантаженням, який є найбільш складним і відповідальним видом посилення, вимагає детального обстеження конструкції, що зберігається, надійної оцінки її напруженого стану і спеціальних прийомів посилення, що дозволяють включити елементи посилення в роботу існуючої конструкції;

- з частковим розвантаженням - це найбільш поширений спосіб, що передбачає відсутність під час посилення тимчасового навантаження, наприклад снігової, кранової, технологічної тощо;

- з повним розвантаженням - це метод із повним зняттям тимчасової навантаження, застосовується при аварійно-відновлювальних роботах чи конструкцій, основний котрим є корисна (тимчасова) навантаження» [2].

«На практике зачастую усиление строительных конструкций производится не одним из перечисленных способом, а их сочетанием. Выбор наиболее эффективного решения целесообразно производить через сравнение проектных вариантов с учетом условий проведения работ.

Необхідність посилення обумовлюється факторами, що перешкоджають продовженню 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 або витривалості;

- експлуатаційним зносом, включаючи корозійний знос, та зміною умов експлуатації» [6].

При виборі певного способу посилення металоконструкцій слід врахувати ряд різних факторів:

- можливість виконання робіт без зупинки виробництва або з мінімальною тривалістю зупинення технологічного процесу;

- технологічні можливості виготовлення та монтажу елементів посилення; - умови спирання на балку елементів перекриттів чи покриттів (по верхньому чи нижньому поясу);

- можливість збільшення будівельної висоти балки та наявність простору розміщення елементів посилення»[6].

«Основними способами посилення конструкцій є:

- збільшення площі поперечного перерізу окремих елементів конструкції;

- зміна конструктивної схеми всього каркаса або окремих елементів його;

- регулювання напруг.

Кожен із цих способів застосовується самостійно чи комбінації з іншим» [6].

Посилення балок шляхом зміни конструктивної схеми (рисунок 1.5) мало залежить від місця спирання плит настилу, проте при посиленні за схемами «а» і «б» шляхом перетворення розрізної конструкції на нерозрізну потрібна можливість доступу до вузлів сполучення.

Встановлення додаткових підкосів (схеми "в" і "г") можливе за наявності вільного простору під балками.

Використання цих схем залежить також від способів посилення колон та фундаментів.

За наявності вільного простору під центральною частиною балки ефективними можуть бути схеми «д» та «е» з одно- або двостоєчним шпренгелем. При використанні цих схем слід забезпечити конструктивні

методи розкріплення точок перегину шпренгелю із площини системи.

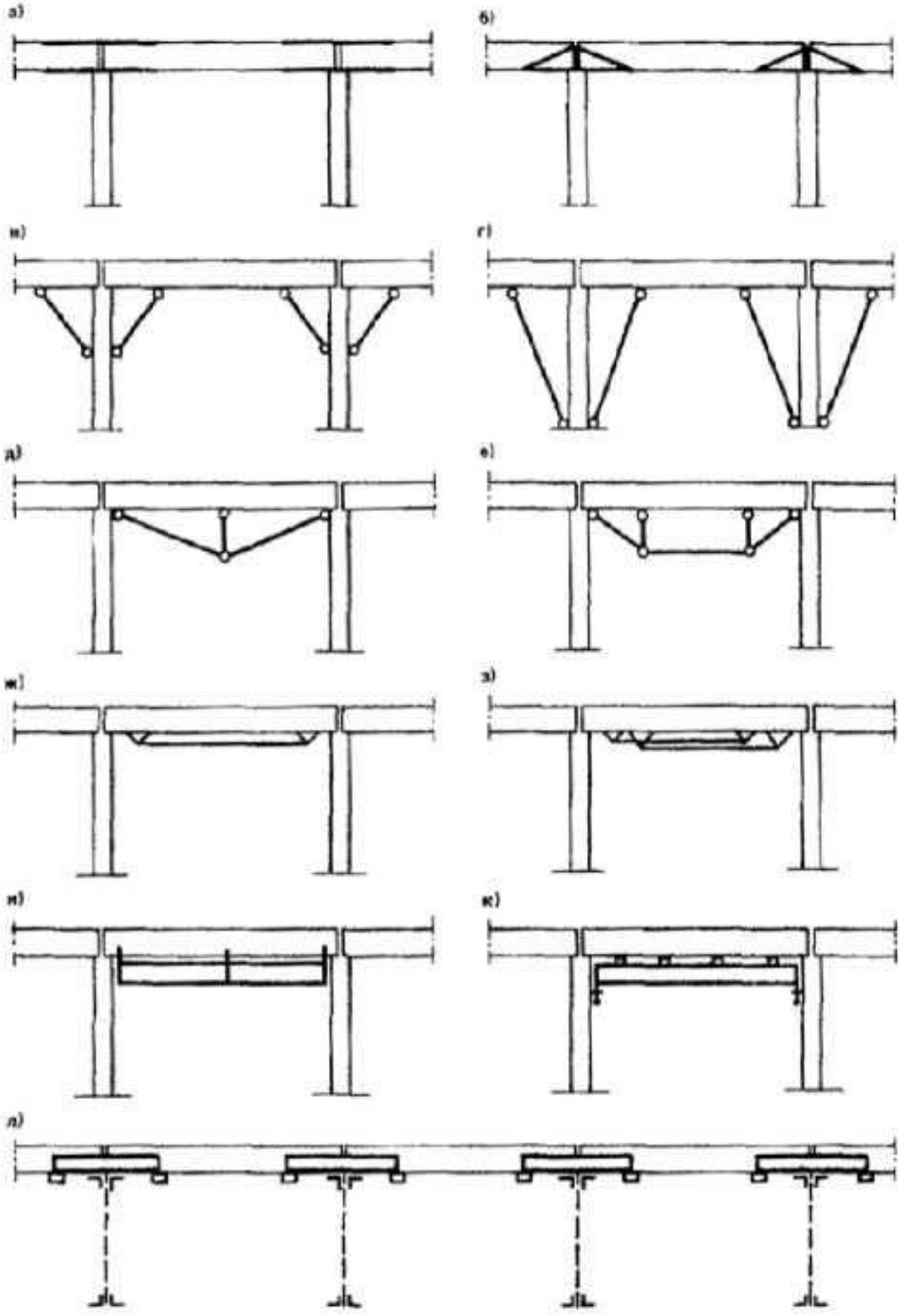


Рисунок 1.5 - Посилення балок шляхом зміни їхньої конструктивної схеми (а-л - схеми посилення)

Рекомендується також способи посилення балок за допомогою додаткових затяжок (схеми «ж» і «з») та підведення додаткових балкових конструкцій (схеми «і», «к») для посилення прогонів раціональна схема «л» з підведенням додаткових опор, що передають навантаження на паралельно встановлювані двоконсольні попруги» [44].

По суті, у всіх випадках посилення із зміною конструктивних схем розумно використання методів активного регулювання зусиль для включення в роботу нових елементів.

Якщо при збільшенні навантажень не забезпечена міцність стінки по зрізу або її стійкість, то рекомендується встановлення додаткових поперечних, поздовжніх або похилих ребер жорсткості. Похилі ребра жорсткості (рисунок 6) можуть використовуватися як без пригонки до поясів балки, так і з пригонкою, в першому випадку вони вважаються не працюючими на поперечну силу і служать тільки для забезпечення місцевої стійкості, у другому - значно знижують дотичні напруги в стінці [22].

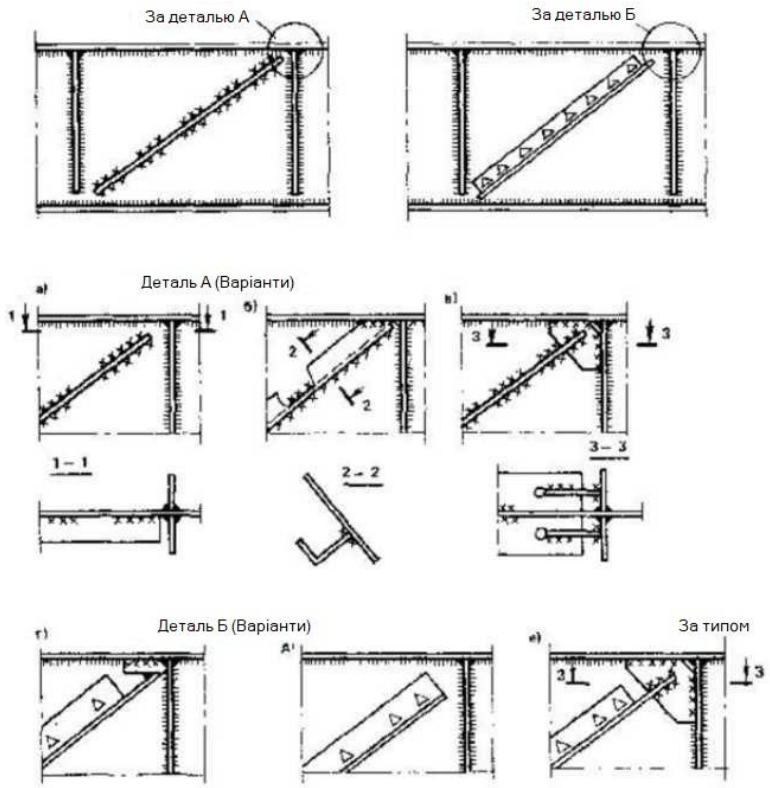


Рисунок 1.6 - Встановлення похилих ребер жорсткості

а-д - без підгонки до поясів; б-г, е - з підгонкою

«При приварюванні додаткових ребер рекомендується використовувати одностороннє розташування ребер та шви мінімального катета. Діагональні ребра, пригнані до поясів, рекомендується проектувати парними (двосторонніми) зі смугової сталі або куточків із кріпленням до полиць і вертикальних ребрів на кшталт схем «в» і «е» встановлювати їх уздовж стиснутої діагоналі відсіку» [22].

Загалом, «посилення сталевих балок у складі різних металоконструкцій виконують за наявності таких дефектів: загальні викривлення у площині більшого чи меншого моментів інерції; скручування; погнутості, тріщини, пробоїни; надриви у стінці. При цьому слід врахувати, що пошкодження можуть бути частковими та комбінованими.

«При проведенні ремонтних робіт (посилення) сталевих балок необхідно дотримуватися наступних рекомендацій. Балки з викривленнями в площині більшого моменту інерції, за умови, що розмір пошкодженої ділянки не менше 1/100 від усього прольоту їх необхідно демонтувати та виправляти. При різких викривленнях балки необхідно розрізати в тих місцях, де відбулися найбільші вигини, виправляти, а потім стикувати.

У площині меншого моменту інерції при викривленні сталевих балок на величину, що не перевищує половину ширини полиці, слід ставити додаткові зв'язки з тяжів та розпірок» [22].

При цьому слід врахувати, що у всіх прикладах при виправленні балок і прогонів слід підготувати достатню ширину спирання на них елементів перекриттів і покрівлі.

Погнутості стінок балок і прогонів рекомендується усувати посиленням пошкоджених місць приваркою ребер жорсткості, які приганяють по вигнутості стінки. Відстань між ребрами жорсткості має перевищувати половини висоти балки. Місцеві вм'ятини, викривлення, пробоїни, тріщини, надриви та розриви по всьому перерізу балок та прогонів, виконаних з гарячекатаних, гнутих та зварних двотаврів та швелерів, рекомендується усувати приварюванням накладок.

Розміри накладки визначаються зусиллям, що припадає на пошкоджену частину перерізу, тобто. полицю, стінку або на перетин. Ширина накладки призначається так, щоб виконувалася умова P/aδ<R, де R - розрахунковий опір сталі; δ – товщина пошкодженої частини перерізу; P - зусилля в пошкодженій частині перерізу, виходячи з його несучої здатності. Місцеві вм'ятини та викривлення в одній із площин або гвинтоподібні викривлення, якщо вони не можуть бути усунені редагуванням, слід вирізати, а вирізане місце замінити. Тріщини, розташовані тільки в частині висоти стінки, рекомендується перекривати накладками з одного боку стінки, а тріщини по всій висоті - з обох боків кінці тріщин засвердлюють.

Якщо поставити накладку на місце ушкодження неможливо, слід перекрити тріщини кількома окремими ромбічними накладками, пригнаними по погнутості, і зміцнити стінку ребром жорсткості. Зварні шви, що мають тріщини, рекомендується посилювати підварюванням або розсвердлюванням або фрезеруванням дефектних ділянок з подальшим проварюванням швів.

Якщо одночасно з відновленням передбачається збільшення навантаження на балку, то з метою зменшення зусиль на її пошкоджені ділянки рекомендується змінювати конструктивну схему балки пристроєм шпренгелю, підкосів, затяжки, перетворити балку на залізобетонну з використанням сталевої балки як жорстку арматуру» [1].

1.4 Особливості конструкції та роботи сталевих балок

Будівництво будівель та споруд будь-якого призначення не обходиться без металевої балки – основного найпростішого конструктивного елемента, що має мінімум дві опорні точки на своїх кінцях та працює на вигин. Металеві балки являють собою конструктивний елемент і надійну опору будівель, що швидко зводяться: промислових об'єктів, цехів, житлових і громадських споруд. Також широко застосовуються при будівництві мостів, опор, естакад, підвісних шляхів та інше. Дуже широкого поширення балкові конструкції

набули через простоту у виготовленні та надійності при експлуатації.

При цьому слід пам'ятати, що в цивільному та промисловому будівництві металеві балки застосовують для прольотів, що не перевищують 18 м, а при більшій величині прольоту прийнято монтувати ферми.

Існує три категорії сталевих балок, що застосовуються під час будівництва та реконструкції сучасних об'єктів:

- таврові: металевий профіль із поперечним перерізом Т-типу;
- двотаврові: тип сортового металопрокату з Н-подібним перетином;
- швелер: металевий профіль з П-подібним перерізом.

Існують різні варіанти класифікації сталевих балок, але найпоширеніший - це поділ за способом виготовлення (рисунок 1.7): прокатні балки та складові балки (зварні, клепані та болтові).

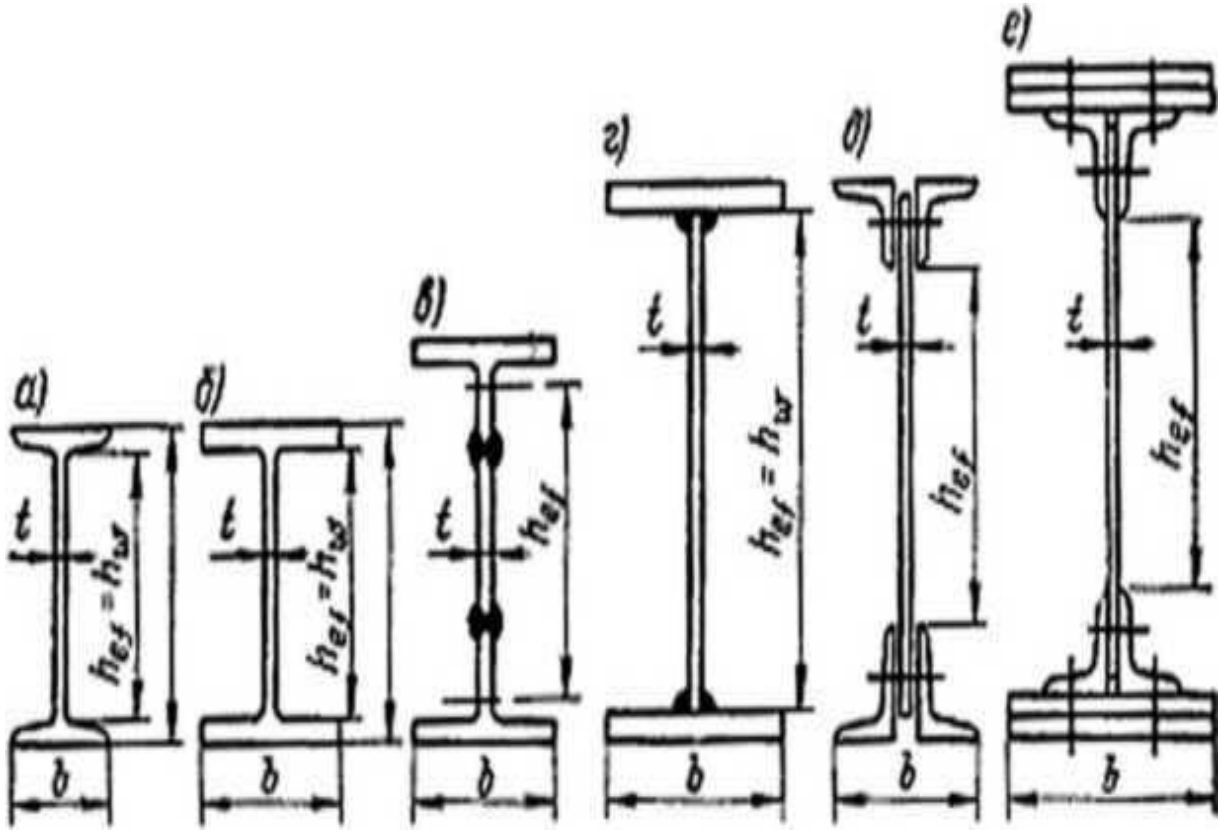


Рисунок 1.7- Прокатні та складові (зварні) двотаврові балки :

а) прокатний двотавр; б) те саме з паралельними гранями; в) зварний, складений із двох тавpів; г) звареної з листів; д, е) складене на високоміцних болтах

У сучасному будівництві переважно застосування прокатних сталевих балок, так як вони менш трудомісткі, але при цьому через обмеженість сортаменту їх застосування неможливе при великих згинальних моментах. Прокатні двотаври випускаються висотою до 1 м, тому ними можна перекрити проліт лише до 12-15 м »[7].

Вибір прокатних балок здійснюється за сортаментом ДСТУ EN 10034:2006 [12]: звичайний двотавр, двотавр з паралельними гранями полиць (рисунок 1.7 а, б).

При цьому, якщо в діючому сортаменті немає профілю, який здатний сприймати навантаження, що діє, то в такому випадку вдаються до складових балок. Перетин складових балок зазвичай складається з трьох листів: вертикального - стінки і двох горизонтальних - полиць (поясів), з'єднаних за допомогою зварювання (рисунок.1.7,е). Застосовують також інші перерізи, наприклад, два прокатних тавра, з'єднаних з листом»[7] для отримання стінки збільшеної висоти або полиці з куточків та стінка з листової сталі. За способом з'єднання між собою основних елементів складові балки бувають зварними (найпоширеніші), клепаними і на міцних болтах, які застосовуються при важких динамічних або вібраційних навантаженнях.

Існує також класифікація сталевих балок на кшталт стінки: суцільна, гнучка, перфорована (хвиляста), попередньо напружена.

Балки з гнучкою стінкою мають, як переваги, так і недоліки: у них більш економічна витрата металу, але при цьому для забезпечення додаткової жорсткості стінки доводиться вдаватися до встановлення поперечних або поздовжніх ребер жорсткості. Область застосування таких балок визначається особливостями цих конструкцій.

Використання в сучасному будівництві сталевих балок з перфорованою (хвилястою) стінкою (рисунок 1.8) дозволяє зменшити товщину стінки до 2 мм і як наслідок скоротити витрату металу до 30%, а також збільшити жорсткість і здатність, що несе, за рахунок збільшення перерізу в 1,5 рази. До балків, що розглядаються, відносяться балки, в стінках яких з метою підвищення місцевої

стійкості створені гофри різної форми і розміру. Виготовляють такі балки декількома способами: вирізують отвори необхідного розміру в стінці балки або розрізають стінки прокатного двотавра по ламаній лінії в поздовжньому напрямку, після чого зсувають гребені вирізу, а місця з'єднання зварюють.

Якщо порівнювати балки з гнучкою стінкою і з гофрованою стінкою, то при приблизно однакових характеристиках гнучкості та економії металу, раціональнішим буде застосування балок з перфорованою стінкою, завдяки меншій кількості ребер жорсткості, підвищеної жорсткості крутильної, а також більшої місцевої стійкості стінки. технологічно гофрування виконати простіше, ніж пристрій ребер жорсткості.

Достатньо широкого застосування отримали попередньо напружені балки. «Ефективність попередньої напруги стінки балки у тому, що у балці під час її монтажу створюються попередні напруги, зворотні за знаком напруг від навантаження»[16].

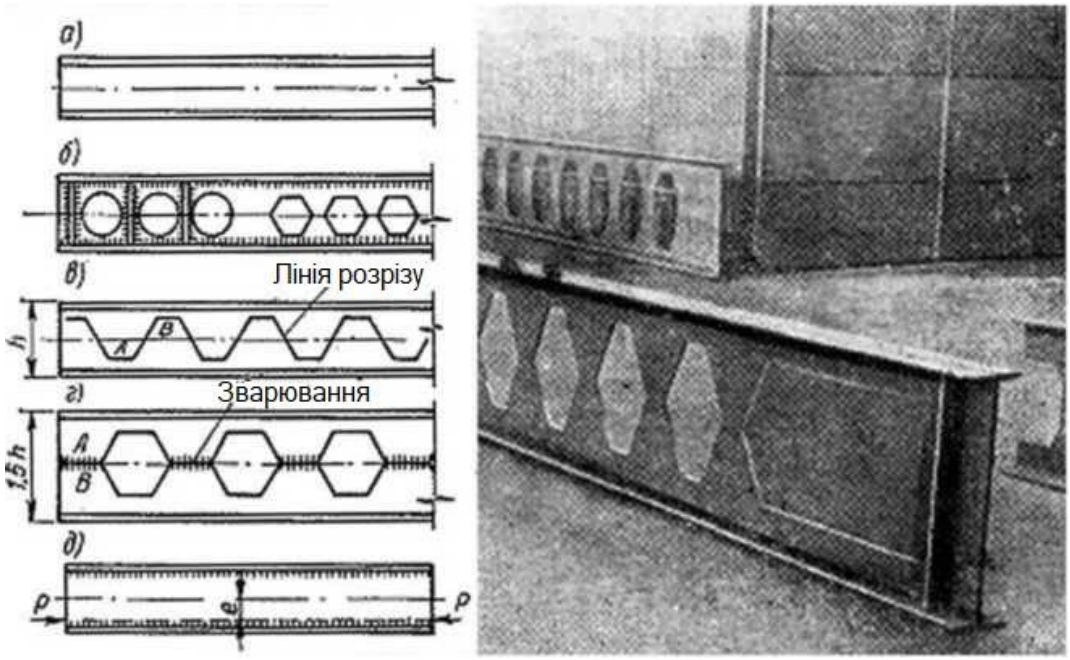


Рисунок 1.8 - Класифікація балок на кшталт стінки
а) суцільна; б) перфорована отворами; г) перфорована шляхом розрізання та зварювання стінки прокатного двотавра; д) попередньо напружена

За статичною схемою балки можуть бути розрізними

(однопрогоновими) і нерозрізними (багатопрогоновими), і консольними.

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

Нерозрізні балки завдяки наявності опорного моменту, що зменшує основні моменти в прольотах, більш економічні витрати матеріалу. Їхня велика чутливість до змін температури та опадів опор, а також необхідність робити крайні прольоти менше середніх для збереження сталості перерізу роблять конструкції таких балок індивідуальними, немасовими, а застосування їх порівняно рідкісним» [41].

Консольна балка утримується в рівновазі лише за допомогою однієї опори у вигляді затискання. При цьому балки такого типу мають один істотний недолік - великі прогини.

Крім того, існують і інші класифікації. Наприклад, за напруженим станом балки можуть бути звичайними і з регульованою напругою, яка створюється за допомогою попередньо напружених затяжок або способом зміщення опор у нерозрізних балках.

За призначенням прийнято розрізняти кроквяні, підкроквяні, балки робочих майданчиків, підкранові та мостові балки. За матеріалом, з якого вони виготовляються, виділяють балки сталеві, бістальні, листові, а також зі сплаву алюмінію.

Як уже було зазначено раніше, в даний час при будівництві та реконструкції будівель та споруд двотавровий симетричний переріз є основним балочним профілем, що характеризується найбільшою різноманітністю за типами. Цей переріз є найбільш економічним «за витратою металу, а перевагу перерізу балки як конструкції, що працює на вигин, можна визначити як відношення моменту опору до площі перерізу, що дорівнює ядровій відстані» [30].

На рисунку 1.9 наочно продемонстровано порівняння ядрових відстаней різних типів перерізу: кругле, прямокутне, трубчасте та двотаврове. Перетин

двотавровий вигідніше прямокутного в 2,5 рази і круглого в 3,4 рази, це відбувається за рахунок найбільш раціонального розподілу металу, і як наслідок найкращого розподілу нормальних напруг від вигину балки, а також дотичних напруг, що дозволяє зробити стінку балки досить тонкою.

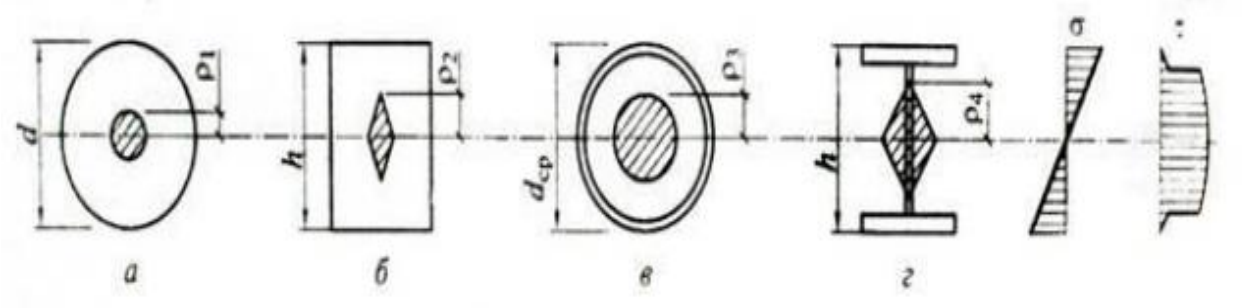


Рисунок 1.9 - Порівняння типів перерізів балок :
а - кругле, $p_1 = 0{,}125d$; б - прямокутне. $p_2 = 0{,}17h$; в - трубчасте. $p_3 = 0{,}25d_{ср}$
г - двотаврове $p_4 = 0.42h$

Перший вітчизняний сортамент металопрокату було розроблено 1900г. (До цього застосовували німецький сортамент). У цьому стандарті було передбачено лише один тип двотаврового профілю, який через особливості своєї геометрії міг ефективно використовуватися лише як елементи, що працюють на вигин (балок).

З моменту появи першого вітчизняного сортаменту минуло сто з лишком років. За цей час інженерна наука, як і металургійна промисловість, пройшли величезний шлях, у процесі якого відбувся перегляд не лише принципів формоутворення металевих конструкцій, а й способів їх виготовлення та технологій монтажу.

Інтенсивний розвиток промисловості (всіх галузей), поява нових високоміцних сталей та способів зварювання, розвиток нормативно-технічної бази, розробка та впровадження нових методів розрахунку конструкцій - всі ці фактори сприяли підвищенню металомісткості будівельної галузі в цілому, що викликало необхідність удосконалення старих та розробки нових ефективних конструкційних форм сталевих профілів

В результаті масштабної раціоналізації (покращення) російського

сортаменту сфера застосування сталевого двотаврового прокату (у період з 1960 р.) помітно розширилася за рахунок впровадження в галузь нових ефективних типів двотаврових профілів із паралельними гранями полиць. Сьогодні симетричний двотавровий профіль без перебільшення можна назвати затребуваним у будівництві типом металопрокату.

«Двотавровий переріз вигідніший, оскільки в цьому перерізі розподіл матеріалу найкраще відповідає розподілу нормальних напруг від вигину балки. Тому металеві балки конструюють головним чином двотаврового перерізу, чому сприяє хороша робота металу на дотичні напруги, що дозволяє робити стінку балки досить тонкою. Враховуючи залежності від навантаження та прольоту застосовують балки прокатні та складові. Складові можуть бути зварені та клепані» [20].

Будь-які металеві двотаври виготовляються у суворій відповідності до вимог ДБН та ДСТУ, тому вони мають регламентовану форму та склад. Завдяки цьому, маючи потрібну документацію, можна легко розрахувати необхідні розміри та параметри двотаврів, необхідні конкретної конструкції.

Двотавр маркується цифро-літерним позначенням, де цифра позначає висоту перерізу (h), а літерою позначається тип двотавра. Крім того, зазвичай вказується матеріал виробу та стандарт, де описані хімічні та механічні показники сталі.

Розглянемо розшифровку буквеного позначення двотавра з паралельними полицями, які за співвідношенням розмірів та умовами роботи ДСТУ EN 10034:2006 [12] поділяються на типи:

- балочні: Б-нормальні та Ш-широкополочні (застосовуються в конструкціях, що наголошують на розтягуванні, або упор на стиск, або ж стиснення з вигином);

- К-колонні (характеризуються практично рівною висотою профілю та шириною полиці та застосовуються в конструкціях, з упором на вигин);

- С-пальові (застосовуються в конструкціях, з упором на вигин);

- ДБ, ДК – додаткові серії.

Другий спосіб поділу - за видами довжини (на профілі завдовжки від 4 до 12 м):

- МД – мірної довжини;

- МД1 – мірної з немірною довжиною;

- НД – немірної;

- ОД – обмеженою в межах немірної.

За узгодженням виробника із споживачем допускається виготовлення двотаврів довжиною понад 12 м. За станом постачання виділяють:

- ГК - гарячекатані;

- КП - після контрольованої прокатки, у тому числі із прискореним охолодженням.

Відповідно до ДСТУ 8768:2018[11] поперечний переріз двотаврів має відповідати вказаному на рисунку 1.10.

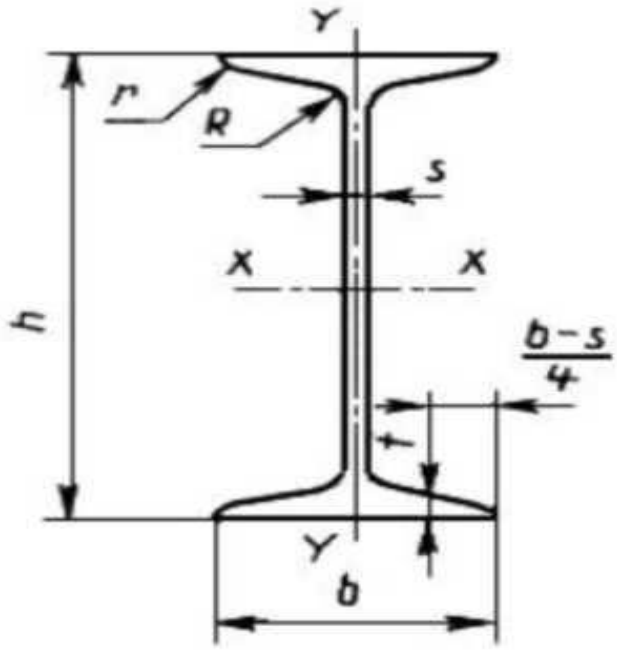


Рисунок 1.10 - Поперечний переріз двотавра:

h – висота двотавра; b – ширина полиці; s – товщина стінки; t-середня товщина полиці; R – радіус внутрішнього закруглення;

r - радіус закруглення полиці

Металевий двотавр з ухилом внутрішніх граней полиць 6-12% згідно ДСТУ 8768:2018 [11] застосовується головним чином як елемент, що працює на вигин, а також у складових перерізах колон. Робота як стислих елементів (стійок, колон) не ефективна з огляду на короткий момент інерції.

Двотаври "Б" випускаються висотою до 1000 мм, з шириною полиць до 320 мм. Двотаври "Ш" мають висоту також до 1000 мм при максимальній ширині полиць 400 мм. Двотаври "К", використання яких ефективно в колонах будівель, мають співвідношення висоти до ширини полиць 1:1 і максимальні розміри 400х400 мм.

Номінальні розміри двотаврів сталевих гарячекатаних з паралельними гранями полиць, площа поперечного перерізу, маса 1 м довжини, довідкові величини для осей наведені в таблиці 2 ДСТУ 8768:2018 [11].

Граничні відхилення за розмірами та формою поперечного перерізу двотаврів (рисунок 1.11-1.12) повинні відповідати наведеним у таблиці 2 ДСТУ 8768:2018 [11].

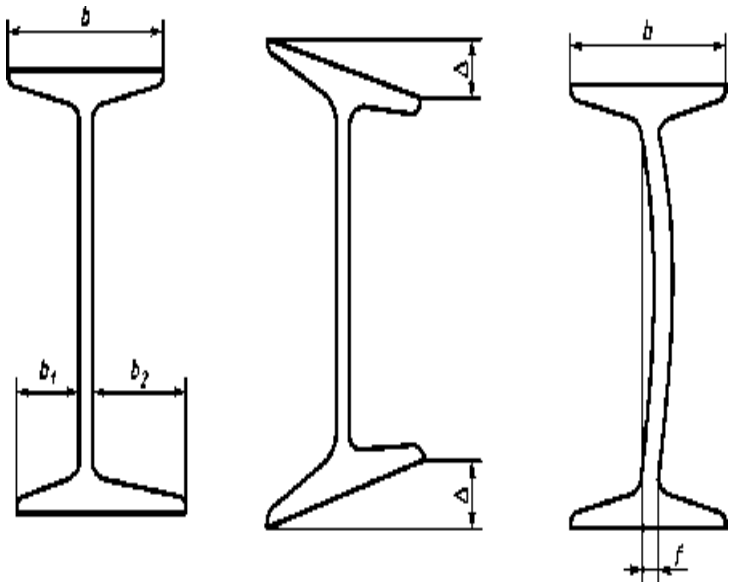


Рисунок 1.11- Граничні відхилення за розмірами та формою поперечного перерізу двотаврів :

b_1 - ширина укороченого фланця; b_2 - ширина подовженого фланця; Δ - перекіс полиці; f - прогин стінки

Параметр двотавра, показник якості	Розмір	Граничне відхилення при точності прокатки	
		підвищеною	звичайною
Висота h	До 140 включ. Пн. 140 » 180 »	± 2,0	± 2,0 ± 2,5
	Пн. 180 до 300 включ. » 300 » 360»	± 3,0	± 3,0 ± 3,5
	Пн. 360 до 600 включ.	±4,0	±4,0
Ширина полиці b	До 73 включ. Пн. 73 » 90 » » 90 » 135 »	± 2,0	± 2,0 ± 2,5 ± 3,0
	Пн. 135 до 155 включ. » 155	± 3,0	± 3,5 ±4,0
Товщина полиці t *	До 7,5 включ. Пн. 7,5 » 8,9 » » 8,9 » 10,7	-0,4 -0,5 -0,6	-0,7 -0,7 -0,8
	Пн. 10,7 до 12,3 включ. »и 12,3 » 14,2» »14,2 » 15,2»	-0,7 -0,8 -0,9	-1,0
	Пн. 15,2	-1,0	-1,2
Перекіс полиці Δ при ширині b	От 55 до 190 включ.	Не більше 0,0125 b	Не більше 0,02 b
Відхилення від симетричності δ $\delta = \frac{b_1 - b_2}{2}$ при ширині b	До 73 включ. Св. 73 » 90 » » 90 » 135 »	2,0	2,0 2,5 3,0
	Св. 135 до 145 включ. » 145	3,0	3,5 4,0
Довжина	До 8 м включ. Св. 8 м	+40 До допуска +40 додавати по 5 мм за кожен метр довжини св. 8 м	+40 +80

Рисунок 1.12- Граничні відхилення за розмірами поперечного перерізу прокатного двотавра

Прогин стінки (f) не повинен перевищувати 0,15 S.

Кривизна двотавра має перевищувати 0,2% довжини.

Притуплення зовнішніх кромок полиць двотаврів підвищеної точності має перевищувати 2,2 мм, для двотаврів звичайної точності - не контролюється.

Відхилення по масі 1 м двотавра не повинні перевищувати плюс 3, мінус 5%.

Розміри та геометричну форму контролюють на відстані не менше 500 мм від торця двотавра.

Висоту двотавра контролюють у площині Y-Y.

Далі розглянемо докладніше процес виготовлення прокатних та складових (зварних) балок. Виробництво металевих балок не лише у великих промислових масштабах, а й на індивідуальні замовлення.

Як описано вище, балки можуть виготовлятися прокатним або складним способом. Однак, двотаврова балка, виготовлена складовим (зварним) способом, має ряд переваг над прокатною.

За допомогою складового методу можна виготовити балки практично будь-якого розміру, тоді як розмір балок прокатних обмежений можливостями стану. Також є можливість виготовити балку, у якої в одній і іншій ділянці відрізнятиметься ширина полиць. Щоб зробити таку балку на прокатному стані, потрібне дороге обладнання.

Виробництво зварних балок – це складний та відповідальний процес. при якому потрібно розрахувати та врахувати безліч факторів, таких як - міцність, жорсткість і особливо щільність, величина якої має бути дуже високою. Наприклад, через порушення технологічних або інших вимог у процесі зварювання сталевого листового металу можуть з'явитися такі дефекти як: тріщини; порожнини, пори; тверді включення; несплавлення та непровари; порушення форми шва та інші дефекти. Вироби з такими дефектами вважаються шлюбом - їх не можна використовувати у виробництві, тому що вони не здатні витримати великих навантажень на вигин та кручення.

Технологічний процес виготовлення зварної балки двотаврового перерізу включає наступні етапи (рисунок 1.13):



Рисунок 1.13 - Етапи виготовлення зварної двотаврової балки

Насамперед, необхідно розрахувати необхідні параметри жорсткості та міцності та за результатами вибрати марку сталі.

Далі потрібно підготувати поверхню до зварювальних робіт, тобто. провести очищення поверхні, видалити сліди корозії, оксидні плівки та інше.

Потім згідно з кресленням проводиться розкрій листового прокату на смуги, після чого за допомогою торцефрезерного верстата з метою поліпшення провару шва між полицею і стінкою двотавра проводиться фрезерування торців.

Далі виконується збірка, яка повинна бути досить точною, оскільки необхідно забезпечити строгу симетричність розташування полиць між собою та перпендикулярність полиць і стінки. Складання ручним способом на стелажі дуже трудомістка і застосовується тільки в маленьких об'ємах. дрібні виробничі підприємства. При масовому виробництві збирання виконують за

допомогою спеціальних автоматизованих верстатів.

Далі слід зварювання елементів балки. Прийоми та послідовність накладання зварних швів можуть бути різними.

Зварювання нахиленим електродом дозволяє одночасно зварювати два шви (дві поверхні балки), проте глибина шва в цьому випадку неглибока. При виконанні шва «в човник» (на стапелях під кутом 45°) забезпечуються кращі умови формування шва і глибини проплавлення стінки, але цей спосіб характеризується своєю малою продуктивністю, так як після кожного шва доводиться перевертати виріб [31].

Крім того, після зварювання балку очищають від бризок і напливів металу, після чого проводиться дробоструминне очитування конструкції. У заводських умовах це дробоструминна установка, різновид обладнання, призначеного для очищення металоконструкцій перед проведенням фарбувальних робіт. Далі знежирення та фарбування за необхідності ДСТУ ISO 4287:2012 [9].

Завершальним етапом виготовлення зварної двотаврової балки є фінішне виправлення та вихідний контроль якості. Правка балки здійснюється за допомогою прокатного верстата з безліччю роликів, де усуваються невеликі перекоси, що виникли під час складання та зварювання профілю.

Для сварки балок промышленным способом применяются специальные сварочные линии. Небольшие индивидуальные заказы возможно осуществлять ручным способом с применением электродуговой или аргоновой сварки в зависимости от марки металла, его способности свариваться. Но такой способ несет за собой удорожание конечного продукта.

Зварювальні роботи використовують не тільки для скріплення полиць та стінки, але також і для того, щоб з'єднати встик готові балки. З цією метою широко застосовується таке обладнання:

- консольні та портальні установки входять до складу ліній з виробництва балок і призначені для автоматизованого зварювання під шаром флюсу або серед захисних газів протяжних прямих швів з одночасним

контролем якості зварного шва. У цьому обладнанні можна виконувати з'єднання під кутом 45°, що забезпечує гарний катет та якість зварювання загалом;

- зварювальні маніпулятори: являють собою сучасне автоматизоване обладнання, що суттєво спрощує виконання з'єднання різних металевих елементів. Головна перевага подібного маніпулятора – універсальність та легкість переналагодження. Служить для автоматичного зварювання серед захисних газів під флюсом;

- самохідні зварювальні трактори (зварювальна каретка): це особливий вид устаткування, що саморухається, яке застосовується для безперервного і точного руху одного або декількох зварювальних пальників по заданій траєкторії в процесі виконання зварювального шва, також спрощує проведення великих обсягів робіт при високій якості зварних з'єднань.

Проектування металевих конструкцій є складним багатоетапним процесом, де виконується розрахунок всіх важливих елементів конструкції, їх конструктивна форма, взаєморозташування, кількість і вид матеріалу.

Мета розрахунку металоконструкцій при проектуванні - створення конструктивних рішень із забезпеченням оптимальної міцності, трудовитрат, якості та кількості матеріалів.

При розрахунках металоконструкцій на міцність, жорсткість та стійкість необхідно не тільки вибрати розрахункову схему, що максимально точно відповідає реальним умовам, але й використовувати такі значення опору матеріалу, при якому дійсний напружено-деформований стан аналізованої системи ніколи не досягне небезпечної межі.

Досягти цього можна різними методами, але одним із найзастосовніших і найефективніших є метод граничних станів, який вперше був розроблений у 50-ті роки.

«Під граничними станами мають на увазі такі стани, при досягненні яких конструкції або з'єднання не задовольняють вимогам, що висуваються до них у процесі експлуатації або зведення. Граничні стани поділяються на дві групи:

- за втратою несучої здатності чи непридатності до експлуатації (через втрати стійкості, міцності[45]; в'язкого, тендітного, втомного чи іншого характеру руйнувань; резонанасних явищ; виникнення плинності матеріалу, повзучості чи надмірного розкриття тріщин);

- через непридатність до нормальної експлуатації, внаслідок появи неприпустимих переміщень (прогинів, осадів, кутів повороту), коливань, тріщин тощо.

Розрахунок будівельних конструкцій полягає у визначенні в них зусиль до діючих навантажень та призначенні необхідних розмірів поперечних перерізів елементів, сполучних деталей та стикових з'єднань, які забезпечують задоволення розрахункових умов зазначених двох груп граничних станів» [23].

Таким чином, сутність цього методу полягає в тому, щоб не допустити настання граничних станів при експлуатації будівельних конструкцій.

«Розрахунок згинальних елементів у загальному випадку ведеться як по першій групі граничних станів (в'язке або втомлене руйнування, втрата стійкості, плинність матеріалу), так і по другій (досягнення граничних переміщень). Для балки це, як правило, прогин у середині прольоту або кінці консолі, віднесені відповідно до довжини прольоту балки чи консолі.

В пружній області роботи матеріалу граничний стан елемента, що згинається визначається досягненням максимальними нормальними або дотичними напругами граничних значень хоча б в одній точці (або волокні) перерізу. За граничні значення при цьому приймають для нормальних напруг основний розрахунковий опір розтягуванню, стиску або вигину R_y, а для дотичних напруг - розрахунковий опір зрізу R_s, які використовують для поправки на умови роботи» [25].

Залежно від призначення конструкції, умов експлуатації, розрахунок балок (згинальних елементів) можна проводити як «без урахування, так і з урахуванням пластичних деформацій. При цьому елементи конструкцій залежно від напружено-деформованого стану (ПДВ) розрахункового перерізу

поділяються на три класи:

1-й клас - ПДВ, при якому напруги по всій площі перерізу не перевищують розрахункового опору сталі $\sigma < R_y$ (пружний стан перерізу);

2-й клас - ПДВ, при якому в одній частині перерізу $\sigma < R_y$, а в іншій $\sigma =$ Ry (пружно-пластичний стан перерізу);

3-й клас - ПДВ, при якому по всій площі перерізу $\sigma = R_y$ (пластичний стан перерізу, умовний пластичний шарнір).

Розглянемо роботу елемента, що згинається. Розрахункові зусилля в перерізі балки - це момент M_{max}, що згинає, і поперечна сила Q_{max} (рисунок 1.14, а).

У міру зростання навантаження в перерізі елемента, що згинається, можуть розвиватися пластичні деформації. Розвиток пластичних деформацій у перерізі елемента, що згинається, ілюструється епюрами на малюнку 14 б-д.

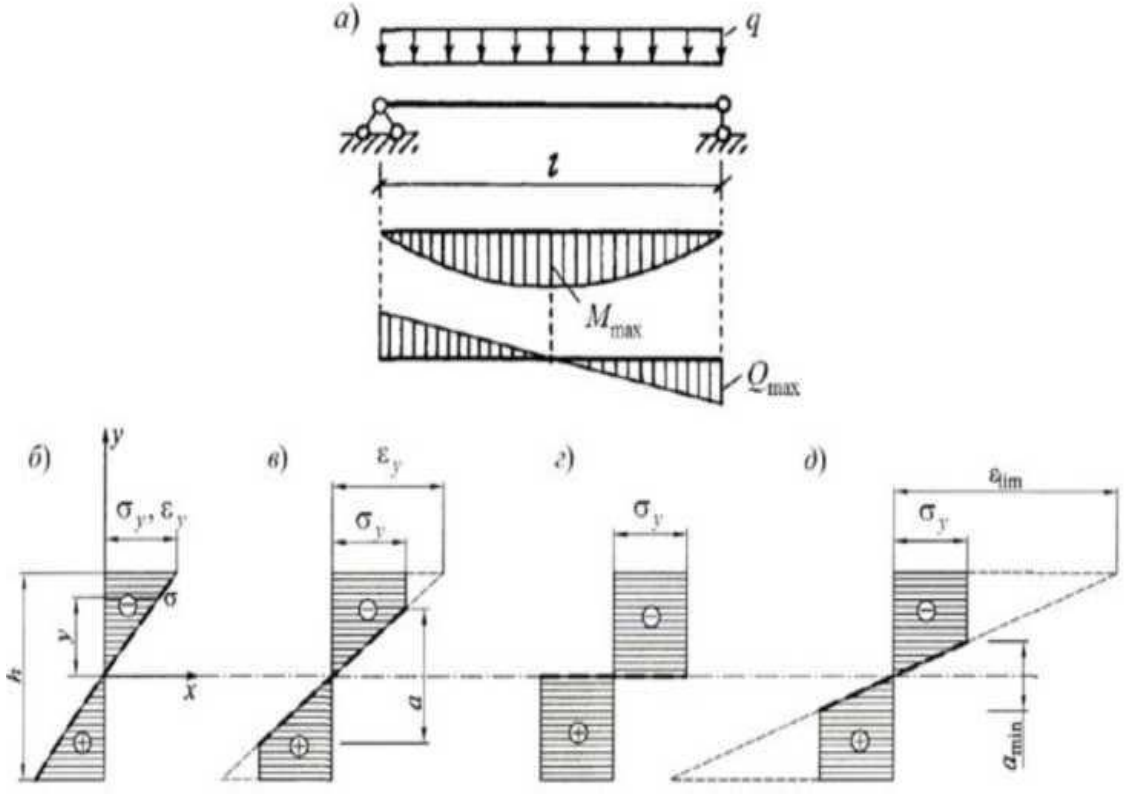


Рисунок 1.14 - Робота сталевого елемента при плоскому згині :

а - розрахункова схема елемента, епюри зусиль: б - напружено деформований стан перерізу в пружній стадії; в - в пружнопластичній; г - у пластичній; д - при обмеженні пластичності

«У елементах, що згинаються (рисунок 1.14, а) в пружній стадії повністю навантаженими в граничному стані виявляються лише крайні волокна ($\sigma = \sigma_y$), а середні недовантажені ($\sigma<\sigma_y$) (рисунок 14, б). Поява плинності матеріалу у фіброві зонах елемента ($\varepsilon>\varepsilon_y$) не призводить до вичерпання несучої здатності елемента, так як зростання напруг обмежений межею плинності ($\sigma = R_y$), а в глибині перерізу, де тільки пружні деформації ($\varepsilon<\varepsilon_y$), напруги залишаються пропорційними деформаціям і менше межі плинності σ_y (рисунок 1.14, в). Частина перерізу, де деформації і напруги відповідно не перевищують граничних значень, утворює пружне ядро висотою а, в якому відсутня плинність, і, отже, прогин балки має кінцеве значення. Ця стадія роботи балки називається пружно пластичною.

У міру зростання моменту деформації збільшуються ($\varepsilon>\varepsilon_y$), пружне ядро, де напруги менше межі плинності ($\sigma<\sigma_y$), зменшується. Повне вичерпання несучої здатності елемента настане за а = 0, тобто. коли відбувається пластифікація всього перерізу, при якому по всій висоті перерізу напруги дорівнюють межі плинності ($\sigma = \sigma_y$). У аналізованому нами двотавровому перерізі утворюється умовний пластичний шарнір (рисунок 1.14, г)».

«При утворенні шарніра пластичності всі фібри перерізу знаходяться в стадії плинності і, отже, їх довжина може змінюватися при постійній напрузі, внаслідок чого елемент, що згинається, може повертатися, як навколо осі шарніра.

Робота шарніра пластичності можлива лише у напрямку дії граничного моменту. При дії згинального моменту у зворотному напрямку напруги зменшуються, матеріал знову стає пружним і шарнір пластичності замикається. На відміну від простого шарніра в пластичному шарнірі момент не дорівнює нулю ».

Далі опишемо переваги та недоліки двотаврового прокату, які необхідно враховувати на стадії проектування металоконструкцій.

Серед переваг, перш за все, потрібно відзначити надійність і підвищені

характеристики міцності, що обумовлено міцністю сталі як будівельного матеріалу, а також специфічною формою перерізу, створеної для рівномірного розподілу вертикальних сил, що впливають на неї, по всій поверхні, що значно підвищує термін експлуатації металоконструкції.

Завдяки особливій геометричній формі, двотаври мають значно меншу вагу в порівнянні з іншими типами металопрокату з аналогічними характеристиками міцності.

Крім того, ще однією важливою перевагою є значна економічність. Зважаючи на свою жорсткість, застосування в будівництві балки двотаврового перерізу дозволяють уникнути використання додаткових армуючих елементів для додаткової стійкості всієї конструкції до руйнувань.

Також двотаври мають стійкість до стиснення і навантажень на вигин. Завдяки чому балка двотаврового перерізу може бути частиною конструкцій, які піддаються великої вібрації, наприклад при будівництві мостів.

Конструкції з двотаврів легко піддаються зварюванню, тим самим підвищується швидкість будівельно-монтажних робіт, що дозволяє досягти суттєвого скорочення термінів здачі готового об'єкта.

Ще одним важливим достоїнством вважається сталість геометричних форм та характеристик. Жорсткість двотавра обумовлена його геометричною формою, завдяки чому він не піддається суттєвій деформації навіть при дії великих сил.

Двотаврові прокати легко транспортувати: його специфічна форма «Н» сприяє компактному укладання транспортного засобу.

При такому широкому списку переваг двотаврові балки мають і ряд недоліків.

По-перше вони мають досить слабку вогнестійкість: сталь є негорючим матеріалом, але, як і всі матеріали, які використовуються в будівництві, не може протягом відносно тривалого часу витримати вплив високої температури, яка виникає при пожежі всередині будівлі. У середньому фактична межа вогнестійкості сталевих конструкцій становить лише 15

хвилин. Це можна пояснити досить швидким зниженням під час пожежі деформаційних та міцності металу в умовах підвищених температур.

Крім того двотаври мають слабку стійкість до корозії. Тому всі двотаври, залежно від їх призначення та умов експлуатації, необхідно обробляти спеціальними захисними засобами.

Двотаврові балки не можна застосовувати при великих прольотах. У такому разі доведеться вдаватися до монтажу спеціальних опор, інакше основні несучі здібності балки сильно знизяться.

Більш того, балки двотаврого перерізу мають низьку стійкість до скручування: наприклад, при однаковій площі перерізу стійкість балки до скручування в 400 разів нижче, ніж у круглої труби. Це також необхідно враховувати під час вибору металопрокату для будівництва.

1.5 Посилення сталевих балок шляхом збільшення перерізу

Балочні конструкції є опорою будівлі, тому їх стану слід приділяти особливу увагу, тому що їх знос може призвести до руйнування всієї конструкції. При проведенні робіт з посилення та ремонту таких елементів найбільшого ефекту можна досягти просто демонтувавши пошкоджені конструкції та замінивши на нові. Але бувають ситуації, коли це неможливо зробити з низки причин або просто економічно невигідно, тоді вдаються до встановлення додаткових металевих конструкцій, що досить широко застосовується при посиленні будівельних ферм, мостів, кранів, будівельних ферм, фундаментів, балок, ригелів.

Посилення металевих балок буває місцевим та загальним. Місцеве посилення виконують за допомогою установки металевих накладок і ребер, а загальне посилення досягається за допомогою затяжок, шпренгелів або зміни опорного сполучення.

Загалом, підвищення несучої здатності згинальних елементів можна досягти за допомогою симетрично розташованих елементів посилення або

створивши симетрію щодо нейтральної осі. При цьому необхідно забезпечити надійну спільну роботу нового перерізу з балкою, а вся конструкція має бути захищена від впливу зовнішніх факторів, таких як корозія або виникнення містків холоду.

«Під час розробки проектів посилення згинальних елементів слід враховувати такі вимоги:

- передбачати максимальне розвантаження балок перед посиленням від тимчасового навантаження та частини постійних навантажень;

- обмежувати обсяг робіт з посилення дільницями, у яких посилення потрібно з розрахунку;

- передбачати таке посилення, у якому мінімальні перерізи додаткових деталей дозволяє максимально збільшити геометричні характеристики посилених перерізів, тобто. приймати розташування підсилювальних деталей на більшій відстані від нейтральної осі;

- передбачати мінімальний обсяг зварювання у стельовому положенні;

- проводити посилення в наступній послідовності: нижній пояс, стінка, верхній пояс - щоб уникнути зварювальних деформацій, що збільшують прогин (сідлоподібність балки) до неприпустимих величин »[34].

Дуже ефективним та перспективним посиленням балкових систем є такий широко поширений на практиці метод під назвою – метод збільшення перерізу.

Сутність даного методу полягає у збільшенні перерізу металевих конструкцій на ділянках найбільших напруг шляхом приєднання до даної конструкції додаткових посилюючих елементів (пластин, куточків, стрижнів, швелерів та двотаврів) на зварюванні, болтах або заклепках (рисунок 1.15), при цьому необхідно передбачити розвантаження % або більше або встановити тимчасові додаткові опори. Зварні, болтові або заклепувальні з'єднання необхідно розташовувати в тих місцях, де буде зручно їх виконувати і згодом перевіряти.

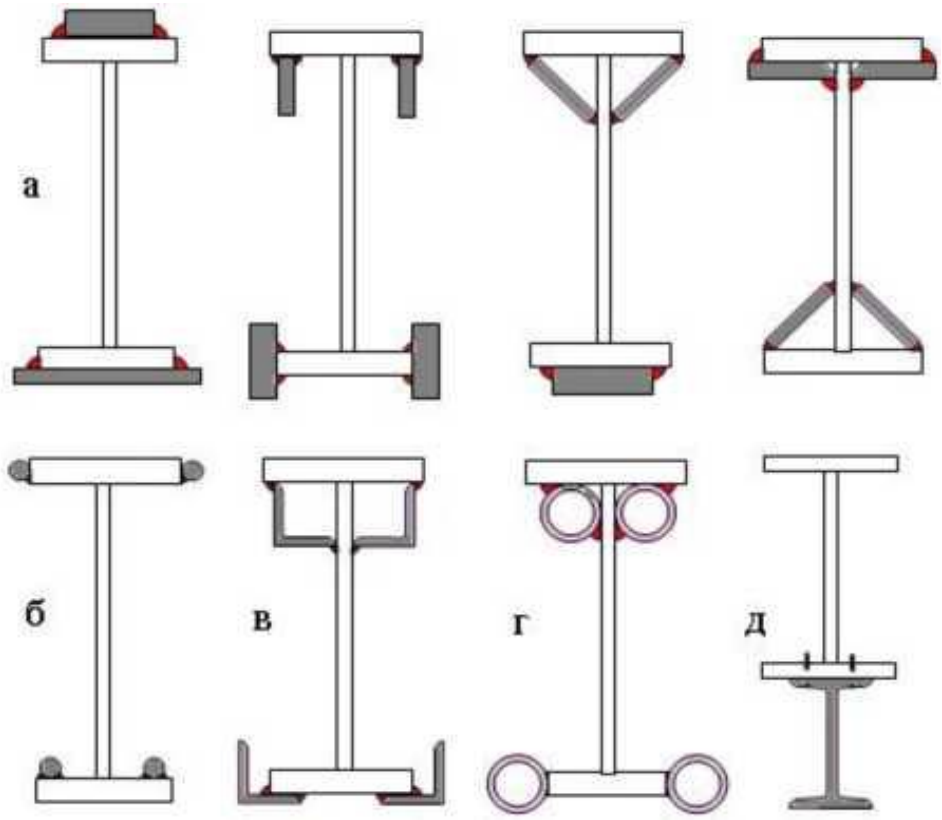


Рисунок 1.15 - Посилення металевих балок шляхом збільшення поперечного перерізу :

а – пластин; б - стрижнів; в - куточків; г – труб; д – двотаврів

«Спосіб збільшення перерізів рекомендується виконувати посилення несучих конструкцій та окремих їх елементів, що мають дефекти, пошкодження або мають недостатню міцність, стійкість і жорсткість, за умови техніко-економічної недоцільності інших способів посилення» [24].

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

Розглянутий спосіб посилення застосовується при поточному та капітальному ремонті несучих конструкцій виробничих будівель та споруд, а також при необхідності збільшення несучої здатності конструкцій у зв'язку із збільшенням навантажень на них внаслідок реконструкції.

При посиленні конструкцій способом збільшення перерізів рекомендується використовувати метал у вигляді листового, сортового та

фасонного прокату.

Вибір марок сталі для елементів посилення необхідно проводити залежно від значущості конструкцій, що посилюються, або їх елементів, умов експлуатації, товщини застосовуваного прокату, керуючись вказівками щодо застосування сталі для сталевих конструкцій будівель і споруд, зазначених у ДБН В.2.6-198:2014 [36].

«При посиленні згинальних елементів найбільш раціональним за витратою сталі є схеми, представлені на малюнку 16, що передбачають симетричне або близьке до симетричного посилення з розташуванням підсилюючих елементів по можливості далі від центру тяжкості перерізів елемента, що підсилюється.

При посиленні балок, як правило, немає необхідності розташовувати елементи по всій довжині елемента, що підсилюється, а можна обмежитися тільки ділянкою з максимальним згинальним моментом »[19]:

- для однопрогонової схеми – середина прольоту 2/3 l;

- для нерозрізної багатопрогонової - середина прольоту 1/2l та опорні ділянки 1/4l

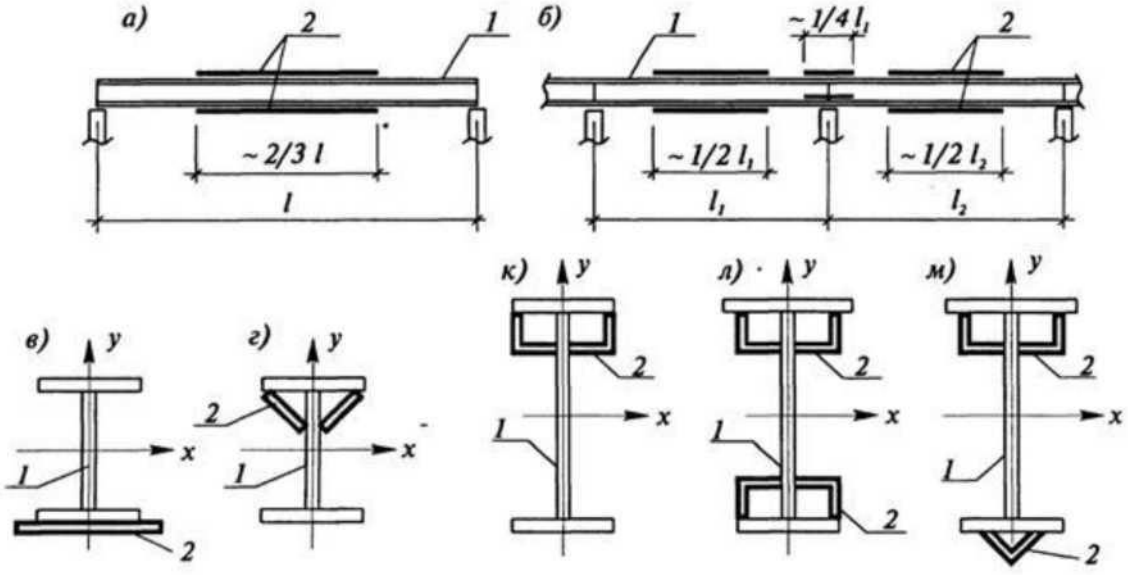


Рисунок 1.16 - Посилення згинальних елементів шляхом збільшення перерізу:

1 -підсилюється згинальний елемент; 2 - додаткові підсилювальні елементи.

Посилення за допомогою симетричних накладок, незважаючи на великий обсяг стельового зварювання, є тим не менш найпростішим способом посилення. При цьому стельових швів можна уникнути при більшій величині накладки, але важливо пам'ятати, що в даному випадку може виникнути значна концентрація напруг по кромках балки.

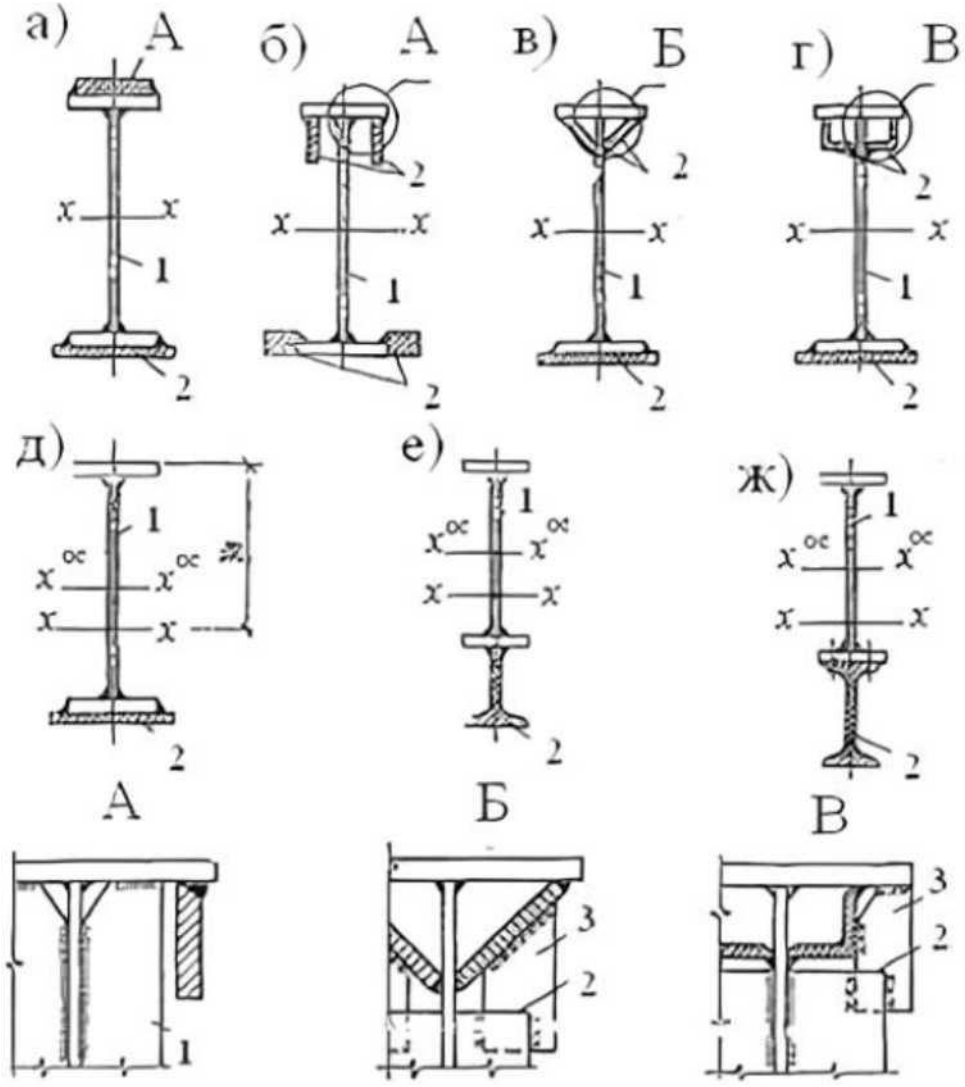


Рисунок 1.17 - Схеми посилення згинальних елементів методом збільшення перерізу :

а-г – схеми двостороннього посилення; д-ж – схеми одностороннього посилення; 1-існуюче ребро жорсткості; 2 - лінія обрізу ребра; 3 - надставка ребра

При посиленні методом збільшення перерізу найбільш раціональними з точки зору витрати сталі, а також не спричиняють значного зміщення центру тяжіння, є двосторонні симетричні або близькі до симетричні схеми посилення (рисунок 1.17, а).

«У випадках, коли посилення верхнього пояса за схемою (рисунок 1.17 а) пов'язане з необхідністю часткового або повного демонтажу настилу, можливо виконати посилення за типом схем (рисунок 1.17, б-г). Недоліком схем (рисунок 1.17 б-г) є великий обсяг зварювальних робіт, пов'язаних з накладенням стельових швів, і значне ослаблення перерізів при зварюванні під навантаженням. Крім того, ці схеми пов'язані з трудомісткими операціями з обрізки та надставки ребер жорсткості (рисунок 1.17, в, г; деталі Б і В).

До несиметричного одностороннього посилення вдаються у випадках, коли двостороннє посилення економічно і технічно недоцільно. Несиметричне одностороннє посилення зазвичай здійснюють за допомогою швелерів, таврів та двотаврів на кшталт схем (рисунок 1.17, е-ж). Істотний недолік даного способу полягає в складності монтажу за допомогою стельових швів або міцних болтів. Більш того, елементи посилення потрібно попередньо вигинати під форму вигину балок, що піддаються посиленню під навантаженням, що можна виконати тільки за допомогою потужних домкратів або інших натяжних пристроїв» [18].

Кожен етап посилення сталевих балок необхідно ретельно контролювати якість.

Заходи, пов'язані з посиленням металевих балок, слід проводити за відсутності тимчасових навантажень і за температури навколишнього середовища не нижче -15 °С для звичайної сталі і не нижче -5 °С для сплавів киплячої плавки. Якщо шви необхідно підсилити наплавкою, показники напруги в матеріалі не повинні перевищувати 0,8 розрахункового опору металу, а поверхні елементів посилення та балки, що посилюється, необхідно обробити згідно з третім класом шорсткості за ДСТУ ISO 4287:2012 [9]. Зварювальні роботи необхідно проводити на попередньо підготовлених

поверхнях - ретельно просушених, очищених від механічних забруднень та хімічних плівок. Зварювальні кромки необхідно обробити до металевого блиску.

«Робочі креслення конструкцій, що виготовляються заново, а також вузлів і ділянок конструкцій, що ремонтуються, повинні містити схеми розташування посилюваних і нових елементів за видами конструкцій (прогони, балки, ферми і т.д.), робочі креслення елементів і вузлів, специфікацію сталі, а також необхідні вимоги щодо технологічної послідовності виконання робіт з посилення конструкції, що впливає на ефективність застосовуваного рішення» [26].

Посилення конструкцій під навантаженням за допомогою зварювання можливе в тому випадку, якщо в елементах груп конструкцій 1, 2, 3 і 4 групи граничний рівень початкової напруги 7..... буде:

- для першої групи $\sigma_{max} \leq 0.2\ R_y$;
- для другої групи $\sigma_{max} \leq 0.4\ R_y$;
- для третьої групи $\sigma_{max} \leq 0.6\ R_y$;
- для четвертої групи $\sigma_{max} \leq 0.8\ R_y$;

де R_y - розрахунковий опір сталі за межею плинності.

Варто зазначити, що, загалом, міцність конструкції безпосередньо залежить також і від якості зварювання та зварних з'єднань, у тому числі від режиму зварювання, товщини та ширини елемента, а також від напрямку зварних швів, тому процесу зварювання та якості зварних з'єднань при посиленні металоконструкцій слід приділяти особливу увагу.

Звернемося до визначення терміна «Зварювання» - ДСТУ ISO/TR 25901-1:2024 це процес з'єднання двох деталей і більше, в результаті якого отримують нероз'ємне з'єднання матеріалу(ів) заготовок, за допомогою нагрівання та (або) тиску із застосуванням або без застосування присадного матеріалу [13].

Зварні з'єднання є найпоширенішим видом з'єднання металевих конструкцій. Близько 90% з'єднань сталевих конструкцій виконують

звареними.

При зварюванні метал розігрівається до тисячі і більше градусів, у процесах задіяний електричний струм великої сили, іноді горючі гази. Тому зварювальнику потрібно бути гранично обережним: використовувати захисний одяг та маску.

До переваг зварних з'єднань слід віднести меншу вагу (економія металу становить 15-20% порівняно з болтовими та заклепочними з'єднаннями), зниження трудомісткості виготовлення (на 30¬50% завдяки зменшенню кількості операцій металообробки та їх спрощенню), відсутність послаблень у стиках та міцність з'єднань.

Разом з тим процес зварювання призводить до структурних та хімічних змін металу в зоні зварної сполуки, а також супроводжується виникненням залишкових напружень та деформацій, що може призвести до утворення тріщин і надалі до руйнування конструкції при дії на неї зовнішніх навантажень.

Так високотемпературне нагрівання елементів при зварюванні та подальше охолодження внаслідок структурних змін суттєво знижують міцність металу. Нагрів сталі вище 400°З призводить до різкого падіння межі плинності та тимчасового опору, а при підвищенні температури до 600°С сталь переходить у пластичний стан і вимикається з роботи зі сприйняття зусиль.

При виконанні зварних з'єднань необхідно правильно вибрати марку сталі (вміст вуглецю в сталі має бути не більше 0,2%; киплячі сталі, що мають газові пори та шлакові включення, тобто концентратори напруг, не рекомендуються), марки зварювальних матеріалів (електродів, зварювального дроту, флюсів, шлаків), форми зварного з'єднання та відповідної технології виготовлення, у тому числі регулювання швидкості охолодження шва. Наприклад, для поздовжніх швів зниження міцності становить до 15%, а для поперечних до 40%. Тому поперечні зварні шви при посиленні металоконструкцій під навантаженням вкрай не рекомендуються.

У сучасному будівництві для сталевих конструкцій застосовується

головним чином електродугове зварювання (ручне, напівавтоматичне та автоматичне) та електрошлакове (бездугове). Рідше використовується газоелектричне зварювання у захисному середовищі вуглекислого газу.

Відповідно до ДСТУ EN ISO 9692-1:2014 [31] при виборі способу зварювання слід мати на увазі:

- доцільність застосування механізованих способів зварювання має підтверджуватись техніко-економічним розрахунком;

- автоматичне зварювання під флюсом слід застосовувати при укрупнювальне складання 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;

- у випадках, де не може бути використане автоматичне та механізоване зварювання, повинно застосовуватися ручне дугове зварювання.

Зварні шви класифікують за конструктивною ознакою (стикові та кутові), за призначенням (робочі, що підлягають розрахунку на міцність, та сполучні, що призначаються конструктивно), за місцем виконання (заводські та монтажні), за довжиною (безперервні та переривчасті; останні приводять до концентрацій; по кінцях шва та до зниженої корозійної стійкості в проміжках між швами, а тому застосовуються тільки як сполучні і для елементів з напругою менше 0,4 R_y), за кількістю шарів, накладених при зварюванні (одношарові та багатошарові), за положенням у просторі під час їх виконання (нижні, вертикальні, стельові, горизонтальні), за зовнішньою формою (нормальні з плоскою поверхнею, опуклі, увігнуті). Випуклі (посилені) шви характерні для ручного зварювання. Увігнуті кутові шви застосовують з

метою підвищення опору зварних з'єднань втоми (увігнутість стикових швів є шлюбом). Увігнутість та плоска поверхня швів досягається регулюванням режиму зварювання або спеціальною механічною обробкою.

Докладніше зупинимося на класифікації зварних з'єднань за конструктивною ознакою: «розрізняють такі види зварних з'єднань: стикові, внахлестку, кутові та таврові (впритул).

Стиковими називають з'єднання, в яких елементи з'єднуються торцями або кромками і один елемент є продовженням іншого (рисунок 1.18 а). Стикові з'єднання мають найменшу концентрацію напруги та відрізняються економічністю.

Внахлестку називають сполуки, в яких поверхні елементів, що зварюються, частково знаходять один на одного (рисунок 1.18, б). Ці з'єднання широко застосовуються для зварювання листових конструкцій при товщині сталі t = 2-5 мм. Різновидом з'єднання внахлестку є з'єднання з накладками (рисунок 1.18, в). З'єднання внахлестку відрізняються простотою обробки елементів під зварювання, але за витратою металу вони менш економічні, ніж стикові. З'єднання внахлестку викликають значну концентрацію напруги.

Кутовими називають сполуки, в яких елементи, що зварюються, розташовані під кутом один до одного (рисунок 1.18, г).

Таврові з'єднання відрізняються від кутових тим, що в них торець одного елемента приварюється до поверхні іншого елемента (рисунок 1.18, д)» [29].

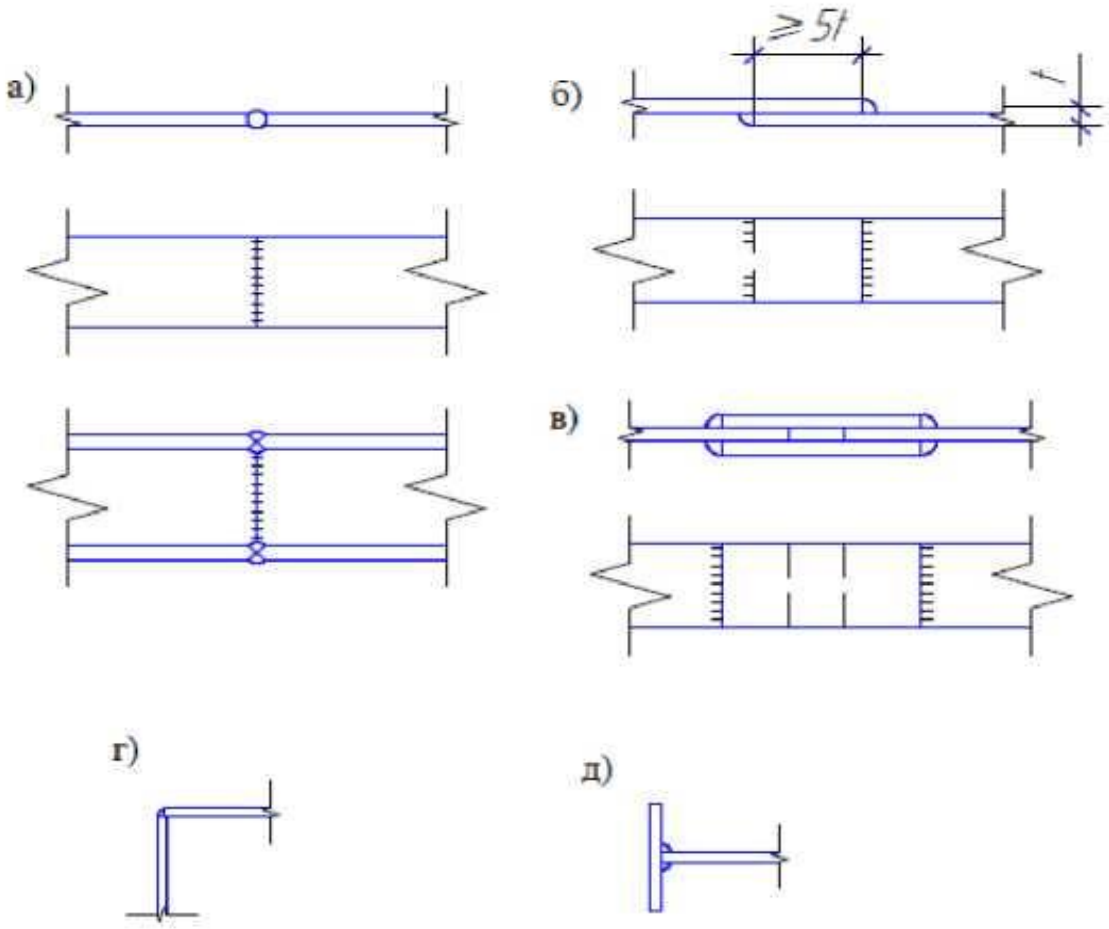


Рисунок 1.18 - Види зварних з'єднань

а-стикове; б-внахлестку; в-з накладками, г-кутове; д – таврове

«При використанні зварювання для прикріплення елементів посилення необхідно передбачати заходи щодо зменшення та регулювання зварювальних деформацій. Для цього катети швів слід приймати мінімально допустимими за розрахунком.

У випадках посилення навантажених конструкцій 3 і 4 класів, що експлуатуються при температурі вище мінус 30 °С в неагресивному середовищі, рекомендується використовувати переривчасті шви (рисунок1.19, а). Крок шпонок слід приймати максимально допустимим за розрахунком, але не понад 80imin у розтягнутих та 40imin у стиснутих елементах посилення. Тут i_{min} – мінімальний радіус інерції елемента посилення щодо його власної центральної осі.

Для кріплення елементів посилення в конструкціях 1 та 2 класів використовуються лише суцільні шви (рисунок 1.19 б) »[29].

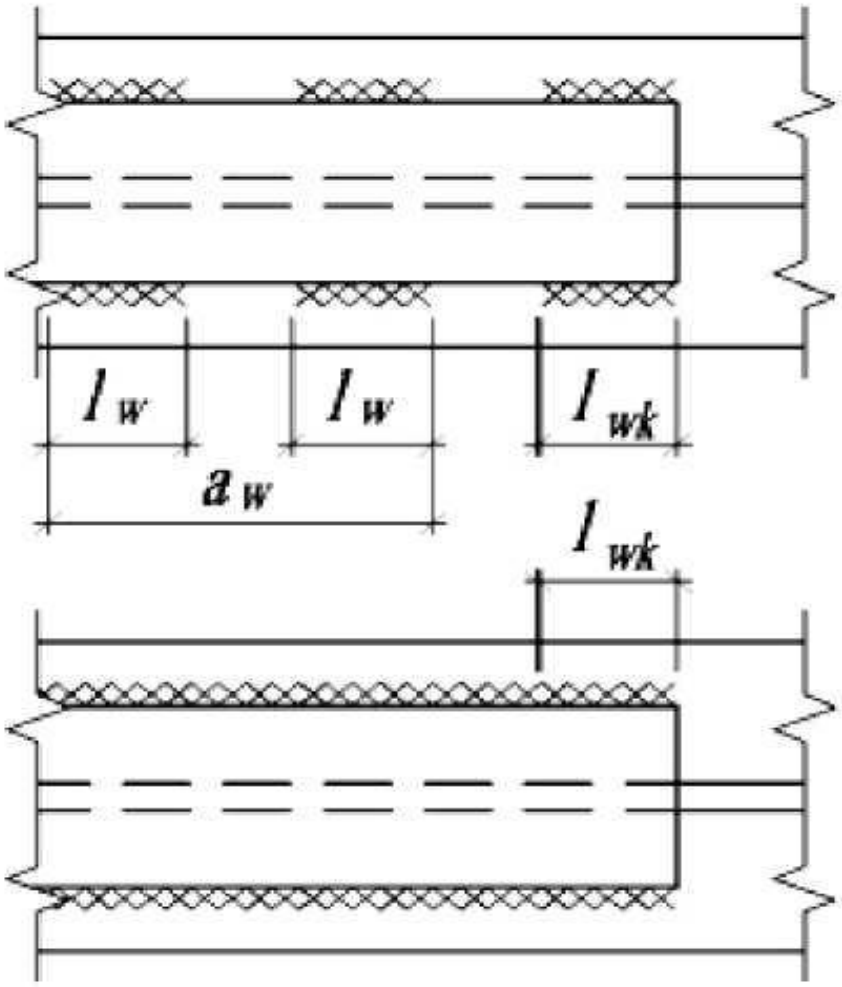


Рисунок 1.19 - Приєднання елементів посилення
а - уривчастими швами; б - суцільними швами

Проектуючи зварне з'єднання для створення посиленої конструкції необхідно також 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, при яких максимально скорочувалася б необхідність кантування конструкцій при їх виготовленні, а також зменшилися б розміри деталей, що з'єднуються;

- забезпечувати вільний доступ до місць накладання швів та зручне просторове положення з урахуванням обраного способу та технології зварювання та прийнятого методу неруйнівного контролю швів;

- збільшення перерізів швів не підвищує працездатність конструкцій і в деяких випадках знижує її »[28].

Зварні конструкції контролюють на всіх етапах їхнього виготовлення. Контроль якості зварних з'єднань може бути:

- попереднім - це первинний контроль зварного з'єднання для визначення якості зварювання. Такий контроль запобігає утворенню дефектів, він полягає у контролі електродів, флюсів, дотримання режимів роботи тощо;

- остаточний - це контроль, який оцінює результати технологічного процесу, його суть полягає у визначенні якості швів та виявленні дефектів.

Усі місцеві уступи і нерівності, що є на деталях, що збираються, і перешкоджають їх з'єднанню відповідно до вимог креслень, слід до складання усувати зачисткою у вигляді плавних переходів за допомогою абразивного кола або напилка. При обробці абразивним інструментом сліди зачистки мають бути спрямовані вздовж кромок.

У процесі складання повинно бути виключено попадання вологи, олії та інших забруднень у обробку з'єднань та прилеглі поверхні [31].

Після закінчення зварювання зі шва та навколошовної зони повинен бути видалений шлак, напливи та бризки металу. Видалення шлаку повинно проводитися після остигання шва (через 1-2 хвилини після потемніння). Приварені складальні пристрої слід видаляти без застосування ударних впливів та пошкодження основного металу, а місця їх приварювання зачистити до основного металу з видаленням усіх дефектів. Зняття посилення, зачистку кореня шва, лицьового боку шва та місць встановлення вивідних планок рекомендується здійснювати за допомогою високооборотних

електричних шліфувальних машинок з абразивним колом. При цьому ризики від абразивної обробки металу повинні бути спрямовані вздовж кромок деталей, що зварюються [31].

Монтажні зварні з'єднання при статичних випробуваннях повинні мати міцність не нижче за міцність основного металу, регламентовану стандартом. Твердість та відносне подовження металу всіх швів, ударна в'язкість металу стикових швів та навколошовної зони (по лінії сплаву) повинні відповідати вимогам, прописаним у ДСТУ Б В.2.6-199:2014 [8].

Існує безліч методів контролю якості та надійності зварних швів та з'єднань, які поділяють наруйнуючі та неруйнівні.

Руйнівні способи контролю мають на увазі механічний або інший вплив на зварний шов, з метою виявити його похибки, наприклад, шляхом розкриття шва висвердлюванням для контролю кутових швів.

При проведенні контролю якості руйнівним методом частина або вся зварена ділянка втрачає свої конструктивні властивості. Тому популярнішими і доцільними вважаються розглянуті далі неруйнівні методи контролю зварних швів.

На даний момент розрізняють такі руйнівні методи, що найчастіше застосовуються:

- зовнішній огляд;

- радіаційний метод - заснований на здатності рентгенівського та гамма-випромінювання проникати через метали та фіксувати на фотоплівці дефекти, що зустрічаються на його шляху;

- магнітне дослідження - використовується явище електромагнетизму; прилад створює навколо досліджуваної області магнітне поле, потік ліній якого, проходячи через метал, викривляється в місцях дефектів;

- ультразвуковий метод - використовує здатність ультразвукових хвиль відбиватися від кордонів, що розділяють два пружні середовища з різними акустичними властивостями;

- капілярний метод - заснований на капілярній активності рідин - їх

здатність втягуватися, проникати в дрібні канали (капіляри), що є на поверхні матеріалів, у тому числі пори та тріщини зварних швів;

- контроль проникності - ці випробування виконуються за допомогою гасу, а також повітря або води під тиском.

За зовнішнім оглядом та вимірюванням якість швів має задовольняти вимоги таблиці1.1.

Таблиця 1.1 - Перевірка якості зварних швів

Елементи зварних з'єднань, зовнішні дефекти	Вимоги до якості, допустимі розміри дефектів
1	2
Поверхня шва	Рівномірно-луската, без пропалів, напливів, звужень та перерв. Плавний перехід до основного металу (слід обговорити в кресленнях КМ та КМД)
Підрізи	Глибина до 5% товщини прокату, що зварюється, але не більше 1 мм
Дефекти подовжені та сферичні одиночні	Глибина до 10% товщини прокату, що зварюється, але не більше 3 мм. Довжина – до 20% довжини оцінної ділянки*
Дефекти подовжені та сферичні у вигляді ланцюжка або скупчення	Глибина до 5% товщини прокату, що зварюється, але не більше 2 мм. Довжина – до 30% довжини оцінної ділянки. Довжина ланцюжка або скупчення - більш подвоєної довжини оцінної ділянки
Дефекти (непровари, ланцюжки та скупчення пор), сусідні по довжині шва	Відстань між довколишніми кінцями - не менше 200 мм
Шви зварних з'єднань конструкцій, що зводяться або експлуатуються в районах з розрахунковою температурою нижче мінус 40°С та до мінус 65°С включно	

Продовження таблиці 1.1

1	2
Непровари, несплавлення, ланцюжки та скупчення зовнішніх дефектів	Не допускаються
Підрізи: вздовж зусилля місцеві поперек зусилля	Глибина - не більше 0,5 мм при товщині прокату, що зварюється, до 20 мм і не більше 1 мм - при більшій товщині Довжина - не більше подвоєної довжини оцінної ділянки

При цьому тріщини всіх видів та розмірів не допускаються.

1.6 Висновки за першим розділом

В ході експлуатації або реконструкції будівель та споруд нерідко виявляється необхідність посилення металевих ригелів: складових та прокатних балок. Головною особливістю при експлуатації сталевих балок є їхнє знаходження під навантаженням. Внаслідок тривалої експлуатації металеві балки можуть піддаватися сильній корозії.

При експлуатації будівель нерідко виявляється необхідність збільшення несучої здатності сталевих балок, навантажених плитами по верхнім поясам.

У відомій технічній літературі пропонуються різні варіанти посилення, зокрема збільшенням перерізу, без конкретизації розташування навантаження.

У цьому, науковий інтерес представляє дослідження питання впливу схем посилення несучу здатність балок.

РОЗДІЛ 2
ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ БАЛОК

2.1 Теоретичне обґрунтування роботи згинального двотавра

Теоретичні дослідження проводилися з урахуванням можливостей проведення експериментальних досліджень на установці для випробування балкових конструкцій. Установка дозволяє випробовувати балки прольотом 1,5 м з навантаженням двома силами, розташованими симетрично з відривом 0,5 м від опор, як показано на рисунку 2.1.

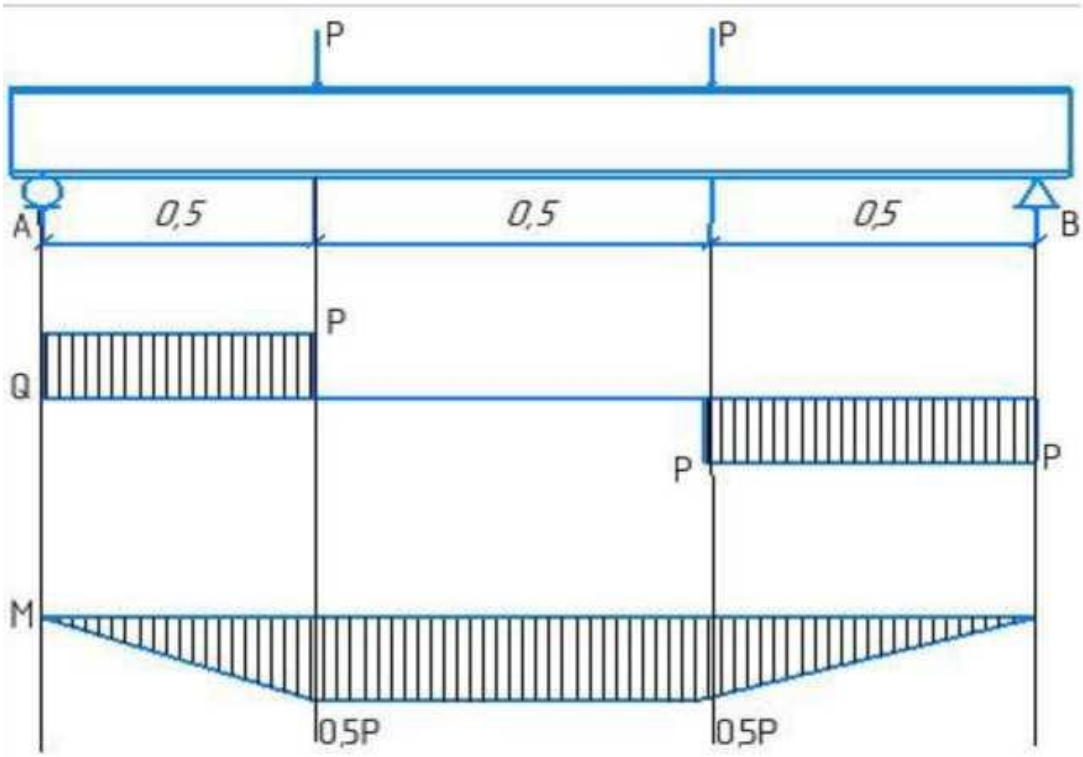


Рисунок 2.1 - Схема навантаження двотаврової балки

«Схема закріплення балки: шарнірно оперта. Навантаження, що додається: дві зосереджені сили рівної величини, симетрично розташовані щодо середини прольоту.»[24].

«Прямий вигин балки найчастіше поділяють на чистий вигин та поперечний вигин. При чистому згині в перерізі балки виникає лише один внутрішній силовий фактор - згинальний момент. При поперечному згині в

перерізах балки виникають два силові фактори (внутрішні зусилля): згинальний момент М і поперечна сила Q.»[24].

При практичних випробуваннях у більшості випадків згинальний момент може мати одне з вирішальних значень при виборі перерізу та перевірки на міцність багатьох балкових конструкцій. При виникненні (дії) навантажень, що виникають, балка має властивість прогинатися так, що нижні волокна рівномірно подовжуються, а верхні волокна навпаки рівномірно коротшають, вигину балки супроводжує поява нормальних напруг.

Крім волокон, що рівномірно подовжуються і рівномірно вкорочуються, не варто забувати і про волокна що знаходяться в проміжному шарі, довжина яких не змінюється. Цей проміжний шар називається нейтральним, а лінія називається нейтральною лінією чи нейтральною віссю.

Таким чином, нейтральна лінія є геометричним місцем концентрації точок, в яких нормальні напруги дорівнюють нулю. Для з'ясування характеру розподілу і значення напруги, що викликаються згинальним моментом, звернемося до випадку чистого вигину. Чистий вигин - деформації волокон пропорційні їх відстані від нейтрального шару; нормальні напруги змінюються за висотою перерізу лінійно.

Згинальний момент «M_x» і координату «y» найзручніше брати за абсолютним значенням, а знак напруги встановлювати виходячи з характеру деформування балки (при розтягуванні - плюс, при стисканні - мінус), тобто. по епюрі "М", ординати якої відкладають з боку розтягнутих волокон. Максимальні значення напруги виникають у точках, найбільш віддалених від нейтральної лінії. При поперечному згині діють як нормальні, а й дотичні напруги. Останні ускладнюють картину деформування, що призводить до викривлення поперечних перерізів балки, у результаті порушується гіпотеза плоских перерізів.

При цьому ретельні дослідження в цій галузі часто виявляють, що навіть спотворення, що вносяться дотичними напругами, мало впливають на нормальні напруги.

Отже, щодо нормальних напруг у разі поперечного згину цілком застосовна теорія чистого вигину. Напруги дотичними в більшості випадків не враховуються в теоретичних розрахунках на міцність.

Стосовна напруга в розрахунках на міцність, як правило, не враховується. Вибір розрахункових перерізів та контрольних точок. На рисунку 2.4 показана розрахункова схема балки, епюри згинальних моментів та поперечних сил. За характером епюр видно, що в середньому відсіку балки між зосередженими силами має місце чистий вигин під дією згинального моменту M_{max}, а в крайніх відсіках - поперечний вигин під дією згинального моменту, що змінюється в межах від 0 до M_{max} при постійній поперечній силі, що дорівнює Q_{max}. Конструктивний розрахунок за граничними станами виробляють, як правило, у таких поперечних перерізах та розрахункових точках, де виникають найбільші нормальні, дотичні та головні напруги. У досліджуваній балці найбільша нормальна напруга буде там, де $M = M_{max}$. Найбільші дотичні напруги, як відомо з курсу опору матеріалів, діють лише на рівні нейтрального шару перерізі, де $Q = Q_{max}$. У досліджуваній балці це має місце у приопорних відсіках у будь-якій точці, розташованій на осі балки. Найбільші основні напруги в стінках балок з'являються у місцях сполучення її з полицями, тобто. у крайніх нижніх та верхніх точках. У поєднанні з головною стискаючою напругою, що діє на рівні нейтральної шару, вони можуть стати причиною втрати стійкості тонкої стінки. Найімовірнішим місцем втрати стійкості стінки є середина приопорних відсіків.

Таким чином можливості установки обмежуються роботою балок на чистий вигин.

Максимальне навантаження, яке може сприймати сталевий двотавр у межах пружної роботи, можна визначити за формулою 2.1:

$$P_{max} = \frac{W_x \sigma_m}{\alpha}, \qquad (2.1)$$

де σ_m - межа плинності сталі балки;

α - відстань від опори до прикладених двох зосереджених навантажень P_{max};

W_x - момент опору перерізу брутто щодо осі х.

Максимальний розрахунковий згинальний момент для еталонного зразка визначається за формулою 2.2, виходячи з епюри моментів, зазначених на рисунку 2.4:

$$M_{max} = 0.5P_{max}, \quad (2.2)$$

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

Опорні реакції балки опертою на двох шарнірах визначаються за формулою 2.3:

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

Напружено-деформований пружний стан балки.

Для балок 1-го класу, коли напруги, що виникають по всій площі перерізу, не можуть перевищити розрахункового опору $|\sigma| \leq R_y$ (пружний стан)), балка розраховується на вигин і на зріз згідно з ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі Зміною № 1» [36].

На вигин при дії моменту в одній із головних площин:

$$\frac{M}{W_{xn,min}R_y\gamma_c} \leq 1, \quad (2.4)$$

де R_y - розрахунковий опір сталі на стиск, розтяг, вигин, визначений за межею плинності;

y_c - Коефіцієнт умов роботи рівний відповідно до »[31];

М - максимальний розрахунковий згинальний момент;

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

На зріз при дії перерізу поперечної сили:

$$\frac{PS}{ItR_s\gamma_c} \leq 1, \quad (2.5)$$

де P – поперечна сила;

S - статичний момент зсувної частини перерізу брутто щодо нейтральної осі;

I - момент інерції перерізу брутто;

t – товщина стінки двотавра;

R_s - розрахунковий опір сталі зсуву, що визначається за формулою 2.6;

γ_c - Коефіцієнт умов роботи [36].

Розрахунковий опір сталі зсуву визначається за формулою 2.6 відповідно до [31]:

$$R_s = 0.58R_y, \quad (2.6)$$

Епюри нормальних (σ) напруг та дотичних (τ) напруг для пружного стану перерізу балки показані на рисунку 2.2.

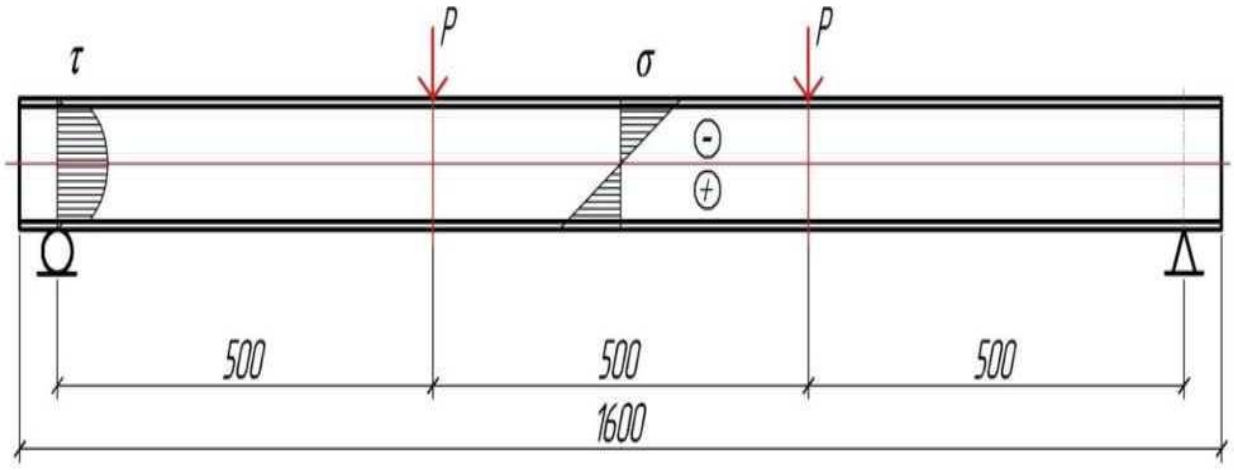


Рисунок 2.2 - Епюри нормальних та дотичних напруг для пружної роботи

Таким чином, нормальні напруги в перерізах двотаврових балок визначаються за такою формулою:

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

де M - максимальний згинальний момент, знайдений для випадку, що розглядається по формулі 2.2;

W_x - момент опору перерізу брутто щодо осі x;

R_y - розрахунковий опір сталі на стиск, розтяг, вигин, визначений за межею плинності.

Дотичні напруги в перерізах двотаврових балок визначаються за такою формулою:

$$\tau = \frac{QS_x}{I_x s} \leq R_s, \quad (2.8)$$

де Q - зусилля, що перерізує;

I_x, - відповідно момент інерції та перерізу щодо осі x;

S_x - статичний момент зсувної частини перерізу щодо осі x;

s – товщина стінки;

R_s – розрахунковий опір сталі на зріз.

Робота прокатних балок на зріз, за умови відсутності ослаблення опорних перерізів, зазвичай забезпечується завдяки значній товщині їхніх стінок. Основну увагу приділяють забезпеченню роботи на вигин під дією нормальних напружень.

Напружено-деформований стан балки в умовах пружно-пластичної роботи.

Зі збільшенням навантаження процес плинності починає поширюватися всередину перерізу, формуючи верхні та нижні зони плинності, тоді як у центрі зберігається пружне ядро. Такий стан класифікується як напружено-деформований стан 2-го класу, або пружно-пластичний стан, при якому допускається утворення часткових пластичних деформацій.

Епюри нормальних (σ) напруг та дотичних (τ) напруг для пружно-пластичного стану перерізу досліджуваної балки показані на рисунку 2.3.

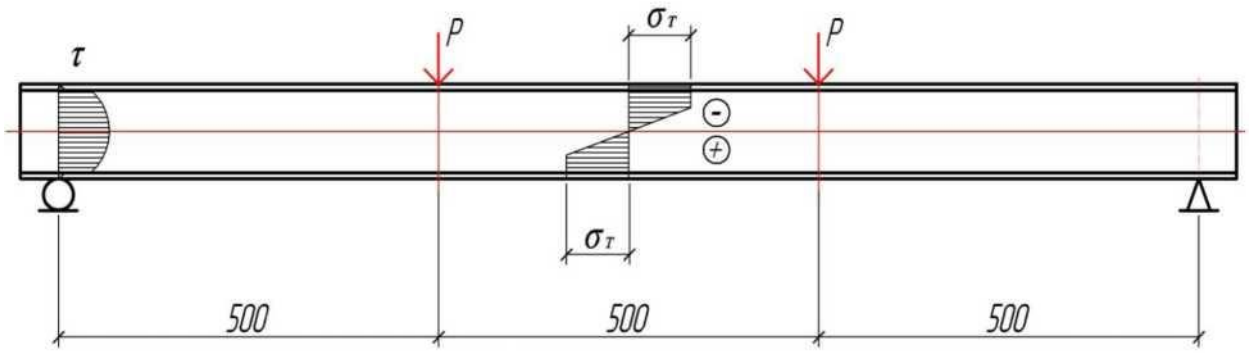


Рисунок 2.3 - Епюри нормальних та дотичних напруг для пружнопластичної роботи

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

$$\sigma = \frac{\text{M}}{\text{c}_\text{x}\beta W_\text{x}} \leq R_y\gamma_c \ , \qquad (2.9)$$

де M - максимальний розрахунковий згинальний момент, знайдений у даному випадку за формулою 2.2;

W_x - момент опору перерізу брутто щодо осі x ;

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

c_x - коефіцієнт обліку розвитку пластичних деформацій, визначається за [2] залежно від схеми перерізу; для двотаврових балок можна спрощення з достатньою точністю прийняти c_x=1,1;

γ_c - Коефіцієнт умов роботи рівний відповідно до [2].

Напружено-деформований пластичний стан балки.

Епюри нормальних (σ) напруг та дотичних (τ) напруг для пластичного

стану перерізу балки показані на рисунку 2.4.

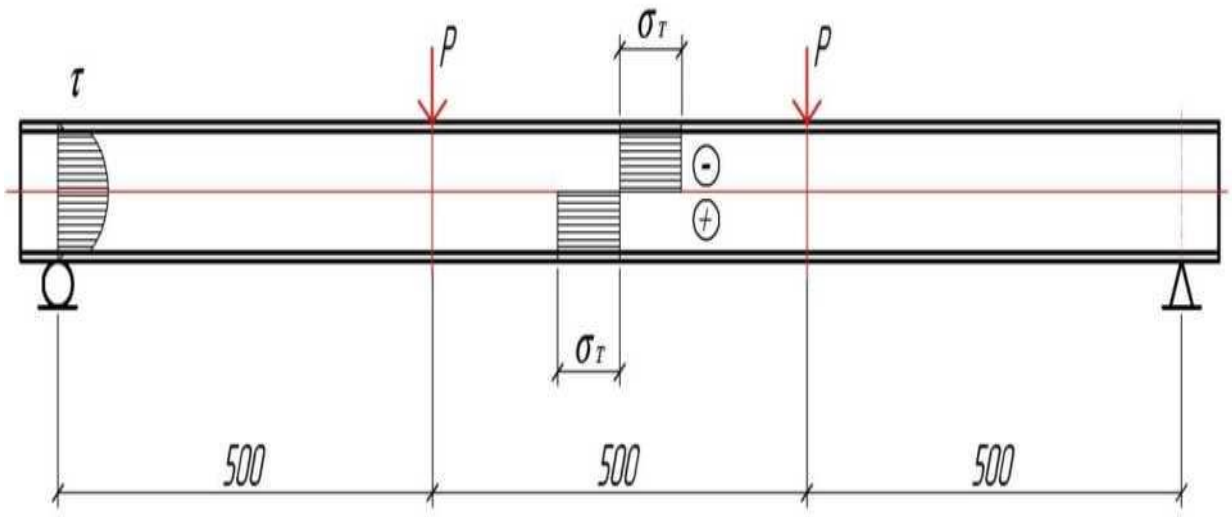


Рисунок 2.4 - Графіки розподілу нормальних і дотичних напружень у стані пластичної роботи (умовного пластичного шарніра)

При подальшому навантаженні напруження плинності продовжують поширюватися, поступово охоплюючи весь переріз. Це призводить до досягнення напружено-деформованого стану 3-го класу, коли по всій площі перерізу виконується умова $|\sigma| = \sigma_y$. У такому стані аналізований двотавровий переріз переходить у пластичний стан, який називають «умовним шарніром пластичності

2.2 Теоретичне обґрунтування роботи згинального двотавра, посиленого смугою, прикріпленою до нижньої полиці на зварюванні

Для випробування було підготовлено п'ять зразків: двотаври №12 ДСТУ 8768:2018, довжиною 1600 міліметрів (проліт 1500 міліметрів); форма перерізу представлена на рисунку 2.5.

За наведеними даними із сертифікату металу марка стали всіх підготовлених зразків – Ст3пс.

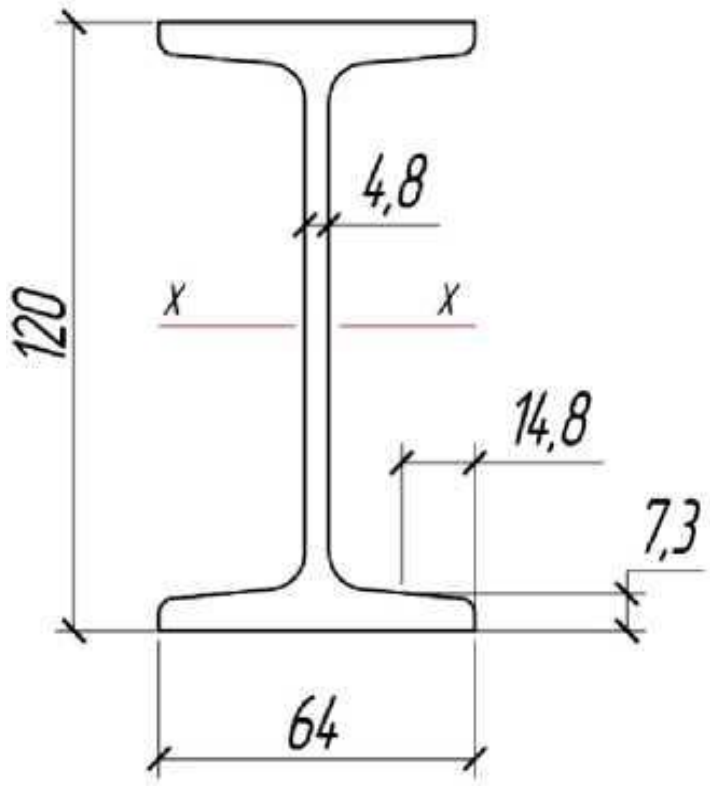


Рисунок 2.5 - Поперечний переріз двотавру

Номінальні розміри двотаврів, площа поперечного перерізу, маса і довідкові значення для осей наведені в таблиці 2.1 і відповідають [41].

Таблиця 2.1 – Довідкові дані двотавра №12

№	Розміри					Площа поперечного	Маса 1м	Довідкові значення для осей						
								X-X				Y-Y		
	h	b	S	t	R			I_x	W_x	i_x	S_y	I_y	W_y	I_y
	мм					$см^2$	кг	$см^4$	$см^3$	см	$см^3$	$см^4$	$см^3$	см
12	120	64	4,8	73	7,5	14.7	11.5	350	58,4	4,88	33,7	27,9	8,72	1,38

Посилення двотавра проводиться смуговим елементом: переріз 100х10мм, довжиною 700 мм відповідно до рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 - Схема посилення :

При посиленні поперечного перерізу змінюється його геометрія, що впливає на розташування центру тяжіння та момент опору перерізу відносно осі x.

Для визначення нормальних напружень необхідно врахувати нове положення горизонтальної осі, зумовлене зміною перерізу через прикріплення смуги. Положення центру тяжіння нового перерізу визначається шляхом розрахунку відносно осі x, як показано на рисунку 2.7..

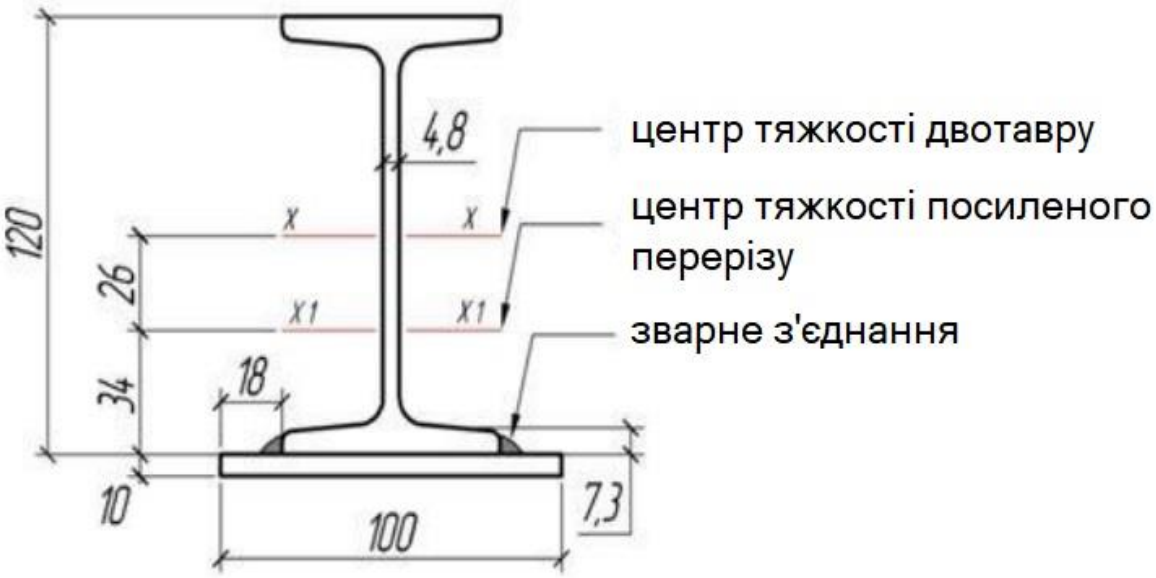


Рисунок 2.7 – Посилений перетин

Положення центру тяжіння посиленого елемента відносно осі x розраховується за формулою 2.10:

$$Y_{\text{ц.т.}} = \frac{\sum S_x}{\sum A} = \frac{10*1*6,3}{14,7+10*1} = 26\text{мм},(2.10)$$

де: $\sum A$ - Сума площ;

$\sum S_x$ - сума статичних моментів щодо осі х.

Відповідно до формули 2.10 центр тяжкості посилених збільшенням перерізу зразків щодо центру тяжкості еталонного зразка зміщений на y_{max}= 2.6 см щодо осі х.

Для визначення моменту опору перерізу посиленої балки необхідно визначити момент інерції щодо осі x_1. Момент інерції визначається за формулою 2.11, відповідно до рисунка 2.8:

Момент інерції посиленого перерізу щодо осі х:

$$I_x = I_x^{\text{дв}} + A_{дв}*2.6^2 + 10*1^3/10 + 10*1*3.7^2 =$$

$$= 350 + 14.7 * 2.6^2 + 10*1^3/10 + 10*1*3.7^2 = 587.27 \text{ см}^4 \quad (2.11)$$

Момент опору посиленого перерізу щодо осі х для розтягнутого волокна визначається за формулою 2.12:

$$W_x^{\text{роз}} = \frac{I_x}{3,7} = \frac{587,27}{3,7} = 158,7\text{см}^3, \quad (2.12)$$

Момент опору посиленого перерізу щодо осі х для стисненого волокна визначається за формулою 2.13:

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

Оскільки $W_x^{\text{сж}} < W_x^{\text{роз}}$ максимальне навантаження на момент настання плинності буде визначатися в даному випадку для стиснутих волокон за формулою 2.14

$$P_{max} = \frac{W_x^{\text{сж}}\sigma_m}{\alpha} = \frac{68.3*42.8}{50} = 58.46\text{кН}, \quad (2.14)$$

де σ_m - межа плинності СтЗпс (надалі визначений за випробуванню еталонного зразка 42.8кН/см^2);

α - відстань від опори до прикладених двох зосереджених навантажень P_{max};

$W_x^{сж}$ - момент опору перерізу щодо осі x_1, визначений за формулою 2.13.

Максимальний розрахунковий згинальний момент при моменті опору для розтягнутих волокон для посиленого зразка визначається за формулою 2.15:

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

де $P_{мах}$ - максимальне навантаження, яке може сприймати посилений сталевий двотавр, визначене за формулою 2.14.

Момент опору посиленого перерізу для стисненого волокна 68,3 см^3 волокон лише трохи більше моменту опору непідсиленого двотавра W_x = 58,4 см^3, що є передумовою для висновку про недостатню ефективність запропонованого варіанта посилення. Для остаточного висновку потрібне проведення експериментального дослідження.

Еталонний двотавр №12:

Ядрова відстань у напрямку осі «Y»:

$P_y = W_x / A = 58{,}4/14{,}7 = 3{,}98$ см;

Ядрова відстань у напрямку осі «X»:

$P_x = W_y / A = 8{,}72/14{,}7 = 0{,}59$ см.

Момент опору посиленого перерізу щодо осі x для розтягнутого волокна визначається як:

$$W_x^{роз} = \frac{I_x}{3{,}7} = \frac{587{,}27}{3{,}7} = 158{,}7 см^3,$$

Момент опору посиленого перерізу щодо осі x для стиснутого волокна визначається як:

$$W_x^{сж} = \frac{I_x}{8{,}6} = \frac{587{,}27}{8{,}6} = 68{,}3 см^3,'$$

- для стисненого волокна $P_y^{сж}=W_x^{сх}$ / А= 68,3/24,7= 2,77 см;

- для розтягнутого волокна $P_y^{роз}=W_x^{роз}$ / А= 158,7/24,7= 6,43 см;

де $\sum A = A_{дв} + A_{пол}$=14.7+10 = 24,7 см^2.

Аналіз : 2,77 см $\ll$ 3,98см; 6,43 $\gg$ 3,98 см.

Висновок: посилення неефективне, слабка стисла зона.

2.3 Теоретичне обґрунтування роботи згинального двотавра, посиленого двома смугами - 50х10 симетричних двох сторін стінки на зварюванні

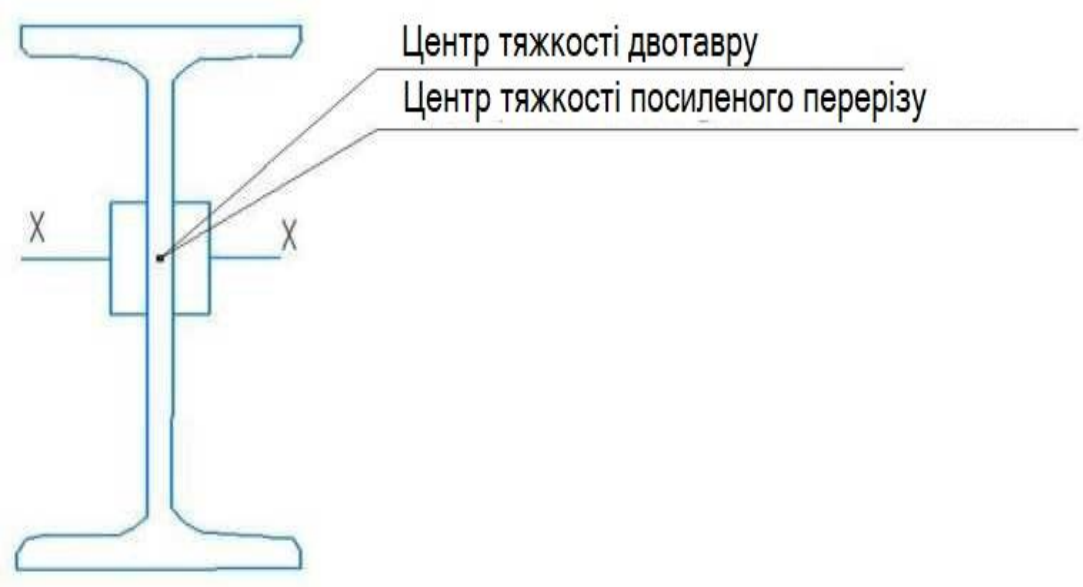


Рисунок 2.8 - Посилення двома смугами 50х100

Момент інерції посиленого перерізу щодо осі «Х»:

$$I_x = I_x^{дв} + I_x^{пол} = I_x^{дв} + \frac{t_{пол} * b_{пол}^3}{12} = 350 + 2\frac{1*5^3}{12} = 370{,}8 см^4.$$

Момент опору посиленого перерізу щодо осі «Х»:

$$W_x = \frac{I_x * 2}{h_{дв}} = \frac{370{,}8*2}{12} = 61{,}8 см^3$$

$\sum A$ =14.7+10 = 24,7 см^2.

$P_y = W_x / \sum A$= 61,8/24,7= 2,5 см.

2.4 Теоретичне обґрунтування роботи згинального двотавра, посиленого двома смугами - 100х10симетрично з двох сторін стінки на зварюванні

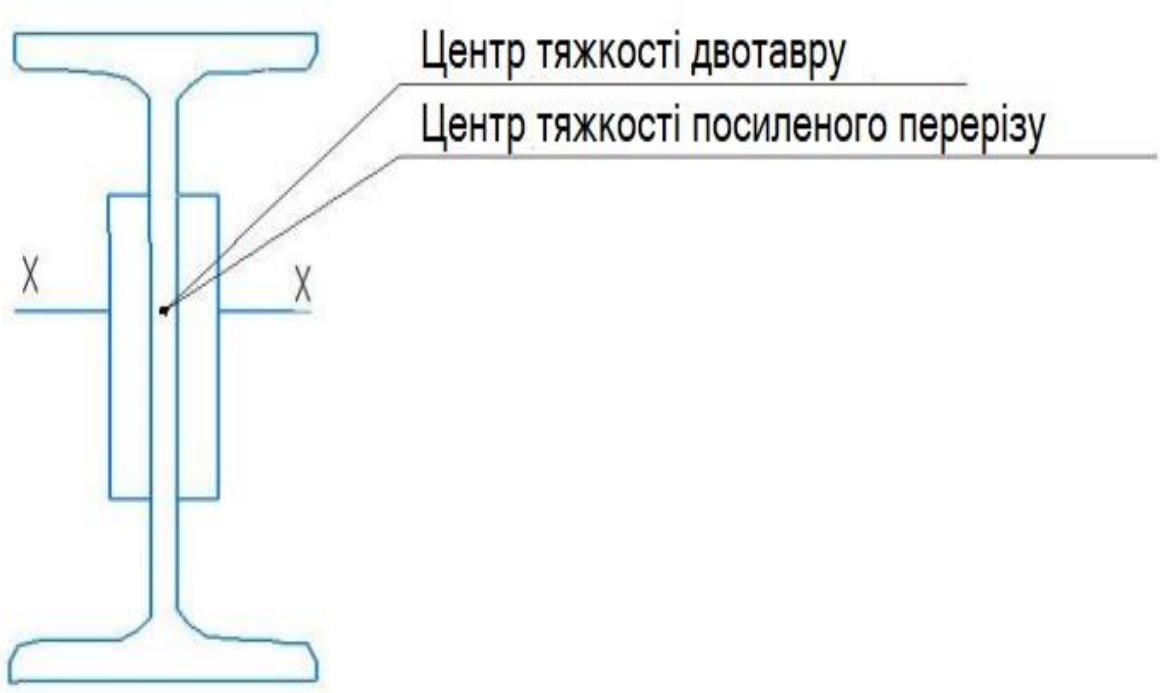


Рисунок 2.9 – Посилення двома смугами 100х10

Момент інерції посиленого перерізу щодо осі «Х»:

$$I_x = I_x^{\text{дв}} + I_x^{\text{пол}} = I_{\text{х}}^{\text{дв}} + \frac{t_{\text{пол}} * b_{\text{пол}}^3}{12} = 350 + 2\frac{1*10^3}{12} = 516{,}7\text{см}^4.$$

Момент опору посиленого перерізу щодо осі «Х»:

$$W_x = \frac{I_x * 2}{h_{\text{дв}}} = \frac{516{,}7*2}{12} = 86{,}1\text{см}^3$$

$\sum$ А =14.7+2*10 = 34,7 см².

$P_y = W_x / \sum A$= 86,1/34,7= 2,48 см.

2.5 Теоретичне обґрунтування роботи згинального двотавра, посиленого двома куточками L75x6 симметрично з двох сторін стінки на зварюванні

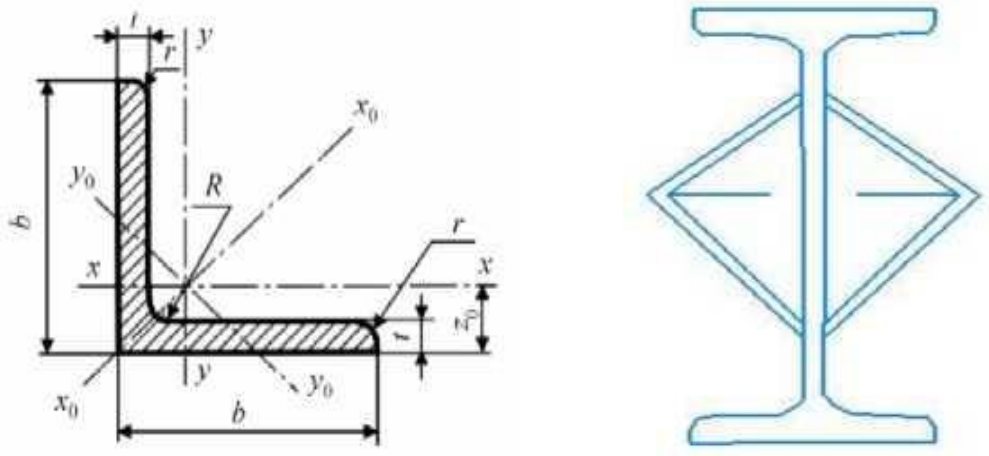


Рисунок 2.10 - Посилення двома куточками L75x6

Момент інерції посиленого перерізу щодо осі «Х»:

$$I_x = I_x^{\text{дв}} + I_x^{\text{пол}} = I_{\text{х}}^{\text{дв}} + \frac{t_{\text{пол}} * b_{\text{пол}}^3}{12} = 350 + 2 * 73{,}87 = 497\text{см}^4.$$

Момент опору посиленого перерізу щодо осі «Х»:

$$W_x = \frac{I_x * 2}{h_{\text{дв}}} = \frac{497 * 2}{12} = 86{,}1\text{см}^3 \gg 58{,}4\text{см}^3$$

$\sum$ A =14.7+2*8,78 = 32,26 см^2.

$P_y = W_x / \sum A$= 83/32,26= 2,57 см.

Обґрунтування раціональності схеми посилення:

- Можливість застосування зварювання;

- Збільшення моментів опору, симетричне для стиснутих і розтягнутих волокон.

Таблиця 2.2 – Довідкові дані куточків L75

Номер куточка	b	t	R	r	Площа перерізу, $см^2$	Маса 1 м куточка , кг	Довідкові величини для осей									
							x - x			x_0 — x_0		$y_0 - y_0$			I_{xy}, $см^4$	z_0, см
	мм						I_x, $см^4$	W_x, $см^3$	i_x, см	I_{x0max}, см4	I_{x0max}, см	I_{y0min}, $см^4$	W_{y0}, $см^3$	i_{y0min} см		
7,5	75	5	9	3	7,39	5,80	39,53	7,21	2,31	62,65	2,91	16,41	5,74	1,49	23,10	2,02
		6			8,78	6,89	46,57	8,57	2,30	73,87	2,90	19,28	6,62	1,48	27,30	2,06
		7			10,15	7,96	53,34	9,89	2,29	84,61	2,89	22,07	7,43	1,47	31,20	2,10
		8			11,50	9,02	59,84	11,18	2,28	94,89	2,87	24,80	8,16	1,47	35,00	2,15
		9			12,83	10,07	66,10	12,43	2,27	104,72	2,86	27,48	8,91	1,46	38,60	2,18

2.6 Висновки за другим розділом

Для посилення двотавра №12 необхідно зосередитися на підвищенні його жорсткості при згинанні. Теоретичний розрахунок показав, що несиметричне підсилення зразка Б2, при якому смуга закріплена до нижньої полиці, є малоефективним. Найкращий результат досягається при симетричному підсиленні стінки двотавра з обох боків.

РОЗДІЛ 3
АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Методика випробування балок

Для випробування металевих балок були підготовлені зразки п'яти серій ДСТУ 8768:2018 довжиною 1600 міліметрів, відстань між опорними частинами установки 1500 міліметрів.

За даними сертифікату на метал, марка стали п'яти підготовлених зразків - Ст3пс5.

Таблиця 3.1 – Зразки для випробування

Поз.	Відправна марка	Кількість	Перетин, мм	Довжина, мм	Примітка
1	Б1	1	I 12	1600	Без посилення
2	Б2	1	I 12	1600	З посиленням
3		1	-100x10	700	Елемент посилення
4	Б3	1	I 12	1600	З посиленням
5		2	-50x10	700	Елемент посилення
6	Б4	1	I 12	1600	З посиленням
7		2	-100x10	700	Елемент посилення
8	Б5	1	I 12	1600	З посиленням
9		2	L 75x6	700	Елемент посилення

Установка для випробування на поперечний згин.

Установка для випробування балочних конструкцій складається з основи 1, жорстко встановлених на ньому опорних стійок 2, навантажувального пристрою, яке виконане з можливістю докладання знакозмінних навантажень і забезпечене реверсним механізмом 3 та джерелом дискретного навантаження 4. Реверсний механізм 3 виконаний у вигляді двох пар вертикальних тяг, які з'єднані між собою двома траверсами 5 та 6 з отворами під ці тяги. Одна пара тяг 7 і 8 жорстко встановлена на підставі 1, а інша пара тяг 9 і 10 виконана з можливістю закріплення на балочної конструкції, що випробовується, 11 за допомогою хомутів 12 рамної конструкції. При цьому кінці балкової конструкції 11 закріплені в опорних

стійках 2 за допомогою елементів 13. Траверси 5 і 6 горизонтально встановлені одна над іншою, а на нижній траверсі 6 встановлений джерело дискретного навантаження 4, який виконаний у вигляді гідравлічного домкрата. Кожна тяга 7 і 8, 9 і 10 забезпечена регулювальними гайками: тяга 7 - гайками 14, 15 і 16, тяга 8 - гайками 17, 18 і 19, тяга 9 - гайками 20 і 21, тяга 2 - 12. Регулювальні гайки 14-23 призначені для регулювання вільного ходу траверс 5, 6 і тяг 9 і 10 і зміни напрямку дії навантажень, що додаються до балочной конструкції, що випробовується, 11, оскільки джерело дискретного навантаження 4 діє завжди в одному напрямку. Крім того, установка забезпечена динамометром 24, що фіксує прикладаються до балочної конструкції 11 навантаження.[40]. Установка для випробування балочних конструкцій складається з основи 1, жорстко встановлених на ньому опорних стійок 2, навантажувального пристрою, яке виконане з можливістю докладання знакозмінних навантажень і забезпечене реверсним механізмом 3 та джерелом дискретного навантаження 4. Реверсний механізм 3 виконаний у вигляді двох пар вертикальних тяг, які з'єднані між собою двома траверсами 5 та 6 з отворами під ці тяги. Одна пара тяг 7 і 8 жорстко встановлена на підставі 1, а інша пара тяг 9 і 10 виконана з можливістю закріплення на балочної конструкції, що випробовується, 11 за допомогою хомутів 12 рамної конструкції. При цьому кінці балкової конструкції 11 закріплені в опорних стійках 2 за допомогою елементів 13. Траверси 5 і 6 горизонтально встановлені одна над іншою, а на нижній траверсі 6 встановлений джерело дискретного навантаження 4, який виконаний у вигляді гідравлічного домкрата. Кожна тяга 7 і 8, 9 і 10 забезпечена регулювальними гайками: тяга 7 - гайками 14, 15 і 16, тяга 8 - гайками 17, 18 і 19, тяга 9 - гайками 20 і 21, тяга 2 - 12. Регулювальні гайки 14-23 призначені для регулювання вільного ходу траверс 5, 6 і тяг 9 і 10 і зміни напрямку дії навантажень, що додаються до балочной конструкції, що випробовується, 11, оскільки джерело дискретного навантаження 4 діє завжди в одному напрямку. Крім того, установка забезпечена динамометром 24, що фіксує прикладаються до балочної конструкції 11 навантаження.

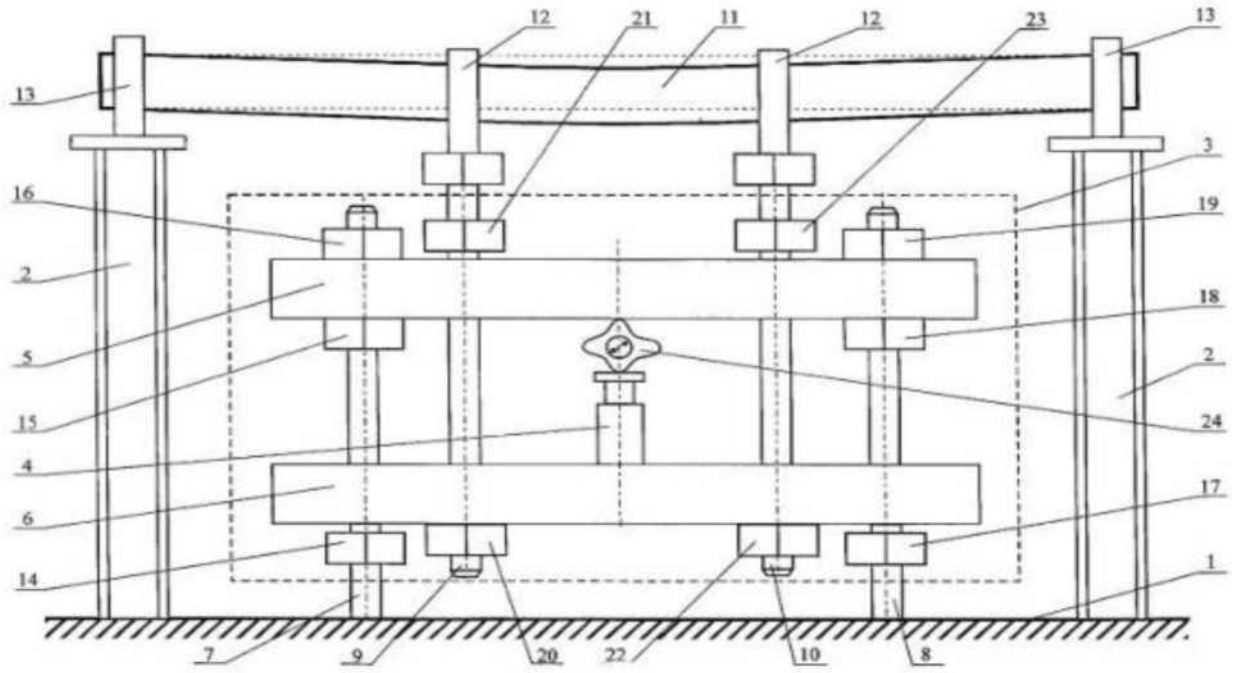


Рисунок 3.1 - Випробувальний стенд

Установка для випробування балкових конструкцій працює в такий спосіб. Балочну конструкцію 11 встановлюють на опорні стійки 2 і закріплюють елементами 13. Тяги 9 і 10 за допомогою хомутів 12 закріплюють на балочній конструкції 11, приєднавши до неї тим самим пристрій, що навантажує. Подавши під тиском масло від насосної станції джерело дискретного навантаження 4 - гідравлічний домкрат односторонньої дії, навантаження передається через реверсивний механізм 3. Залежно від положення регулювальних гайок 14-23 на тягах 7 і 8 і 9 і 10 змінюють напрям зусилля, що дає можливість балочної конструкції 11 деформуватися в площині дії згинального моменту зі зміною стріли прогину.

Для створення прогину вниз (Фіг.2) гайки 14 і 17 і гайки 21 і 23 відвертають, звільняючи траверсу 6, даючи їй вільний хід вниз під дією джерела дискретного навантаження 4, а гайки 16 і 19 підтиснуті до траверси 5 і обмежують . Траверса 6 вивішується на гайках 20 та 22, які обмежують її рух вниз. Але при додатку зусилля джерелом 4, траверса 6, спираючись на гайки 20 і 22, починає тягнути вниз тяги 9 і 10, підвішені на балочній конструкції 11,

які навантажують її, створюючи певний згинальний момент, що впливає на балочну конструкцію 11 в місцях установки та 10. Таким чином здійснюють випробування балочної конструкції в одному напрямку докладання згинального моменту - позитивному.

Для зміни знака застосування згинального моменту на протилежний - негативний, необхідно послабити гайки 16, 20 і 19, 22 (Фіг.3), а гайки 14, 17 і 21, 23 піджати до відповідних траверсів. Тоді при додатку зусилля джерелом дискретного навантаження 4 траверса 6 залишається на місці і підтискається до гайок 14 і 17, а траверса 5, отримавши свободу від гайок 16, 20 і 19, 22 і підтискаючись до гайок 21 і 23 тяг 9 і 10, , піднімає вгору і тяги 9 10, які впливають на нерухому балочну конструкцію 11, створюють згинальний момент зі стрілою вигину вгору, при цьому динамометр 24 фіксує прикладене зусилля. Таким чином здійснюють випробування балочної конструкції в іншому напрямку застосування згинального моменту.



Рисунок 3.2 - Установка для випробування балкових конструкцій

Навантаження прикладається симетрично поетапно (кожний етап - 100 кг) до верхньої полиці у двох точках за допомогою траверси та тяг на відстані 500 мм від крайніх опор. Величина навантаження контролюється за показаннями динамометра.

У міру навантаження кожного етапу знімалися показання по приладах, що контролюють прогини та напруги в середині прольоту, що показано на рисунку 3.3: прогини - за допомогою прогібомеру Аїстова; напруги – важелевими тензометрами Гугенбергера.

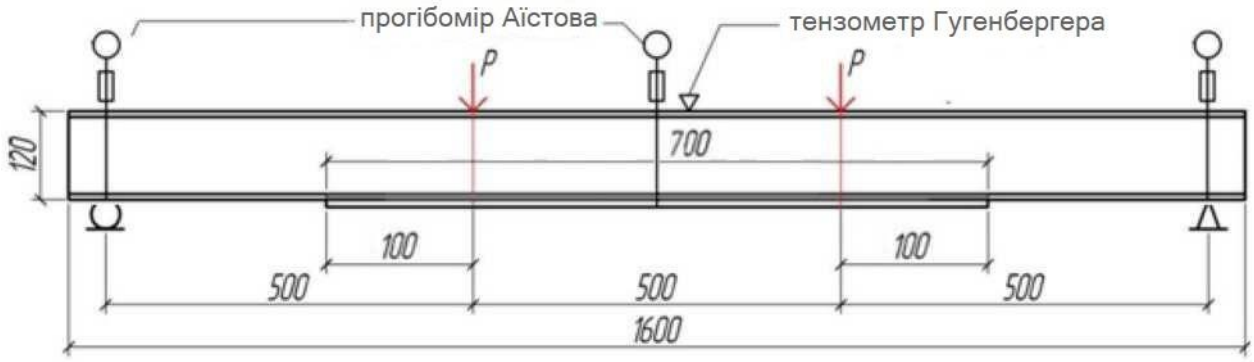


Рисунок 3.3 - Схема навантаження та розміщення приладів

Ціль випробування: отримати дійсне значення $\sigma_т$.

Випробування еталонного зразка Б1 першої серії (рисунок 3.4) проводилося в наступному порядку:

1. Встановлення балки на опори.

2. Поступове навантаження етапами по 100 кг.

3. Фіксування результатів вимірів кожному етапі навантаження за тензометром Гугенбергера та прогібоміром Аїстова.

4. Фіксування максимального навантаження на момент появи плинності зразка.

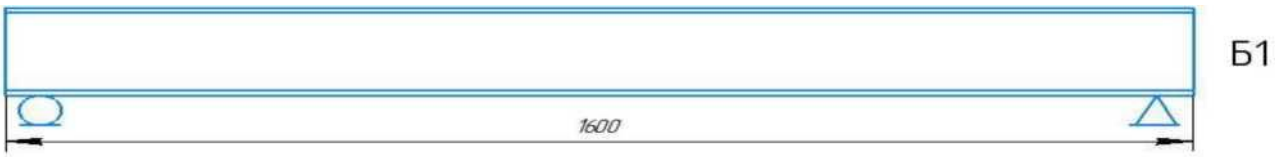


Рисунок 3.4 - Зразок еталонний, балка двотаврова без посилення

Випробування зразка Б2, другої серії (рис.3.5) інакше:

1. Встановлення балки на опори.

2. Посилення балки смугою, що приварюється до нижньої полиці.

3. Поступове навантаження етапами по 100 кг.

4. Фіксування результатів вимірів кожному етапі навантаження за тензометром Гугенбергера та прогібоміром Аїстова.

5. Фіксування максимального навантаження на момент появи плинності зразка.

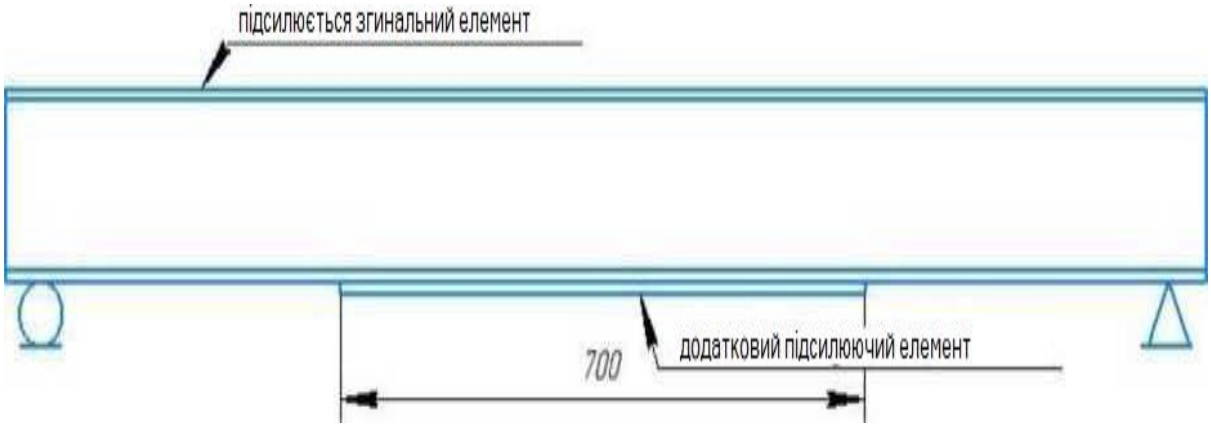


Рисунок 3.5 - Посилення смугою в нижній частині – 100х10

Випробування зразків Б3-Б5, третьої, четвертої та п'ятої серій (рисунок 3.6-3.8) проводились у такому порядку:

1. Встановлення балки на опори.

2. Посилення балки двома смугами (куточками), що приварюються симетрично з двох сторін стінки.

3. Поступове навантаження етапами по 100 кг.

4. Фіксування результатів вимірювань на кожному етапі навантаження по тензометру Гугенбергера та прогібоміру Аїстова.

5. Фіксування максимального навантаження на момент появи плинності зразка.

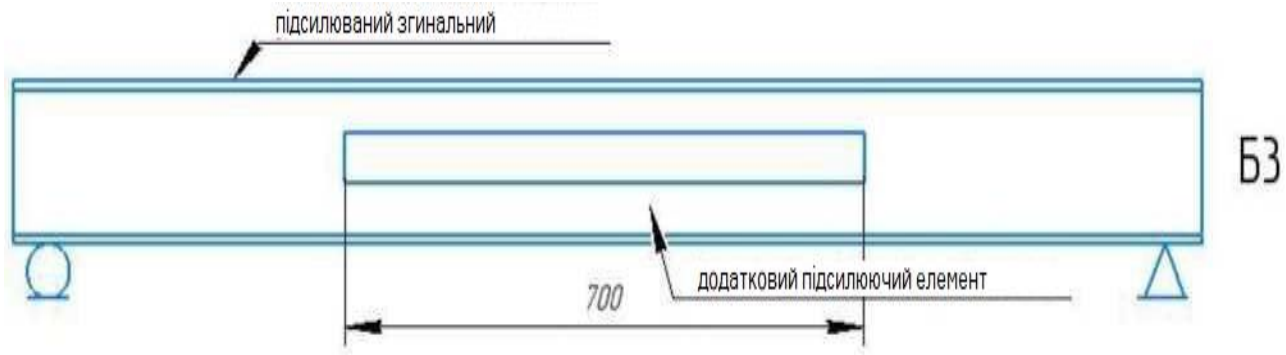


Рисунок 3.6 - Посилення двома смугами – 50х10 симетрично з двох сторін стінки

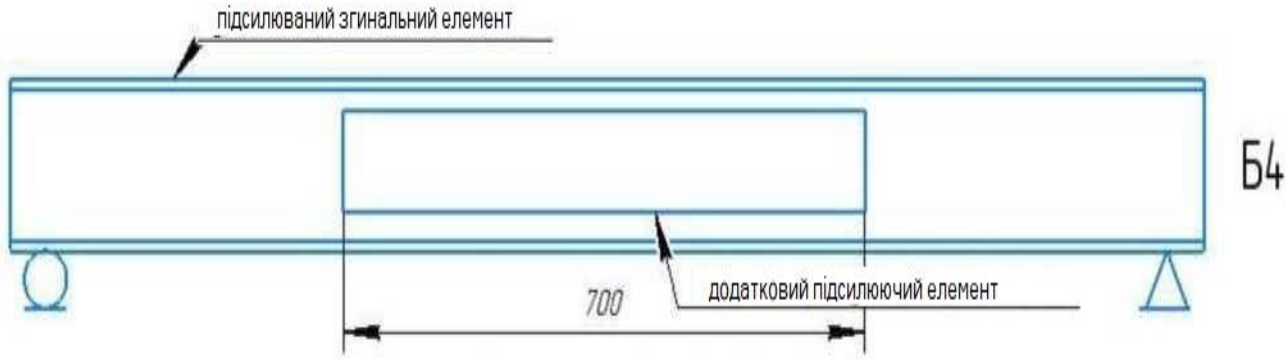


Рисунок 3.7 - Посилення двома смугами – 100х10 симетрично з двох сторін стінки

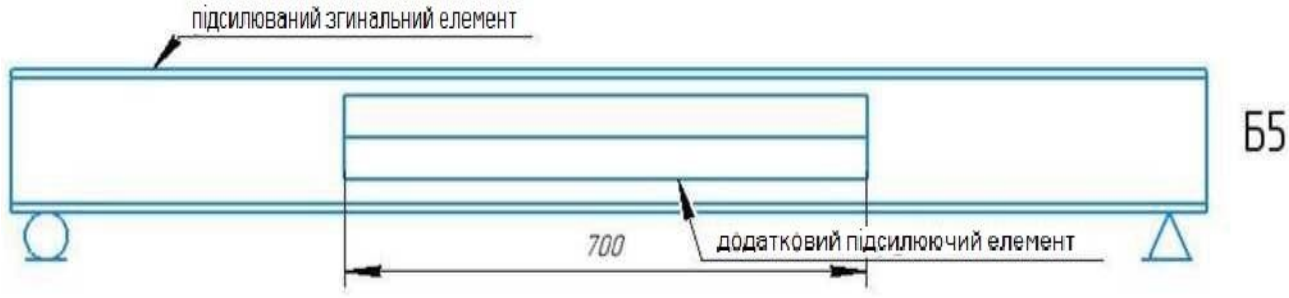


Рисунок 3.8 - Посилення двома куточками L75х6 симетрично з обох боків стінки

3.2 Результати випробування зразка марки Б1, еталонної балки



Рисунок 3.9 -Випробування еталонного зразка

Результати випробування балки Б1 (еталонний зразок) відображені у таблиці 3.2 та на рисунках 3.9-3.10.

Таблиця 3.2 – Результати випробування еталонної балки

Марка балки	Посилення	Попер. нагр., теоретич., тн	Попер. нагр., практичний, тн	Прогин, мм
Б1	—	4,99	5,5	9,29

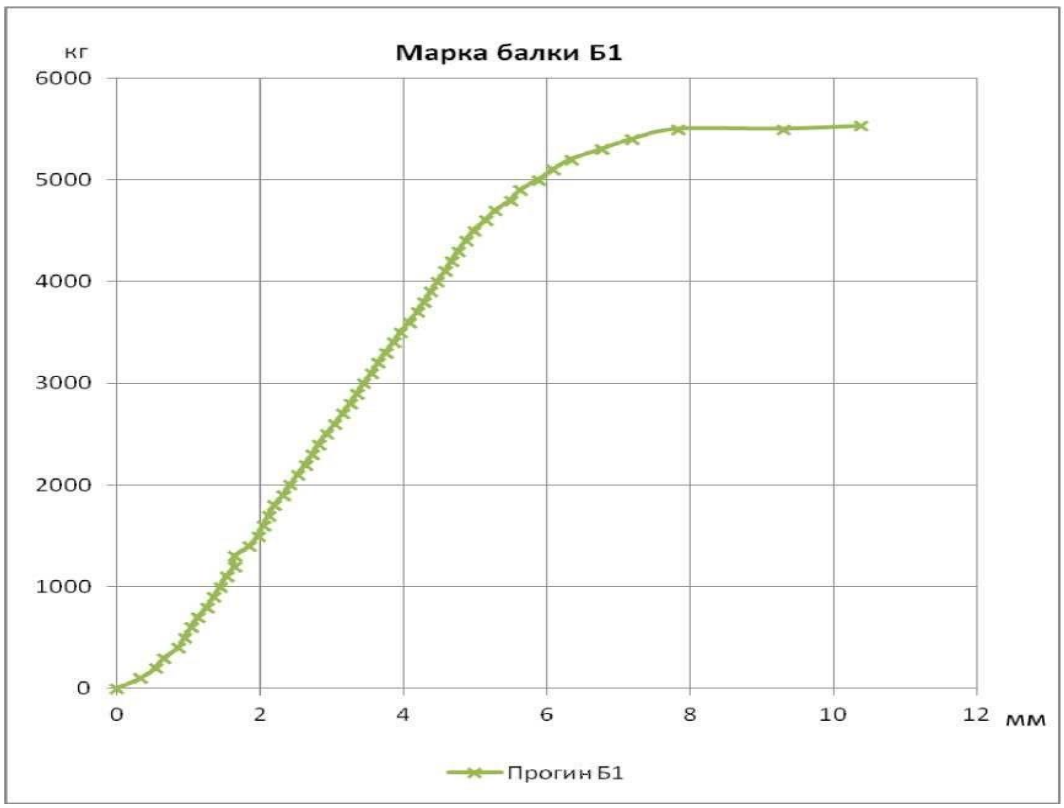


Рисунок 3.10 - Діаграма прогину - навантаження зразка Б1 (еталонного зразка)

Випробування еталонного зразка без посилення випробовувалося визначення несучої здібності і межі плинності. У результаті було виявлено, що межа плинності стали становив 411 МПа, тобто. виявився вищим за заявлену величину 325МПа.

Межа плинності еталонного зразка визначається як

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{P_m * a}{W_x} = \frac{50*50}{58.4} = 42.8\text{кН/см}^2$$

де P_m - навантаження межі плинності Ст3пс (за випробуванням еталонного зразка);

a- відстань від опори до прикладених двох зосереджених навантажень;

W_x - момент опору перерізу брутто щодо осих.

При $\sigma_{\text{т}}$ = 42,8 в теоретичних дослідженнях зразка Б1(еталонна балка) максимальне навантаження P_{max}=49,99 кН/см^2, що у свою чергу виявилося не набагато менше ніж при практичних випробуваннях в яких P_{max}=55 кН/см^2.

Висновок: навантаження при практичному випробуванні еталонного зразка балки Б1 приблизно збігається з теоретичними розрахунками, різниця між теоретичним та практичним випробуванням становить менше 10%.

3.3 Результати випробування зразка марки Б2, посиленого смугою 100х10, прикріпленої до нижньої полиці

Випробування зразка марки Б2 (рисунок 3.11) проводилося в наступному порядку:

1) Встановлення балки на опорні стійки.

2) Посилення балки смугою -100х10, що приварюється до нижньої полиці.

3) Поступове навантаження етапами по 100 кг.

4) Фіксування результатів вимірювань на кожному етапі навантаження по тензометру Гугенбергера та прогібоміру Аїстова.

5) Фіксування максимального навантаження на момент появи плинності зразка.



Рисунок 3.11 - Прикріплення смуги - 100х10 до нижнього пояса балки Б2, що випробовується.



Рисунок 3.12- Випробування зразка посиленого смугою в нижній частині-100х10

Результати випробування балки Б2 були відображені у таблиці 3.3 та на рисунках 3.13-3.14.

Таблиця 3.3 – Результати випробування еталонної балки

Марка балки	Посилення	Попер. нагр., теоретич., тн	Попер. нагр., практичний, тн	Прогин, мм
Б2	-100х10	5,84	5,9	6,05

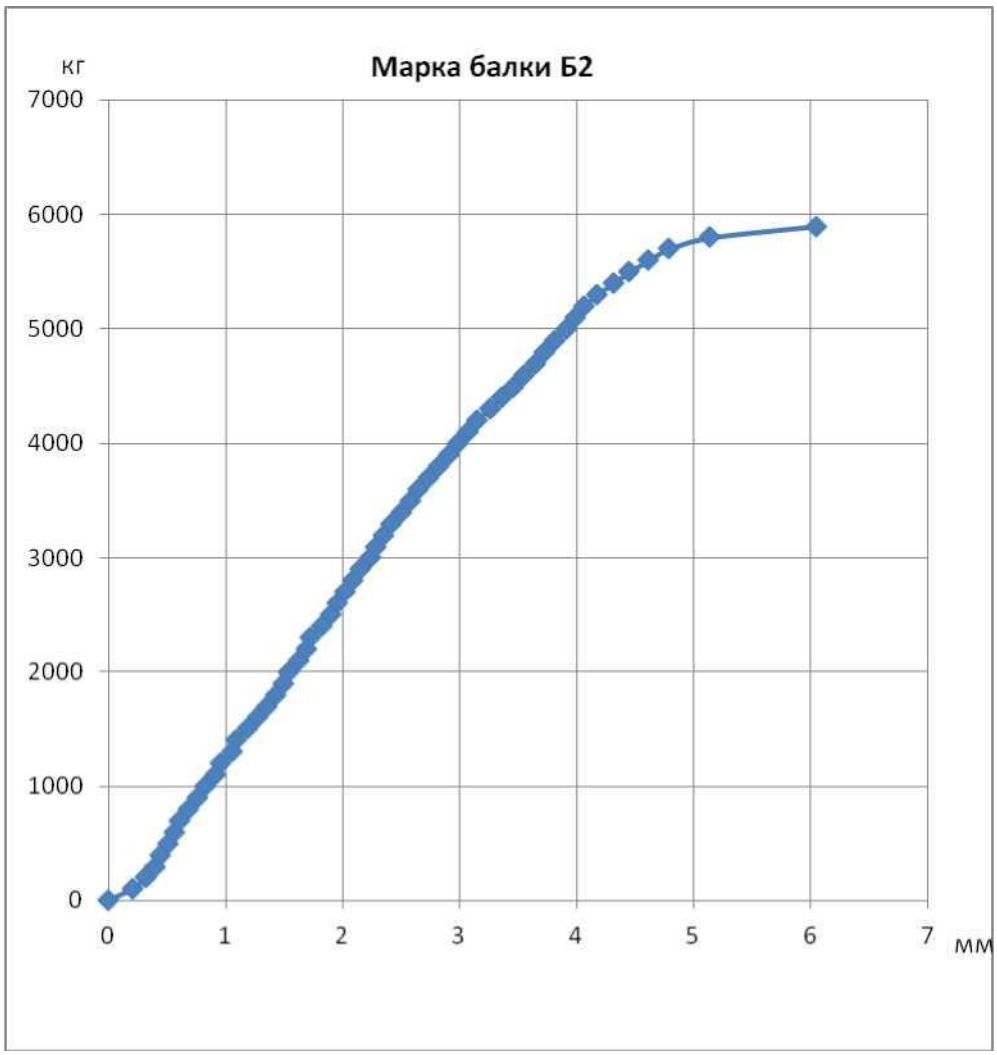


Рисунок 3.13 - Діаграма прогину - навантаження зразка Б2 (посиленого смугою в нижній частині - 100х10)

В результаті проведеного випробування балки Б2 граничне навантаження склало 5,9 тн, що мізерно вище граничного навантаження зразка Б1 (еталонного зразка); це перевищення становить 400 кг. Вид посиленої балки Б2 після випробування показано на рисунок 3.14.

При $\sigma_т$= 42,8 в теоретичних дослідженнях зразка Б2 максимальне навантаження P_{max} =58,46 кН/см^2, що у свою чергу виявилося не набагато менше ніж при практичних випробуваннях в яких P_{max} =59 кН/см^2.

Висновок: навантаження при практичному випробуванні еталонного зразка балки Б2 приблизно збігається з теоретичними розрахунками, різниця між теоретичним та практичним випробуванням становить менше ніж 2%.



Рисунок 3.14 - Вид посиленої балки Б2 після випробування

3.4 Результати випробування зразка марки Б3, посиленого двома смугами 50х10, прикріпленими з обох боків стінки симетрично

Випробування зразка марки Б3 (рисунок 3.15) проводилося так:

1) Встановлення балки на опорні стійки.

2) Посилення балки двома смугами -50х10, що приварюються симетрично з двох сторін стінки.

3) Поступове навантаження етапами по 100 кг.

4) Фіксування результатів вимірів кожному етапі навантаження за тензометром Гугенбергера та прогібоміром Аїстова.

5) Фіксування максимального навантаження на момент появи плинності изразка.



Рисунок 3.15- Прикріплення двох смуг - 50х10 із двох сторін стінки симетрично зразка балки Б3



Рисунок 3.16 - Випробування зразка Б3, посиленого двома смугами – 50х10 симетрично з двох сторін

Результати випробування балки Б3 були відображені в таблиці 3.4 та на малюнках 3.17-3.18.

Таблиця 3.4 – Результати випробування еталонної балки

Марка балки	Посилення	Попер. нагр., теоретич., тн	Попер. нагр., практичний, тн	Прогин, мм
Б3	-50x10 (2)	5,29	5,9	10,42

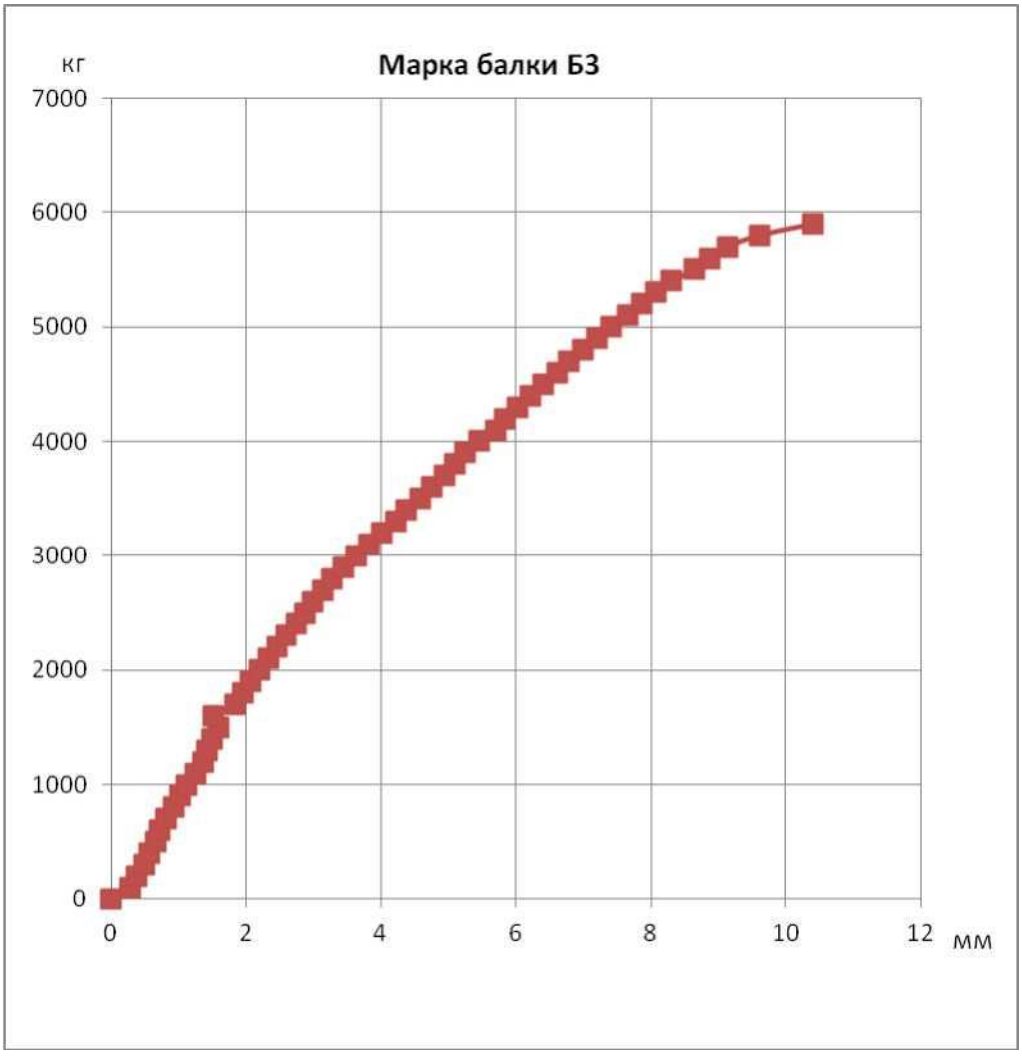


Рисунок 3.17 - Діаграма прогину - навантаження зразка Б3 (посиленого двома смугами - 50x10 симетрично з двох сторін)

В результаті проведеного випробування балки Б3 граничне навантаження склало 5,9 тн, що мізерно вище граничного навантаження зразка Б1 (еталонного зразка); це перевищення становить 400 кг. Вид посиленої балки

Б3 після випробування показано на рисунок 3.18.

При $\sigma_т$ =42,8 в теоретичних дослідженнях зразка Б3 максимальне навантаження P_{max} =52,9 кН/см^2, що у свою чергу виявилося не набагато менше ніж при практичних випробуваннях в яких P_{max} =59 кН/см^2.

Висновок: навантаження при практичному випробуванні еталонного зразка балки Б3 приблизно збігається з теоретичними розрахунками, різниця між теоретичним та практичним випробуванням становить менше 11%.



Рисунок 3.18 - Вид посиленої балки Б3 після випробування

3.5 Результати випробування зразка марки Б4, посиленого двома смугами 100х10, прикріпленими з обох боків стінки симетрично



Рисунок 3.19 - Прикріплення двох смуг - 100х10 з двох сторін стінки симетрично зразка балки Б4



Рисунок 3.20 - Випробування зразка Б4, посиленого двома смугами – 100х10 симетрично з двох сторін

Результати випробування балки Б4 були відображені в таблиці 3.5 та на рисунках 3.21-3.22.

Таблиця 3.5 – Результати випробування еталонної балки

Марка балки	Посилення	Попер. нагр., теоретич., тн	Попер. нагр., практичний, тн	Прогин, мм
Б4	-100х10 (2)	7,37	8,0	9,96

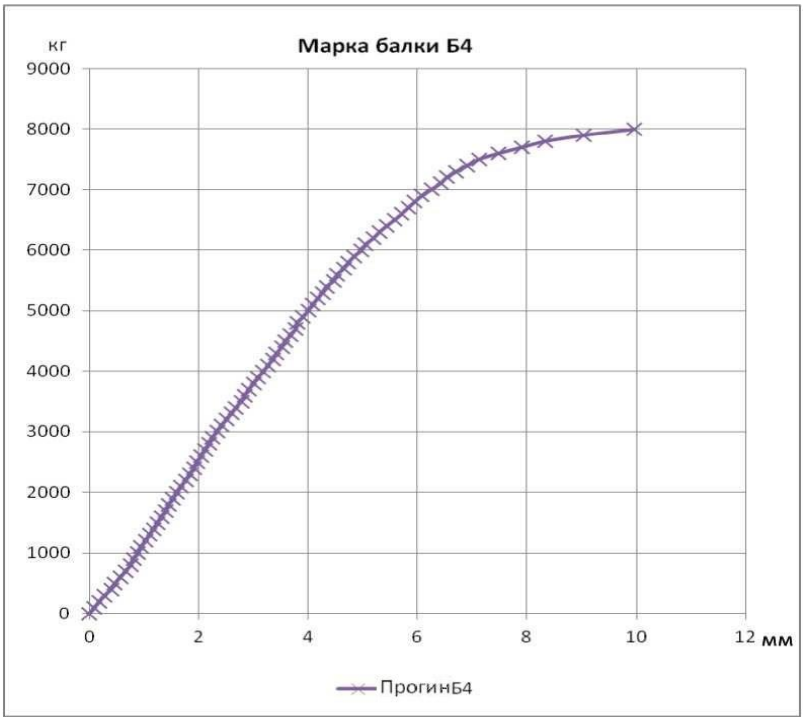


Рисунок 3.21 - Діаграма прогину - навантаження зразка Б4 (посиленого двома смугами - 100х10 симетрично з двох сторін)

В результаті проведеного випробування балки Б4 граничне навантаження склало 8,0 тн, що вище за граничне навантаження зразка Б1 (еталонного зразка); це перевищення становить 2500 кг. Вид посиленої балки Б4 після випробування показаний на рисунку 3.22.

При $\sigma_т$=42,8 в теоретичних дослідженнях зразка Б4 максимальне навантаження P_{max} =73,7 кН/см^2, що у свою чергу виявилося не набагато менше ніж при практичних випробуваннях в яких P_{max}=80 кН/см^2.

Висновок: навантаження при практичному випробуванні еталонного зразка балки Б4 приблизно збігається з теоретичними розрахунками, різниця між теоретичним та практичним випробуванням становить менше 8%.



Рисунок 3.22 - Вид усиленной балки Б4 после испытания

3.6 Результати випробування зразка марки Б5, посиленого двома кутками L75x6, прикріпленими з двох сторін стінки симетрично



Рисунок 3.23- Прикріплення куточків L75x6 з двох сторін стінки симетрично зразка балки Б5



Рисунок 3.24 - Випробування зразка Б5, посиленого двома куточками L75x6, симетрично з двох сторін

Результати випробування балки Б5 були відображені у таблиці 3.6 та на рисунках 3.25-3.26.

Таблиця 3.6 – Результати випробування еталонної балки

Марка балки	Посилення	Попер. нагр., теоретич., тн	Попер. нагр., практичний, тн	Прогин, мм
Б5	L75x6 (2)	7,09	8,2	11,75

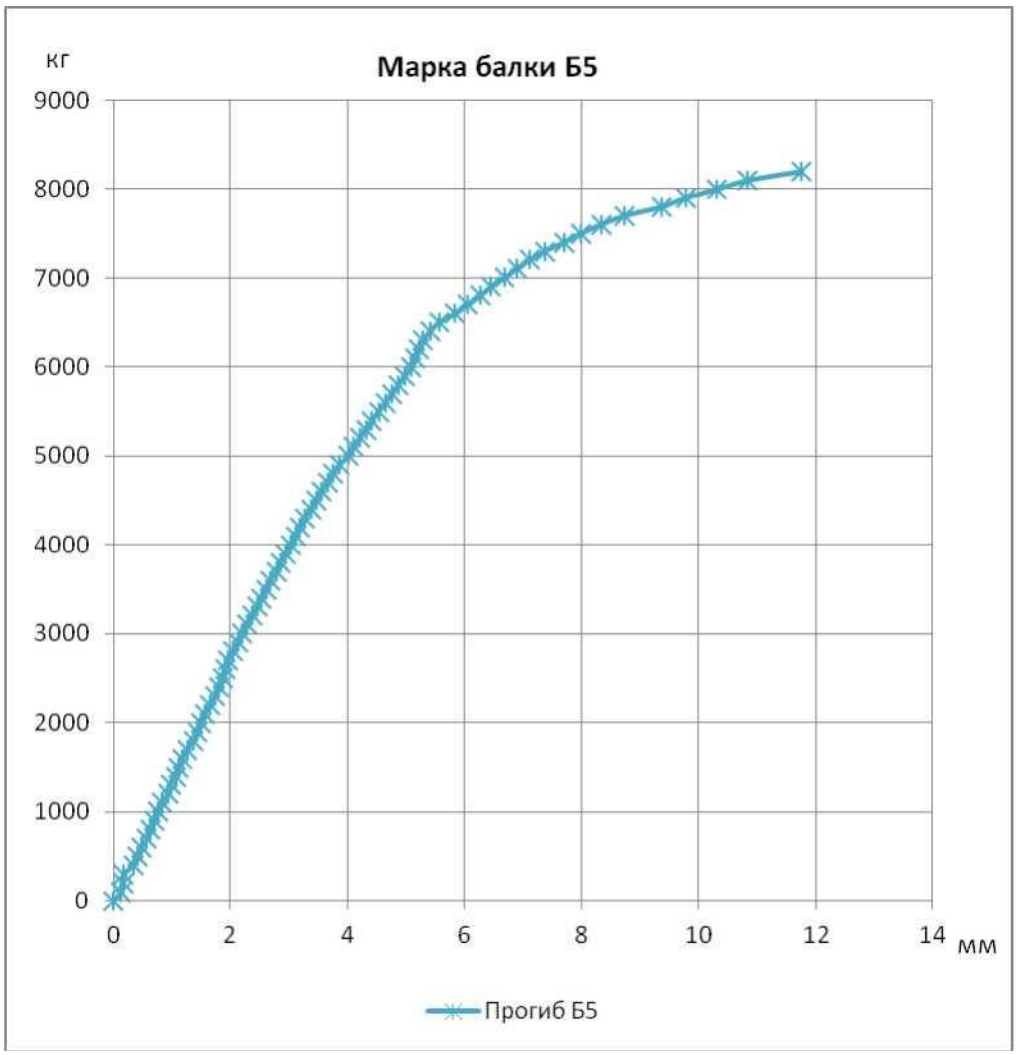


Рисунок 3.25 - Діаграма прогину - навантаження зразка Б5 (посиленого двома кутками L75x6 симетрично з двох сторін)

В результаті проведеного випробування балки Б5 граничне навантаження склало 8,2 тн, що вище за граничне навантаження зразка Б1 (еталонного зразка); це перевищення становить 2700 кг. Вид посиленої балки Б5 після випробування показаний на рисунку 3.26.

При $\sigma_т$ =42,8 в теоретических исследованиях образца Б5 максимальная нагрузка P_{max} = 70,9 кН/см^2, что в свою очередь оказалась меньше чем при практических испытаниях в которых P_{max} = 82,5 кН/см^2.

Висновок: навантаження при практичному випробуванні еталонного зразка балки Б5 приблизно збігається з теоретичними розрахунками, різниця між теоретичним та практичним випробуванням становить менше 13%.



Рисунок 3.26 - Вид посиленої балки Б5 після випробування

3.7 Висновки за третім розділом

В результаті проведених випробувань отримана інформація про те, що найбільш ефективно проводити посилення балок, завантажених по верхньому поясу, за допомогою смуг 100х10 і куточків 75х6 симетрично, що приварюються з двох сторін стінки. Таке посилення підвищує здатність балки, що несе:

- підсилення зразка Б4 двома смугами 100х10 дало збільшення 47%;
- підсилення зразка Б5 двома куточками L75X6 дало збільшення 49%.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1) При грамотному посиленні металевих конструкцій можна отримати необхідні показники та підібрати максимально просту та ефективну схему виконання виробничих робіт.

2) У процесі експлуатації будівель та споруд найчастіше виникають ситуації, що вимагають посилення металевих балок та ригелів. Визначальними показниками роботи балкового елемента є міцність та жорсткість.Завдяки грамотному проведенню робіт з посилення можна значно заощадити кошти та збільшити термін служби конструкцій.

3) У разі розташування плит на верхніх поясах з технологічних причин неможливе прикріплення до поясів елементів посилення. У разі розташування плит на верхніх поясах можливе несиметричне та симетричне посилення.

4) При посиленні двотаврів слід йти шляхом збільшення жорсткості при згинанні. Несиметричне посилення недостатньо ефективно: збільшення несучої здатності зразка, посиленого смугою, прикріпленої до нижньої полиці становило близько 16%. Більше збільшення несучої здатності дає симетричне посилення, зокрема: - посилення зразка двома смугами 100х10, прикріпленими до стінці, дало збільшення 47%; - Підсилення зразка двома куточками L75X6, прикріпленими до стінки, дало збільшення 49%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Підсилення конструкцій та будівель: Навч. посібник / А.М. Плугін, С.В.Мірошніченко, І.Г.Корнієнко та ін.; За ред. А.М.Плугіна. Харків: УкрДАЗТ, 2012. Ч.1. 198с.

2. Прядко М. В. Обстеження та підсилення будівельних конструкцій промислових будівель : навч. посіб. для студентів спец. 192 "Будівництво та цивільна інженерія", галузі знань 19 "Архітектура та будівництво" усіх форм навчання / Микола Володимирович Прядко, Ірина Миколаївна Руднєва, Юрій Миколайович Прядко ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. ; за заг. ред. Микола Володимирович Прядко. Київ : КНУБА, 2018. 331 с.

3. Мешічек В.В., Ройтман А.Г. Капітальний ремонт, модернізація та реконструкція житлових будинків: навч. посібник. Київ: СІ, 2005.241 с.

4. Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд: навч. посіб. Львів: Видавництво Національного університету» Львівська політехніка», 2008.108с.

5. Pichugin S.F. Accidents features in construction / S.F. Pichugin, L.A. Klochko // Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Полтава : ПолтНТУ, 2019. Т. 1 (52). С. 91-101.

6. Підсилення конструкцій та будівель: Навч. посібник /. А.М. Плугін, С.В.Мірошніченко, І.Г.Корнієнко та ін.; За ред. А.М.Плугіна. Харків: УкрДАЗТ, 2012. 207 с.

7. Лівінський О. М., Хоменко О.Г., Терещук М. О., Любченко І.Г., Ратушняк Г. С., Єсипенко А. Д.. Металеві конструкції . Підручник для студентів вищих навчальних закладів**.** Київ : «МП Леся», 2018. 306 с.

8. ДСТУ Б В.2.6-199:2014 Конструкції сталеві будівельні. Вимоги до виготовлення.

9. ДСТУ ISO 4287:2012 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури (ISO 4287:1997, IDT + ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT +

ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT). З поправками.

10. ДСТУ 9273:2024 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість

11. ДСТУ 8768:2018 Двотаври сталеві гарячекатані. Сортамент

12. ДСТУ EN 10034:2006 Двотаври сталеві нормальні та широкополичні з паралельними гранями полиць. Допуски на розміри й форму (EN 10034:1993, IDT)

13. ДСТУ ISO/TR 25901-1:2024 Зварювання та споріднені процеси. Словник термінів. Частина 1. Загальні терміни (ISO/TR 25901-1:2016, IDT)

14. Савйовський В. В. Реконструкція будівель і споруд: навч. посіб. Київ: Видавництво Ліра-К, 2019. 320 с.

15. Валовой О.І.,.Еременко О.Ю. Вплив полімерних матеріалів на напружно-деформований стан зони контакту при підсиленні конструкцій нарощуванням. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць. Рівне: 2008. Вип. 17. С. 411 – 417.

16. Семко О. В. До аналізу ризиків помилкової діагностики при обстеженні несучих будівельних конструкцій / О. В. Семко, О. П. Воскобійник// Сб. науч. труд.: Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Дніпро, ПГАСА, 2008. № 47. С. 573–578.

17. Інкін О.В. Іженерні споруди : навч. посіб. / О.В. Інкін ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП»,2021. 219 с.

18. ДСТУ-Н Б А.3.1-16:2013 Настанова щодо виконання зварювальних робіт при монтажі будівельних конструкцій

19. Савйовський В.В., Броневицький А.П. Реконструкція промислових будівель при їх ревіталізації. Нові технології в будівництві. №27-28, 2014. С.33-36.

20. Стороженко Л.І. Металеві конструкції: Навч. посібник / Л.І. Стороженко, В.А. Пашинський, С.Ф. Пічугін, Г.М. Трусов. Київ: НМК ВО,

1992. 172 с.

21. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник / [П. І. Стоєв, С. В. Литовченко, І. О. Гірка, В. Т. Грицина]. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с.

22. Конкін В.М. Розрахунки на міцність та жорсткість при згинанні:[Навчально-методичний посібник] / В.М. Конкін, Б.М. Киркач, С.Ю. Погорілов,Н.В. Кравцова. Харків: НТУ «ХПІ», 2003. 80 с.

23. Тищенко О.М., Поздєєв С.В., Шналь Т.М., Рудешко І.В., Сідней С.О., Березовський А.І. Розрахунок сталевих конструкцій будівель і споруд згідно Єврокоду 3 і національних додатків України: Навчальний посібник // Тищенко О.М., Поздєєв С.В., Шналь Т.М., Рудешко І.В., Сідней С.О., Березовський А.І. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. 171с.

24. Будівельні конструкції: навчальний посібник / авт.. кол. Т.М. Пащенко, О.О. Сліпич, І.Б. Дремова Київ : ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2015. 310 с.

25. Пермяков В.О., Нілов О.О., Шимановський О.В. і др. Металеві конструкції: Підручник / Під загальною редакцією В.О. Пермякова та О.В. Шимановського. Київ: Видавництво «Сталь», 2008. 812 с

26. Барабаш М.С., Козлов С.В., Медведенко Д.В. Комп’ютерні технології проектування металевих конструкцій. Київ: НАУ, 2012. 572 с.

27. Шингера Н. Статистична оцінка властивостей сталі ВСт3пс на ділянці термічного впливу від зварного шва / Н. Шингера, Я. Ковальчук // XIV наук. конф.Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 27–28 жовт. 2010р. : тези доп. Тернопіль, 2010. С. 59.

28. Отрош, Ю.А. Комплекс взаємопов'язаних заходів щодо визначення параметрів напружено-деформованого і технічного стану конструкцій при різних впливах [Текст] / Ю.А. Отрош, А.П. Іванов, О.І. Голоднов // Зб. наук. праць Укр- ін-ту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. Київ : Вид-во «Сталь», 2011. Вип. 8. С. 98-109.

29. Гілодо О.Ю. Металеві конструкції у питаннях та відповідях : навчальнийпосібник / О. Ю. Гілодо. Одеса : Астропринт, 2019. 120 с.

30. Барабаш М. С. Вплив закритичних навантажень на несучу здатністьвисотної будівлі/ М. С. Барабаш, М. А. Ромашкіна, Т. С. Башинська //116 Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 28-29 квітня 2015р: АВІА-2015. Т.4. Київ: НАУ, 2015. С. 25.60 – 25.63.

31. ДСТУ EN ISO 9692-1:2014 Зварювання та споріднені процеси. Рекомендації щодо підготування зварних з'єднань. Частина 1. Ручне дугове зварювання, зварювання в захисному газі, газове зварювання, TIG - зварювання та променеве зварювання сталей (EN ISO 9692-1:2013, IDT).

32. Малишев О. М. Технічне обстеження та нагляд за безпечною експлуатацією будівель та інженерних споруд : навч. посібник / О. М. Малишев, В. Д. Віроцький, О. О. Нілов. Київ : ДП «Головний навчально-методичний центр», 2007. 708 с.

33. Купченко Ю.В. Ефективні особливості підсилення сталевої ферми комбінованимспособом / Ю.В. Купченко, П.М. Сінгаївський, О.В. Лесечко // Збірник наукових праць «Сучасні будівельні конструкції з металу і деревини». – Вип. 22: Одеса: ОДАБА, «Зовнішрекламсервіс», 2018. С. 24-27.

34. Стан та залишковий ресурс фонду будівельних металевих конструкцій в Україні / [А.В. Перельмутер, В.М. Гордєєв, Є.В. Горохов та ін.] ; під ред. А.В. Перельмутера. Київ : Сталь, 2002. 166 с.

35. Єрмак З.Є. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з підсилення несучих елементів будівель при реконструкції металевих конструкцій (для студентів 4-5 курсів денної форми навчання спеціальностей ПЦБ, МБГ і ТОРіРБ). Харків: ХДАМГ, 2002. 61 с.

36. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі Зміною № 1

37. Пичугин С.Ф. Ветровая нагрузка на строительные конструкции /С.Ф. Пичугин, А.В. Махинько. Полтава, 2005. 342 с.

38. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки

будівельних об`єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі Змінами № 1 та № 2.

39.ДСТУ Б В.3.1-2:2016 Ремонт і підсилення несучих і огороджувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд

40. Семко О. В. Імовірнісні аспекти розрахунку стале залізобетонних конструкцій: монографія / Олександр Володимирович Семко Полтава: ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2004. 320 с.

41. К. Ф. Калафат, А. С. Білик, М. А. Біляєв, Е. А. Ковалевська Розрахунок сталевих конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 3. Практичний посібник до ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010, Київ, УЦСБ, 2016, 79с.

42. ДСТУ EN 10219-1:2009 Профілі порожнисті зварні холодного формування з нелегованих і дрібнозернистих сталей для конструкцій. Ч.1

43. ДСТУ EN 10025-1:2007 Вироби гарячекатані із конструкційної сталі. Ч.1 Технічні умови постачання (EN 10025-1:2004, IDT); Технічні умови постачання (EN 10219-1:2006, IDT);

44. ДСТУ Б В.1.2-3:2006 Прогини і переміщення. Вимоги проектування

45. Методика обстеження будівель та споруд, пошкоджених внаслідок надзвичайних ситуацій, бойових дій та терористичних актів (Наказ Міністерства розвитку громад та територій України №65 від 28.04.2022р.).

46. Kaczarowski F., Kalisz H. Stosowanie betonow natryskowych w robotach remontowych. Inzynieria i Budownictwo, 6 ,1993. P. 222 – 224.

47.Belytscko, T., Liu, W., Moran, B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. J Wiley & Sons, 2000. ISBN 0-948-749-261.

48. Bonet, J., Wood, R. Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis. Cambridge University Press, 1997. ISBN 0-521-57272-X.

49. Chryssaphinou, O. Multi-state reliability systems under discrete time semi-Markovian hypothesis [Text] /O. Chryssaphinou, N. Limnios, S. Malefaki //IEEE Trans. on Reliability. 2013. Vol. 60, № 1. P. 80–87.

50. Strengthening Techniques of Steel Structure: An Overview Md.

Mofizul Islam, Rubieyat Bin Ali, Moushtakim Billah Department of Civil Engineering, Bangladesh University of Engineering & Technology, Dhaka - 1000, Bangladesh, January 2019, 13 p. URL: http://www.worldscientificnews.com/wp-content/uploads/2018/11/WSN-118-2019-181-193.pdf (дата звернення: 01.10.24)

51. Strengthening Techniques: Code-Deficient Steel Buildings, Konstantinos Daniel Tsavdaridis / Published In book: Encyclopedia of Earthquake Engineering, August,2015. 26p. URL: https://www.researchgate.net/publication/266851226_Strengthening_Techniques_Code-Deficient_Steel_Buildings (дата звернення: 10.12.24)

52. Savyovsky, V., Solovey, D., Ovchinnikov, O., Gres, I. (2016). Technological features of the replacement of floors in specific reconstruction conditions. Urban planning and territorial planning. Issue 59, P.389-396.

53. arja A. Generalized lifetime state design of structures / A. Sarja // Proc. of the 2nd Intern. Conf., Lifetime-Oriented Design Concepts, ICDLOS. Germany: Ruhr-University Bochum, 2004. P. 51 − 60.

54. Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. EN 1994-1-2 (2005): Eurocode 4: Brussels. 2004, November. 109 p

55. Dai, X.H. A numerical study on the effect of concrete infill and intumescent coating to fire-resistant behaviour of stub elliptical steel hollow sections under axial compression / X.H. Dai, D. Lam // Advanced Steel Construction, 2014 Vol. 10, No. 3. pp. 310-324.