

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Національний університет «Запорізька політехніка»**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання курсового проекту  
з дисципліни

«Розрахунки та проектування зварних конструкцій»  
для студентів галузі знань 13 «Механічна інженерія» спеціальності  
131 Прикладна механіка  
освітньої програми «Технології та устаткування зварювання»  
усіх форм навчання

2021

Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Розрахунки та проектування зварних конструкцій» для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка освітньої програми «Технології та устаткування зварювання» усіх форм навчання / Укл. М.Ю. Осіпов, О.Є. Капустян. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 56 с.

Укладачі: Осіпов М.Ю., канд. техн. наук, доцент  
Капустян О.Є., канд. техн. наук, доцент

Рецензент: Куликовський Р.А., канд. техн. наук, доцент

Редактор: Аверченко І.П., ст. лаб.

Відповідальний за випуск:  
Осіпов М.Ю., канд. техн. наук, доцент

Затверджено  
на засіданні кафедри ОТЗВ  
Протокол №12 від 22.06.2021 р.

Рекомендовано  
до видання НМК ІФФ  
Протокол №10 від 23.06.2021 р.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	5
1 МЕТА І ЗАДАЧІ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ .....	6
2 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВИЙ ПРОЕКТ .....	6
3 ОРГАНІЗАЦІЙНІ ВКАЗІВКИ .....	7
4 ВІДОМОСТІ ЩОДО РОЗРАХУНКУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ .....	7
4.1 Загальні відомості про металоконструкції мостових кранів .....	7
4.2 Вибір матеріалу .....	9
4.2.1 Вимоги до основного матеріалу конструкції крану .....	9
4.2.2 Вимоги до зварювальних матеріалів .....	10
4.3 Методики розрахунку металевих конструкцій .....	11
4.3.1 Загальні положення розрахунку конструкції за граничними станами .....	11
4.3.2 Розрахунок конструкції за допустимими напруженнями .....	12
4.3.3 Розрахункові навантаження та їх комбінації .....	16
5 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РОЗРАХУНКУ ГОЛОВНОЇ БАЛКИ МОСТОВОГО КРАНУ .....	16
5.1 Визначення навантаження та їх комбінації .....	16
5.2 Визначення внутрішніх силових факторів за допомогою програмних засобів .....	19
5.3 Попередній вибір розмірів елементів перерізів головної балки .....	20
5.4 Визначення висоти основного перерізу балки з умов міцності .....	22
5.5 Визначення висоти основного перерізу балки з умов жорсткості .....	22
5.6. Розрахунок розмірів елементів перерізів головної балки .....	23
за допомогою комп'ютерній програми .....	23
5.7 Визначення висоти балки біля опори та довжини скосу .....	23
5.8 Визначення основних параметрів та розмірів перерізів .....	23
5.8.1 Основний переріз балки .....	23

5.8.2 Переріз балки біля опори.....	25
5.9 Визначення крутного моменту.....	26
5.10 Перевірка балки на міцність та жорсткість.....	27
5.10.1 Визначення напружень у небезпечному перерізі від різних комбінацій прикладених навантажень .....	27
5.10.2 Визначення дотичних напружень у небезпечному перерізі балки ....	28
5.10.3 Визначення еквівалентних напружень у небезпечному перерізі балки .....	28
5.10.4 Визначення напружень у перерізі біля опори.....	29
5.10.5 Визначення прогину балки .....	30
5.11 Перевірка загальної стійкості балки.....	30
5.12 Перевірка місцевої стійкості елементів балки .....	31
5.13 Визначення розмірів діафрагм .....	38
5.14 Вибір профілю перерізу й розмірів поздовжнього ребра жорсткості...41	
5.15 Розрахунок міцності зварних з'єднань.....	42
5.16 Визначення ваги металоконструкції.....	45
5.17 Висновки .....	46
<b>6 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ І ЗАХИСТУ КП .....</b>	<b>46</b>
6.1 Вимоги до оформлення курсового проекту .....	46
6.2 Захист проекту.....	47
<b>РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>48</b>
Додаток А Завдання до курсового проекту РПЗК .....	50
Додаток Б Календарний план.....	54
Додаток В Титульний аркуш.....	55
Додаток Г Аркуш завдання.....	56

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Висота балки, см	$H$
Довжина балки, см	$L$
Прогин балки, см	$f$
Допустимий прогин балки, см	$[f]$
Висота вертикальної стінки балки, см	$H_0$
Товщина вертикальної стінки балки, см	$\delta_2$
Ширина поясних листів балки (ширина поясів), см	$B$
Товщина поясних листів балки, см	$\delta_1$
Площа перерізу верхнього та нижнього поясів, см <sup>2</sup>	$F_1$
Площа перерізу вертикальних стінок, см <sup>2</sup>	$F_2$
Площа всього перерізу, см <sup>2</sup>	$F$
Момент інерції поясів відносно осі $X - X$ , см <sup>4</sup>	$I_{x1}$
Момент інерції стінок відносно осі $X - X$ , см <sup>4</sup>	$I_{x2}$
Загальний момент інерції перерізу, см <sup>4</sup>	$I_x$
Момент опору перерізу відносно осі $X - X$ , см <sup>3</sup>	$W_x$
Момент інерції поясів відносно осі $Y - Y$ , см <sup>4</sup>	$I_{y1}$
Момент інерції стінок відносно осі $Y - Y$ , см <sup>4</sup>	$I_{y2}$
Загальний момент інерції відносно осі $Y - Y$ , см <sup>4</sup>	$I_y$
Момент опору перерізу відносно осі $Y - Y$ , см <sup>3</sup>	$W_y$
Статичний момент перерізу відносно осі, см <sup>3</sup>	$S_x$
Момент у небезпечному перерізі, Н·м	$M$
Перерізувача сила у небезпечному перерізі, Н	$Q$
Максимальна перерізувача сила, Н	$Q_{max}$
Нормальні напруження у небезпечному перерізі, МПа	$\sigma_x$
Дотичні (зрізуючі) напруження у небезпечному перерізі, МПа	$\tau_1$
Еквівалентні напруження у небезпечному перерізі, МПа	$\sigma_{екв.}$
Напруження зминання, МПа	$\sigma_{зм}$
Допустимі нормальні напруження основного металу, МПа	$[\sigma]$
Допустимі дотичні напруження основного металу, МПа	$[\tau]$
Модуль пружності (модуль Юнга), МПа	$E$
Розрахунковий опір сталі, МПа	$R$
Відстань між великими діафрагмами, см	$a_1$

## 1 МЕТА І ЗАДАЧІ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

**Метою** виконання курсового проекту з дисципліни «Розрахунки та проектування зварних конструкцій» є формування у студентів базових теоретичних знань та практичних навичок з розрахунку при проектуванні зварних конструкцій.

**Основною задачею** при виконанні даного курсового проекту є вивчення і застосування основних методів і принципів інженерних розрахунків зварних конструкцій, що проектуються.

Курсовий проект по розрахунку зварних конструкції сприяє закріпленню, поглибленню і узагальненню студентами знань, отриманих зі зварювальних дисциплін, а також використання цих знань для комплексного розв'язування інженерних задач по проектуванню зварних конструкцій.

Курсове проектування має велике значення у розвитку практичних навичок самостійної творчої роботи студентів, виховує відповідальність за виконану роботу, прищеплює навички науково-дослідницької роботи, раціоналізації, винахідливості.

З метою полегшення роботи студентів при виконанні курсового проекту у даних методичних вказівках наводяться основні принципи та правила проектування кранових металоконструкцій, які використовуються у зварному варіанті, а також надаються вказівки відносно вибору матеріалу конструкції, техніки розрахунку з використанням ПК, оформлення пояснювальної записки та креслень. Дані методичні вказівки можуть знайти використання при виконанні розрахунків у дипломному проектуванні.

## 2 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВИЙ ПРОЕКТ

Завдання на курсовий проект (Додаток А) розроблені керівником проекту.

Виріб, що зварюється представляє собою головну балку мостового крана.

## **3 ОРГАНІЗАЦІЙНІ ВКАЗІВКИ**

Над виконанням курсового проекту слід працювати систематично на протязі усього семестру, згідно календарного плану з визначеними термінами виконання етапів проекту (Додаток Б).

На початковому етапі роботи над курсовим проектом особливо важливими є розділи щодо визначення силових факторів (згинальних моментів та поперечних перерізуючих сил) і геометричних розмірів елементів перетину головної балки, які визначаються за допомогою спеціально розробленої комп'ютерної розрахункової програми (BEAM.EXE), яка знаходиться на кафедрі ОТЗВ.

Контроль за планомірністю роботи студента здійснює керівник.

## **4 ВІДОМОСТІ ЩОДО РОЗРАХУНКУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

### **4.1 Загальні відомості про металоконструкції мостових кранів**

Мостові крани (рис. 4.1) головним чином призначені для обслуговування цехів та складів виробничих підприємств. Вони представляють собою рухома прольотна конструкція з візком, який рухається вздовж неї і несе підйомний механізм. Двобалочний мостовий кран, який складається з двох головних балок або ферм, переміщується вздовж укладених на колонах підкранових колій.

Крани загального призначення встановлюються з нормальною та збільшеною висотою підйому, м'якого та середнього режиму роботи.

Крани більшої вантажопідйомності загального призначення виготовляються згідно із стандартом підприємства. Швидкість руху крана залежить від режиму роботи.

Основні вузли несучої частини металоконструкцій мостів [2]: головні прольотні балки, кінцеві балки, вузол з'єднання головних і кінцевих балок. Для підвищення жорсткості встановлюються горизонтальні ребра жорсткості та діафрагми (рис. 4.2).

Коробчасті балки, які складаються з листів, мають ряд переваг.

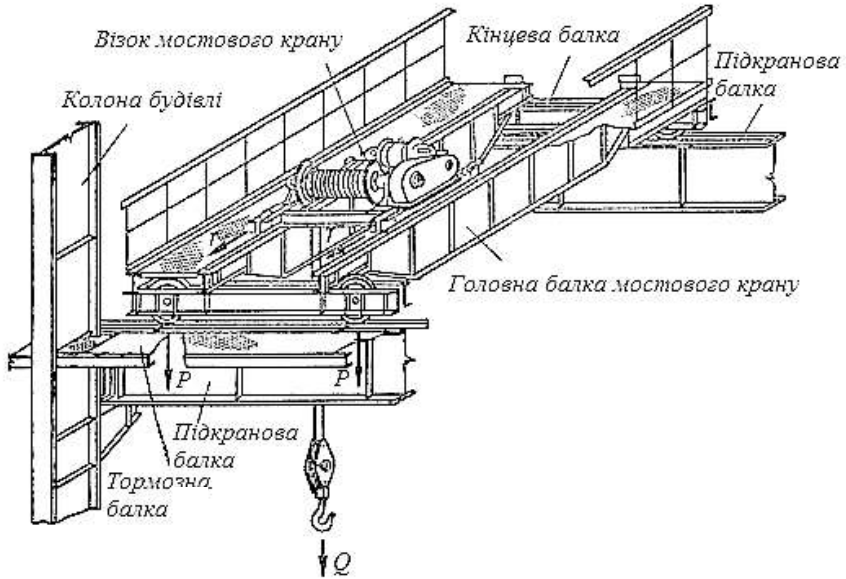
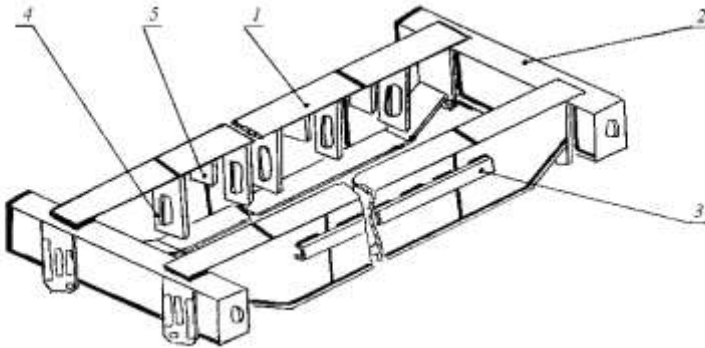


Рисунок 4.1 – Вузли і механізми мостового крану



1 – головна балка, 2 – кінцева балка, 3 – поздовжнє ребро жорсткості,  
4 – діафрагма велика, 5 – діафрагма мала

Рисунок 4.2 – Металоконструкція моста крану

Ця конструкція менш трудомістка у виготовленні, тому що правлення, розмічання, різання листів, стикові з'єднання листів вертикальних стінок і горизонтальних поясів легко виконуються за допомогою автоматичного зварювання. При цьому легше досягається умова рівномірності металу шва основному металу. Такі конструкції

добре чинять опір змінним (пульсуючим) та знакозмінним навантаженням. Для поясних швів, які мають велику протяжність, доцільно використовувати автоматичне зварювання під шаром флюсу.

Одним з недоліків кранових балок коробчастого перерізу є їх порівняно велика маса при прольотах більш 20 м і відносно малих вантажопідйомностях 50 і 100 кН [2].

## **4.2 Вибір матеріалу**

Вибір матеріалу – важливий етап проектування металоконструкції, тому що він впливає як на експлуатаційні властивості конструкції, так і на масу і екологічність виготовлення. Тому матеріал вибирають з урахуванням характеру експлуатаційних навантажень (втомленості, ударних, статичних), роботи конструкції в умовах низьких та високих температур, агресивних середовищ тощо. Крім цього, при виборі матеріалу враховують комплекс умов, первинні витрати на матеріал, технологічну обробку, проведення зварювальних робіт тощо.

### **4.2.1 Вимоги до основного матеріалу конструкції крану**

При виборі матеріалу для кранових металоконструкцій керуються наступними основними правилами [3, 4]:

- забезпечення необхідної міцності та жорсткості при найменших витратах на виготовлення, з урахуванням максимальної економії метала;
- гарантована умова якісної зварюваності при мінімальній знеміцнюваності і зниженні пластичності у зонах зварних з'єднань;
- забезпечення надійності експлуатації конструкції при заданих статичних, динамічних і навантажень від втомленості, агресивних середовищах і змінних температурах.

Більшість зварних конструкцій виготовляється з низьковуглецевих сталей, що випускаються у вигляді листів і фасонного прокату (сортаменту) – кутик, швелер, двотавр, тавр та ін.

Хімічний склад і механічні властивості вуглецевих сталей наведено у [5].

У металоконструкціях підйомно-транспортних машин використовуються мартенівські прокатні та низьколеговані сталі.

Найбільш розповсюджена у підйомно-транспортних машинах серед вуглецевих сталей – сталь Ст3 з обмеженим вмістом вуглецю, сірки та фосфору. Цю сталь використовують для несучих елементів металоконструкцій. Киплячу сталь Ст3кп не рекомендується використовувати для робочих елементів мостових конструкцій, особливо які працюють при температурах нижче  $-20^{\circ}\text{C}$ . Обмеження по вуглецю, сірці та фосфору пов'язано з поліпшенням зварюваності та забезпеченням пластичності матеріалу при знижених температурах.

Для конструкцій більшої вантажопідйомності можуть бути використані низьколеговані сталі 10ХСНД, 10Г2СД, 15ХСНД, 09Г2С тощо. Застосування низьколегованих низьковуглецевих сталей в зварних конструкціях безперервно розширюється. Основні переваги низьколегованих сталей [3]: підвищені опір корозії, межі міцності і текучості при збереженні достатньої пластичності та зварюваності менша чутливість до концентрації напружень.

#### **4.2.2 Вимоги до зварювальних матеріалів**

Основна вимога до зварювальних матеріалів – забезпечення механічних властивостей зварного шва близьких аналогічним властивостям основного металу зварної конструкції.

Характеристики електродів для зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей наведені у табл. 4.1.

Для зварювання низьковуглецевих сталей застосовують електроди з рутиловим, фтористо-кальцієвим, рудно-кислим та органічним покриттями. Рід струму, полярність і величину струму вибирають відповідно до типу покриття, товщини металу, типу шва і діаметра електрода.

При достатньо великому різноманітті зварювальних матеріалів можливе забезпечення необхідних властивостей металу шва для усіх марок сталі, які використовуються у металоконструкціях.

Таблиця 4.1 – Міцність металу шва і зварного з'єднання у залежності від типу електродів, які використовуються [5]

Тип електрода	Матеріал шва		Зварне з'єднання		
	Межа міцності, $\sigma_B$ , МПа	Відносне подовження, $\delta_5$ , %	Межа міцності, $\sigma_B$ , МПа	Ударна в'язкість, КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Кут загину, $\alpha$ , град.
E42	420	18	420	80	120
E42A	420	22	420	140	180
E46	460	18	460	80	120
E46A	460	22	460	140	150
E50	500	16	500	60	90
E50A	500	20	500	130	150
E55	550	20	550	120	140

Використання існуючих марок електродного дроту і відповідних флюсів при автоматичному зварюванні забезпечує властивості металу шва і зварного з'єднання, які вказані для типів електродів з індексом А.

### 4.3 Методики розрахунку металевих конструкцій

У практиці кранобудування знаходять використання два методи розрахунку металевих конструкцій [6]:

- за методом граничних станів, який базується на статичному вивченні дійсної працездатності конструкції в умовах експлуатації;
- за методом допустимих напружень, який базується на встановлених практикою коефіцієнтах запасу міцності [6].

#### 4.3.1 Загальні положення розрахунку конструкції за граничними станами

Під граничним станом розуміють стан конструкції, при якому вона перестає задовольняти експлуатаційним вимогам, які до неї пред'являються, тобто перестає чинити опір зовнішнім діям (по несучій здатності), або отримує недопустимі деформації, або місцеві пошкодження.

Існує декілька станів, які обмежують можливість нормальної експлуатації конструкцій.

Звичайні зварні конструкції розраховуються по першому граничному стану, тобто несучій здатності (міцності, стійкості або витривалості). При проектуванні конструкцій умова міцності по першому граничному стану розраховується таким чином:

$$\frac{N}{F} \leq R, \quad (4.1)$$

$$R = \frac{\sigma_T}{k_H},$$

$$k_H = \frac{n}{k \cdot m},$$

де  $N$  – розрахункове зусилля у конструкції від суми впливу розрахункових навантажень, Н;

$F$  – геометрична характеристика перерізу (площа, момент опору і т. п.), см<sup>2</sup>;

$R$  – розрахунковий опір матеріалу, МПа. Його часто можна знайти в довідковій літературі, наприклад у [8];

$\sigma_T$  – межа текучості, МПа;

$k_H$  – коефіцієнт надійності (або запасу міцності);

$n$  – коефіцієнт перевантаження;

$k$  – коефіцієнт однорідності металу;

$m$  – коефіцієнт умов роботи.

Перехід від нормативних величин до розрахункових виконується з урахуванням коефіцієнтів перевантаження і коефіцієнта умов роботи [7].

#### 4.3.2 Розрахунок конструкції за допустимими напруженнями

При розрахунку конструкцій за допустимими напруженнями умова міцності має вигляд:

$$\sigma \leq [\sigma], \quad (4.2)$$

де  $\sigma$  – напруження в небезпечному перетині елементу, МПа;  
 $[\sigma]$  – допустимі напруження, МПа.

Допустимі напруження встановлюються в залежності від таких факторів:

- властивостей матеріалів;
- ступеню точності розрахунку;
- виду зусиль (розтягнення, стиснення й т. ін.);
- характеру навантаження.

Допустимі напруження при розтягуванні  $[\sigma]_P$  зазвичай називаються **основними**. Напруження, що допускаються, при інших видах зусиль (стиск, вигин, зріз) визначають, як похідні від  $[\sigma]_P$ .

У машинобудуванні в конструкціях, що працюють під статичними навантаженнями, в більшості випадків допустимі напруження, призначаються в залежності від межі текучості  $\sigma_T$  і визначаються відношенням:

$$[\sigma]_P = \frac{\sigma_T}{k_1}, \quad (k_1 = 1,4 \dots 1,6),$$

в окремих випадках – залежно від межі міцності –  $\sigma_B$ :

$$[\sigma]_P = \frac{\sigma_B}{k_2}, \quad (k_2 = 2,0 \dots 2,4),$$

де  $k_1$  і  $k_2$  – коефіцієнти запасу міцності.

Прийоми розрахунку за граничним станом і допустимими напруженнями формально збігаються, так як величину  $R$  в правій частині нерівності (4.1) можна прийняти за допустиме напруження, як і у формулі (4.2). Однак при розрахунку конструкцій за граничним станом загальний і незмінний коефіцієнт запасу міцності замінюється декількома змінними величинами. Це дозволяє при розрахунку за граничним станом проектувати експлуатаційно рівномічні металеві конструкції.

Допустимі нормальні напруження можуть бути задані цифровими значеннями і визначаються у залежності від розрахункової комбінації навантажень, режиму роботи конструкції та марки сталі (табл. 4.2). Дотичні допустимі напруження основного металу  $[\tau]$

визначаються за формулою:

$$[\tau] = 0,6[\sigma].$$

Таблиця 4.2 – Допустимі нормальні напруження  $[\sigma]$  для деяких марок сталей, МПа [6]

Марка сталі	Режим роботи крану			
	Легкий, середній		Важкий, дуже важкий	
	Комбінація навантажень (рис. 4.1)			
	А	Б	А	Б
Ст3	160	180	140	170
10ХСНД	230	265	205	250
15ХСНД	230	265	205	250

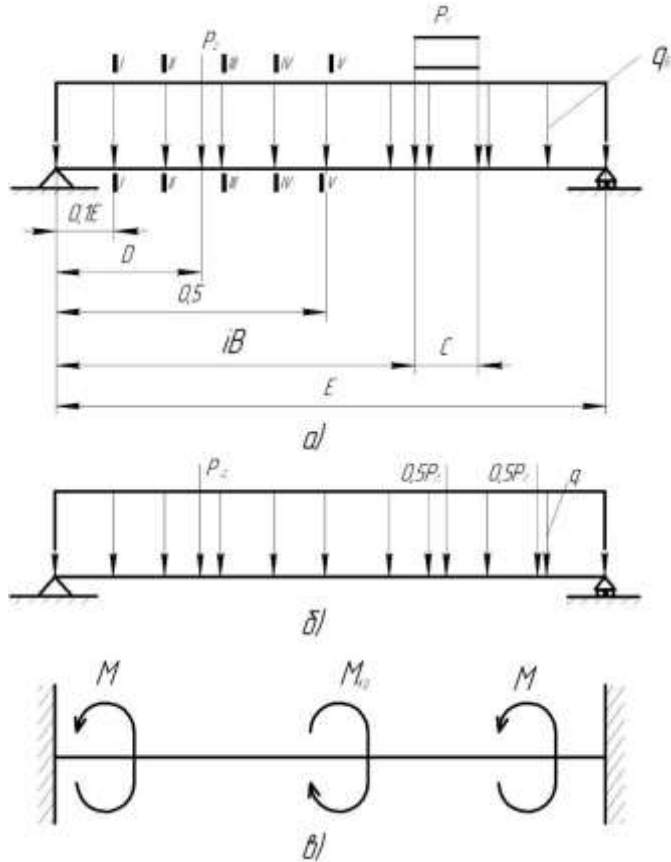
Примітка 1. А – кран нерухомий (працює тільки підйомний механізм), виконується підйом вантажу від основи або його гальмування при спусканні (рис. 4.1 а), – інерційні навантаження у горизонтальній площині, які виникають при гальмуванні моста **відсутні!**

Примітка 2. Б – кран з вантажем знаходиться у русі, причому відбувається гальмування або розгін одного з механізмів (рис. 4.1 а, б).

Допустимі напруження в швах  $[\sigma]'$  і  $[\tau]'$  машинобудівних конструкцій встановлюються в залежності від допустимих напружень основного металу з урахуванням виду шва, роду зусиль і належного підбору присадочного матеріалу – електродів, електродного дроту, флюсів (табл. 4.3). Це положення дозволяє проектувати зварні з'єднання, також рівномічні основному металу.

Таблиця 4.3 – Допустимі напруження  $[\sigma]'$  і  $[\tau]'$  для металу зварних швів [8]

Вид шва	Рід зусиль	Зварювання автоматичне, напівавтоматичне, ручне електродами Е42А, Е50А	Зварювання ручне електродами Е42, Е50
Стиковий	Розтягування	$[\sigma]'_p = [\sigma]_p$	$[\sigma]'_p = 0,9[\sigma]_p$
	Стиснення	$[\sigma]'_c = [\sigma]_c$	$[\sigma]'_c = [\sigma]_c$
	Зріз	$[\tau]' = 0,65[\sigma]_p$	$[\tau]' = 0,6[\sigma]_p$
Кутовий	Зріз	$[\tau]' = 0,65[\sigma]_p$	$[\tau]' = 0,6[\sigma]_p$



*a* – навантаження у вертикальній площині, *б* – навантаження у горизонтальній площині, *в* – скручувальний момент;

$P_1$  – рухоме навантаження, яке передається на рейку одним колесом при роботі крана з номінальним навантаженням;  $P_2$  – зосереджене навантаження від ваги кабіни з електроустаткуванням;  $P_{i1}$ ,  $P_{i2}$  – зосереджене поперечне інерційне навантаження у горизонтальній площині при гальмуванні моста від ваги кабіни та від ваги візка відповідно;  $q_B$  – рівномірно розподілене постійне навантаження по довжині прольоту моста від власної ваги моста і площадок, на яких розташовується відповідне устаткування (вали, підшипники, механізм переміщення крана тощо) [9] (кгс/см);  $q_i$  – розподілене поперечне інерційне навантаження у горизонтальній площині, яке виникає при гальмуванні моста;  $M$  – згинальний момент;  $M_{кр}$  – крутний момент;  $B$  – відстань між перерізами, см;  $C$  – база візка, см;  $D$  – відстань від опори до центру маси кабіни, см;  $E$  – довжина балки, яка дорівнює довжині прольоту, см.

Рисунок 4.1 – Схеми до розрахунку головної балки

### 4.3.3 Розрахункові навантаження та їх комбінації

З різноманітних видів навантажень, які діють на кран, можна виділити три основних розрахункових випадків [6]:

- номінальні навантаження робочого стану, які виникають при роботі у звичайних умовах експлуатації;
- максимальні навантаження робочого стану, які виникають при роботі у найбільш тяжких умовах експлуатації з номінальним вантажем;
- навантаження неробочого стану, які виникають при відсутності вантажу, але при наявності вітру під час неробочого стану крану.

Для металевих конструкцій типів кранів та їх елементів в залежності від умов експлуатації встановлюються розрахункові комбінації навантажень (рис. 4.1).

Розрахунковими навантаженнями для мостових кранів загального призначення є вертикальні постійні й рухомі, горизонтальні постійні й рухомі інерційні, а також скручувальні навантаження.

На головну балку зі сторони тролей не будуть діяти навантаження від ваги механізму переміщення й кабіни керування.

## 5 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РОЗРАХУНКУ ГОЛОВНОЇ БАЛКИ МОСТОВОГО КРАНУ

### 5.1 Визначення навантаження та їх комбінації

Розрахунковою повинна бути балка зі сторони механізму переміщення, тому що вона виявляється найбільш навантаженою, тоді:

$$q_B = (G_B + G_M) \frac{K_c}{L}, \quad (5.1)$$

$$G_B = \frac{G_{МК} - G_M - G_K}{2},$$

де  $G_B$  – вага половини металоконструкції кранового моста, кгс. Для кранів вантажопідйомністю 75-250 тс при визначенні  $G_B$  можна попередньо використати дані з табл. 5.1. При цьому необхідно

звернути увагу на те, що у таблиці наводиться вага мостів кранів ( $G_{МК}$ ) з механізмами переміщення ( $G_M$ ) і кабіною ( $G_K$ ), а у формулі (5.1) необхідно врахувати тільки  $\frac{1}{2}$  ваги металоконструкції моста крана;

$G_M$  – вага центрального вузла механізму переміщення крана, кгс. Визначається у залежності від вантажопідйомності  $G$  (тс) за співвідношенням [6]:

при  $G = 50/10$  і  $75/20$  тс –  $G_M = 2$  тс;

$G = 100/20$  і  $250/30$  тс –  $G_M = 2,7$  тс;

$K_C$  – коефіцієнт, який враховує поштовхи при русі крану [11]:

$K_C = 1,0$  при  $V_K \leq 1$  м/с;

$K_C = 1,1$  при  $1,0$  м/с  $< V_K < 1,5$  м/с;

$K_C = 1,2$  при  $1,5$  м/с  $< V_K < 3,0$  м/с.

$V_K$  – швидкість переміщення крану. Приймається в залежності від вантажопідйомності і режиму роботи крану [13];

$G_K$  – вага кабіни. Вага відчиненої кабіни керування мостового крану приймається 600...800 кгс, а зачиненої – 1000...1200 кгс; електроустаткування у кабіні 400...500 кгс [6];

$L$  – довжина прольоту крана, см.

Таблиця 5.1 – Вага мостів кранів ( $G_{МК}$ ) з механізмами переміщення ( $G_M$ ) і кабінами ( $G_K$ ) [10]

Вантажопідйомність, тс	Вага моста, тс при прольоті, м							
	13	16	19	22	25	28	31	33
75				75,6				
100	54,9		66,0	78,3	92,9	96,0	114,0	
125	55,4		68,8	82,0	92,6	97,8		
150	65,1	68,8	101,3	119,2		142,2		
200		97,5			137,2			
250						152,0		193,5

Якщо прийняти, що колеса візка однаково навантажені, рухоме навантаження  $P_1$  (рис. 4.1) визначається за формулою [9]:

$$P_1 = K_d \left( \frac{G}{4} + \frac{G_T}{4} \right), \quad (5.2)$$

де  $G_T$  – вага візка, для кранів вантажопідйомністю 75–250 тс (табл. 5.2);

$K_d$  – динамічний коефіцієнт, який враховує інерційні сили при

підйомі та опусканні вантажу;  $K_d = 1,1; 1,2; 1,3$  відповідно для легкого, середнього і важкого режиму роботи [9].

Таблиця 5.2 – Вага візка у залежності від вантажопідйомності, висоти підйому, режиму роботи [13]

G, тс	Вага візка $G_T$ , тс			
	Нормальна висота підйому (H)		Збільшена висота підйому (З)	
	Легкий режим роботи	Середній режим роботи	Легкий режим роботи	Середній режим роботи
80	35	38	38	41
100	38	41	42	45
125	39	43	44	46
160	60	65	65	70
200	66	70	70	75
250	71	73	78	80

Режим роботи крану в цілому та його металевих конструкцій визначається режимом роботи механізму головного підйому. Режим роботи механізму визначається сукупністю наступних факторів: коефіцієнтом використання номінальної вантажопідйомності крана; відносної тривалості вмикання механізму; кількістю часів роботи механізму за рік. Класифікацію вантажопідійомних машин з машинним приводом за режимами роботи наведено у роботі [6].

$P_2, q_i, P_{i1}, P_{i2}$  (рис. 4.1) визначаються за формулами [9]:

$$P_2 = K_c \cdot G_K, \quad (5.3)$$

$$q_i = 0,1 \cdot P_B, \quad (5.4)$$

$$P_{i1} = 0,1 \cdot G'_K, \quad (5.5)$$

$$P_{i2} = 0,1 \left( \frac{G_T + G}{4} \right), \quad (5.6)$$

де  $P_B$  – навантаження на ведучі колеса, кгс/см. Вважаючи, що кран має два привідних колеса, формула має вигляд:

$$P_B = \frac{G_B + G_M}{2L}, \quad (5.7)$$

де  $G'_K$  – навантаження на ведучі колеса від маси кабіни з електроустаткуванням, кгс. Враховуючи, що два колеса привідні:

$$G'_K = \frac{G_K}{2}. \quad (5.8)$$

Момент, який скручує головну балку, визначається після вибору розмірів елементів поперечного перерізу балки.

## 5.2 Визначення внутрішніх силових факторів за допомогою програмних засобів

Для розрахунку балки на міцність при наявності рухомих навантажень необхідно визначити внутрішні силові фактори не менш, ніж у п'яти рівновіддалених перерізах, які розташовані на половині довжини балки симетрично перерізу.

При розрахунку підкранових балок, мостових кранів, естакад, мостів та інших інженерних споруд на рухоме навантаження, а також у тих випадках, коли одну й ту саму конструкцію необхідно розрахувати на різні комбінації часових навантажень, для визначення внутрішніх силових факторів, які виникають у перерізах елементів, до тих пір найбільше використання знаходить спосіб побудовання ліній впливу.

Однак усякий графічний спосіб розрахунку, відрізняючись наочністю, при самому старанному виконанні графічних побудов допускає неточність у результатах.

Враховуючи це, визначення внутрішніх силових факторів (згинальних моментів і поперечних перерізуючих сил) у різних перерізах балки при навантаженні, яке рухається, рекомендується виконувати на ПК за програмою (BEAM.EXE).

Для програмного розрахунку вводяться такі значення для кранів будь-якої вантажопідйомності (рис. 4.1):

- В = 0,1Е; 0,2Е; 0,3Е; 0,4Е; 0,5Е – перерізи балки;

(Е = L – довжина балки)

- D = 2000...3000 мм [14];

- С = 3000 мм [15];

- R, M, Q – відповідно опорна реакція (кгс), згинальний момент (кгс·см), поперечна перерізуюча сила (кгс) у вертикальній площині;

- X, Y, Z – відповідно опорна реакція (кгс), згинальний момент (кгс·см), поперечна перерізуюча сила (кгс) у горизонтальній площині.

$$P1 = P_1; \quad P3 = P_{i1}; \quad A1 = q_B;$$

$$P2 = P_2; \quad P4 = P_{i2}; \quad A2 = q_i.$$

У програму необхідно ввести числові значення P1, P2, P3, P4, A1, A2, C, D, E відповідної розмірності величин.

Результати розрахунку слід надати у вигляді таблиці, яка отримана з розрахунку на ПК, з послідовним розшифруванням і наданням у вигляді табл. 5.3 (Додаток 1 до пояснювальної записки Курсового проекту).

Таблиця 5.3 – Значення силових факторів

№ пере- різу	Згинальний момент, кгс·см		Поперечна сила, кгс	
	у вертикальній площині, $M_B$	у горизонтальній площині, $M_T$	у вертикальній площині, $Q_B$	у горизонтальній площині, $Q_T$
0				
...				
5				

При роботі крана в режимі А (кран нерухомий) інерційні навантаження в горизонтальній площині відсутні ( $P_{i1} = P_{i2} = q_i = 0$ ), тому й згинальний момент і поперечна сила у горизонтальній площині відсутні.

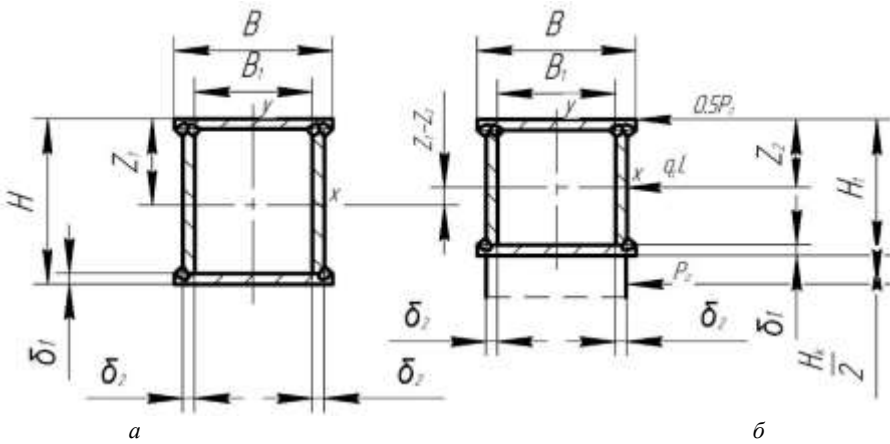
### 5.3 Попередній вибір розмірів елементів перерізів головної балки

При виборі товщини вертикальної стінки балки  $\delta_2$  (рис. 5.1) рекомендується при попередніх розрахунках приймати такі значення у залежності від вантажопідйомності крану [7]:

$$\begin{aligned} \text{при } G = 30 \dots 75 \text{ тс} & \quad \delta_2 = 8 \text{ мм;} \\ G = 75 \dots 200 \text{ тс} & \quad \delta_2 = 10 \text{ мм;} \\ G = 200 \dots 300 \text{ тс} & \quad \delta_2 = 12 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Товщина поясних листів балки  $\delta_1$  (рис. 5.1) повинна бути не менш 6 мм. З метою забезпечення місцевої стійкості поясів слід завжди приймати  $\delta_1 > \delta_2$ . При цьому для стиснених поясних листів повинні задовольнятися умови [7, 16]:

$$\frac{B_1}{\delta_1} \leq 90; \quad \frac{L}{B_1} \leq 60, \quad (5.9)$$



$B_1$  – відстань між вертикальними стінками балки;  $B$  - ширина балки;  $H$  - висота балки;  $H_1$  - висота балки біля опори;  $Z_1$  – половина висоти балки;  $Z_2$  – половина висоти балки біля опори;  $H_k$  – висота кабіни

$a$  – у середині прольоту (основний переріз);  $b$  – біля опори (опорний переріз)

Рисунок 5.1 – Поперечні перерізи головної балки моста

При розташуванні рейки по осі балки її ширина  $B$  (рис. 5.1) повинна задовольняти такій умові [9]:

$$B \geq \frac{L}{50}. \quad (5.10)$$

До кранових конструкцій пред'являються вимоги забезпечення міцності та жорсткості. При цьому висота балки є одним із головних розмірів її поперечного перерізу. Це виходить з того, що такі основні характеристики поперечного перерізу балки при згинанні, як момент опору і момент інерції, виражаються залежностями, у яких висота входить у другому і навіть у третьому ступені.

Від вибору висоти балки залежать її жорсткість, міцність та маса. Тому висота балки визначається з умов забезпечення необхідної жорсткості і міцності при мінімальній масі. При цьому слід мати на увазі, якщо у завданні на проектування немає додаткових вказівок, визначення першого є обов'язковим, тому що воно визначається вимогами технічних умов.

### 5.4 Визначення висоти основного перерізу балки з умов міцності

Висота балки  $H$  коробчастого профілю для середньої частини моста з умов міцності (найменшої маси) визначається за виразом [16]:

$$H = \sqrt{\frac{M}{\delta_2[\sigma]}}, \quad (5.11)$$

$$M = \sqrt{M_B^2 + M_T^2},$$

де  $M$  – максимальний сумарний згинальний момент від дії зосереджених сил та рівномірно розподіленого навантаження, (табл. 5.3);

$[\sigma]$  – допустиме напруження в небезпечному перерізі (табл. 4.2).

### 5.5 Визначення висоти основного перерізу балки з умов жорсткості

Висота балки з умов жорсткості визначається за формулою [7]:

$$H = \frac{5}{24} \frac{L^2[\sigma]}{E[f]}, \quad (5.12)$$

де  $E$  – модуль пружності (або модуль Юнга). Для вуглецевої сталі  $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,21 \cdot 10^6 \text{ МПа}$ );

$[f]$  – допустимий прогин [11], см. Визначається з норми жорсткості  $\frac{f}{L}$  в залежності від типу конструкції. Для балки крану:

$$[f] = \frac{L}{500} \cdots \frac{L}{700}. \quad (5.13)$$

Після визначення висоти балки з умов міцності та жорсткості у розрахунок приймається найбільше значення, але не менш, ніж з умови жорсткості.

## 5.6. Розрахунок розмірів елементів перерізів головної балки за допомогою комп'ютерній програми

Після визначення висоти балки  $H$  з попереднього розрахунку за допомогою спеціальної комп'ютерній програми визначаються остаточні розміри елементів перерізу головної балки мостового крану.

Маючи у пам'яті значення усіх вхідних величин, в тому числі і значення силових факторів (див. табл. 5.3), програма виконує розрахунки перерізів поясів та стінок.

Результати розрахунку машина виводить на екран у вигляді табл. 5.4. Згідно з якими потрібно виконувати всі наступні розрахунки.

Таблиця 5.4 – Геометричні розміри елементів перерізу головної балки, см

Стінка	Висота ( $H_0$ )	
	Товщина ( $\delta_2$ )	
Пояс	Ширина ( $B$ )	
	Товщина ( $\delta_1$ )	

## 5.7 Визначення висоти балки біля опори та довжини скосу

Висота балки  $H_1$  (рис. 5.1) та довжина скосу  $L_c$  у місці приєднання головної балки до кінцевої приймається у таких межах [9]:

$$H_1 = (0,6 \dots 0,7)H . \quad (5.14)$$

$$L_c = (0,1 \dots 0,2)L. \quad (5.15)$$

## 5.8 Визначення основних параметрів та розмірів перерізів

### 5.8.1 Основний переріз балки

Площа перерізу верхнього та нижнього поясів (рис. 5.1 а), см<sup>2</sup>:

$$2F_1 = 2B \cdot \delta_1. \quad (5.16)$$

Площа перерізу вертикальних стінок,  $\text{см}^2$ :

$$2F_2 = 2(H - 2\delta_1)\delta_2 . \quad (5.17)$$

Площа всього перерізу,  $\text{см}^2$ :

$$F = 2F_1 + 2F_2 . \quad (5.18)$$

Момент інерції перерізів відносно осі X – X (рис. 5.1 a),  $\text{см}^4$ :

- поясів:

$$I_{x1} = 2 \left[ \frac{B\delta_1^3}{12} + F_1 \left( Z_1 - \delta_1 + \frac{\delta_1}{2} \right)^2 \right] , \quad (5.19)$$

- стінок:

$$I_{x2} = 2 \left[ \frac{\delta_2(H-2\delta_1)^3}{12} \right] . \quad (5.20)$$

Загальний момент інерції перерізу відносно осі X–X (рис. 5.1a):

$$I_x = I_{x1} + I_{x2} . \quad (5.21)$$

Момент опору перерізу відносно осі X – X (рис. 5.1a),  $\text{см}^3$ :

$$W_x = \frac{I_x}{Z_1} . \quad (5.22)$$

Геометричні характеристики перерізу відносно осі Y–Y ( $I_y$  і  $W_y$ ) визначається для випадку комбінації навантажень Б (розділ 4).

Момент інерції перерізу відносно осі Y–Y (рис. 5.1a),  $\text{см}^4$ :

- поясів:

$$I_{y1} = 2 \frac{\delta_1 B^3}{12} , \quad (5.23)$$

- стінок:

$$I_{y2} = 2 \left[ \frac{(H-2\delta_1)\delta_2^3}{12} + F_2 \left( \frac{B_1}{2} + \delta_2 - \frac{\delta_2}{2} \right)^2 \right]. \quad (5.24)$$

Загальний момент інерції перерізів відносно осі Y–Y (рис. 5.1 а):

$$I_y = I_{y1} + I_{y2}. \quad (5.25)$$

Момент опору перерізу відносно осі Y–Y (рис. 5.1 а), см<sup>3</sup>:

$$W_y = 2 \frac{I_y}{B}. \quad (5.26)$$

### 5.8.2 Переріз балки біля опори

Площа перерізу верхнього та нижнього поясів (рис. 5.1 б), см<sup>2</sup>:

$$2F_1 = 2B \cdot \delta_1. \quad (5.27)$$

Площа перерізу вертикальних стінок, см<sup>2</sup>:

$$2F_2 = 2(H_1 - 2\delta_1)\delta_2. \quad (5.28)$$

Площа всього перерізу, см<sup>2</sup>:

$$F = 2F_1 + 2F_2. \quad (5.29)$$

Момент інерції перерізів відносно осі X – X (рис. 5.1 б), см<sup>4</sup>:

- поясів:

$$I'_{x1} = 2 \left[ \frac{B\delta_1^3}{12} + F_1 \left( Z_2 - \delta_1 + \frac{\delta_1}{2} \right)^2 \right], \quad (5.30)$$

- стінок:

$$I'_{x2} = 2 \left[ \frac{\delta_2(H-2\delta_1)^3}{12} \right]. \quad (5.31)$$

Загальний момент інерції перерізу відносно осі X-X, см<sup>4</sup>:

$$I'_x = I'_{x1} + I'_{x2}. \quad (5.32)$$

Момент опору перерізу відносно осі X-X, (рис. 5.1 б), см<sup>3</sup>:

$$W'_x = 2 \frac{I'_x}{H_1}. \quad (5.33)$$

Момент інерції перерізу відносно осі Y-Y (рис. 5.1 б), см<sup>4</sup>:

- поясів:

$$I'_{y1} = 2 \frac{\delta_1 B^3}{12}, \quad (5.34)$$

- стінок:

$$I'_{y2} = 2 \left[ \frac{(H_1 - 2\delta_1)\delta_2^3}{12} + F_2 \left( \frac{B_1}{2} + \delta_2 - \frac{\delta_2}{2} \right)^2 \right]. \quad (5.35)$$

Загальний момент інерції перерізу відносно осі Y-Y, см<sup>4</sup>:

$$I'_y = I'_{y1} + I'_{y2}. \quad (5.36)$$

Момент опору перерізу відносно осі Y-Y, см<sup>3</sup>:

$$W'_y = 2 \frac{I'_y}{B}. \quad (5.37)$$

## 5.9 Визначення крутного моменту

Крутні навантаження враховують дію навантажень:

- вертикальних, прикладених консольно відносно горизонтальної осі головної балки (маса механізму переміщення моста);
- горизонтальних інерційних, прикладених консольно по відношенню до горизонтальної осі опорного перерізу.

Розрахунковий крутний момент визначається за формулою [9]:

$$M_{кр} = M_{кр1} + M_{кр2} + M_{кр3} + M_{кр4}, \quad (5.38)$$

де  $M_{кр1}$ ,  $M_{кр2}$ ,  $M_{кр3}$ ,  $M_{кр4}$  – крутний момент від розподіленого інерційного навантаження; викликаний зосередженим інерційним навантаженням від ваги кабіни; від ваги механізму переміщення; викликаний зосередженим інерційним навантаженням від ваги візка з вантажем відповідно (рис. 4.1 і 5.1), кгс·см:

$$M_{кр1} = q_i L \cdot \left( \frac{H}{2} - \frac{H_1}{2} \right), \quad (5.39)$$

$$M_{кр2} = P_{i2} \cdot \left( \frac{H_k}{2} + \frac{H}{2} \right), \quad (5.40)$$

$$M_{кр3} = G_m \left( \frac{H}{2} + \frac{H_1}{2} \right), \quad (5.41)$$

$$M_{кр4} = P_{i2} \cdot \frac{H}{2}, \quad (5.42)$$

де  $H_k$  – висота кабіни; повинна бути не менш 180 см [6].

## 5.10 Перевірка балки на міцність та жорсткість

### 5.10.1 Визначення напружень у небезпечному перерізі від різних комбінацій прикладених навантажень

Максимальний згинальний момент від навантажень у вертикальній та горизонтальній площинах виникає у перерізі по середині прольоту балки (табл. 5.3).

Головну балку розраховують для найбільш несприятливого випадку навантажень при одночасному гальмуванні моста і візка, який навантажений номінальним вантажем і знаходиться на середині моста.

Нормальні напруження від згину у перерізі V–V від навантажень, які діють у вертикальній площині  $\sigma_1'$  (рис. 4.1 а, комбінація навантажень А) та у горизонтальній площині  $\sigma_1''$  (рис. 4.1 б), визначається за [9]:

$$\sigma_1' = \frac{M_1'}{W_x} \leq [\sigma]_A, \quad (5.43)$$

$$\sigma_1'' = \frac{M_1''}{W_y}, \quad (5.44)$$

де  $M_1'$ ,  $M_1''$  – максимальний згинальний момент, який виникає у перерізі

балки від навантажень у вертикальній, горизонтальній площині відповідно (рис. 4.1, табл. 5.3), кгс·см;

$[\sigma]_A$  – допустимі нормальні напруження при комбінації навантажень А (табл. 4.2).

Максимальні нормальні напруження від згину у перерізі від дії вертикальних і горизонтальних навантажень (рис. 4.1, комбінація навантажень Б) визначаються за формулою [12]:

$$\sigma_{1max} = \sigma'_1 + \sigma''_1 \leq [\sigma]_B, \quad (5.45)$$

де  $[\sigma]_B$  – допустимі напруження (табл. 4.2).

### 5.10.2 Визначення дотичних напружень у небезпечному перерізі балки

Дотичні напруження, які виникають у небезпечному перерізі балки, визначаються за формулою:

$$\tau = \frac{Q \cdot S_x}{I_x \cdot 2\delta_2}, \quad (5.46)$$

де  $S_x$  – статичний момент перерізу відносно осі, см<sup>3</sup>:

$$S_x = B\delta_1 \left( \frac{H}{2} - \frac{\delta_1}{2} \right) + 2 \left( \frac{H}{2} - \delta_1 \right) \frac{\delta_2(Z_1 - \delta_1)}{2},$$

### 5.10.3 Визначення еквівалентних напружень у небезпечному перерізі балки

У небезпечному перерізі балки, крім максимального моменту, діє перерізуюча сила. Отже, матеріал балки знаходиться у складному напруженому стані.

Еквівалентні напруження визначаються за формулою [9]:

$$\sigma_{екв.} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}. \quad (5.47)$$

Вважається, що переріз підібраний раціонально, якщо відхилення еквівалентних напружень від допустимих  $[\sigma]_p$  складає не

більше  $\pm 5\%$ :

$$\Delta = \frac{\sigma_{\text{екв.}} - [\sigma]}{[\sigma]} \cdot 100\% \leq 5\%.$$

Іноді допускається  $\sigma_{\text{екв.}} < 0,95[\sigma]_p$ , але при цьому матеріал балки використовується недостатньо економно. Неможливо, коли  $\sigma_{\text{екв.}} > 1,05[\sigma]_p$ .

Якщо похибка не задовольнила заданої межі, то потрібно зробити подальший розрахунок на ПК з урахуванням вхідних даних:

- момент  $M$  у небезпечному перерізі, кгс·см;
- максимальна перерізуюча сила,  $Q_{\text{max}}$ , кгс;
- перерізуюча сила  $Q$  у небезпечному перерізі, кгс;
- висота балки  $H$  з попереднього розрахунку, см;
- допустимі напруження  $[\sigma]$ , кгс/см<sup>2</sup>.

#### 5.10.4 Визначення напружень у перерізі біля опори

Переріз головної балки біля опори розраховують за дотичними напруженнями, які виникають від дії поперечної перерізуючої сили та крутного моменту. Максимальна поперечна перерізуюча сила у перерізі біля опори виникає тоді, коли візок з вантажем знаходиться у крайньому положенні біля опори.

Дотичні напруження в опорному перерізі визначаються за наступною формулою [9]:

$$\tau_1 = \frac{Q \cdot S_x}{I' \cdot b} \leq [\tau]_A, \quad (5.48)$$

$$S_x = B \delta_1 \left( \frac{H_1}{2} - \frac{\delta_1}{2} \right) + 2 \left( \frac{H_1}{2} - \delta_1 \right) \frac{\delta_2 (Z_2 - \delta_1)}{2}, \quad (5.49)$$

де  $S_x$  – статичний момент перерізу відносно осі, см<sup>3</sup>;

$b = 2 \cdot \delta_2$  – товщина двох вертикальних стінок (рис. 5.1 б; табл. 5.4);

$[\tau]_A$  – допустимі дотичні напруження при комбінації навантажень А;

$Q$  – максимальна перерізуюча сила, кгс.

Дотичні напруження в опорному перерізі від дії крутного моменту, який сприймається двома кінцевими балками, визначається за формулою [9]:

$$\tau_1 = \frac{M_{кр}}{2W_p}, \quad (5.50)$$

де  $W_p$  – полярний момент опору перерізу,  $\text{см}^3$ . Для балки коробчастого профілю визначається за наступною формулою [9]:

$$W_p = 2F\delta_2, \quad (5.51)$$

де  $F$  – площа прямокутника, який обмежений висями, що проходять кризь середини стінок і поясів,  $\text{см}^2$  (рис. 5.1 б).

Максимальні дотичні напруження у небезпечному перерізі при комбінації навантажень Б:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \leq [\tau]_Б, \quad (5.52)$$

де  $[\tau]_Б$  – допустимі дотичні напруження при комбінації навантажень Б.

### 5.10.5 Визначення прогину балки

Прогин головної балки у небезпечному перерізі від ваги візка з номінальним вантажем визначається за формулою [9]:

$$f = \frac{0,5(G+G_\tau)L^3}{48EI_x} \leq [f]. \quad (5.53)$$

### 5.11 Перевірка загальної стійкості балки

Якщо балка, у якої момент інерції  $I_y$  малий порівняно з  $I_x$ , навантажена силами, що згинають її у вертикальній площині, вертикальне положення балки може перейти у нестійку форму рівноваги. При цьому стиснений пояс балки деформується у боковому напрямку, а поперечні перерізи балки повертаються. В результаті

балка втрачає плоску форму згину.

Перевірка загальної стійкості балки виконується після розрахунку її на міцність за формулою [17]:

$$\sigma = \frac{M}{w_x} \leq \varphi_\delta \cdot [\sigma], \quad (5.54)$$

де  $\varphi_\delta$  – коефіцієнт зниження напружень від втрати стійкості елементів, які згинаються. Його значення для складного перерізу визначається з табл. 5.5, для суцільного перерізу  $\varphi_\delta = 0,9 \dots 1,0$  [17].

Таблиця 5.5 – Значення коефіцієнта  $\varphi_\delta$  у залежності від відношень розмірів елементів балки складного перерізу

Відношення $L/B$	Відношення $H/\delta_1$								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100 і більше
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	0,99	0,97	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
20	0,94	0,90	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,87	0,86
25	0,90	0,85	0,77	0,71	0,68	0,66	0,65	0,64	0,62
30	0,86	0,68	0,57	0,52	0,49	0,47	0,46	0,45	0,44
35	0,79	0,55	0,46	0,41	0,38	0,36	0,35	0,34	0,33
40	0,69	0,47	0,38	0,33	0,31	0,29	0,28	0,27	0,25

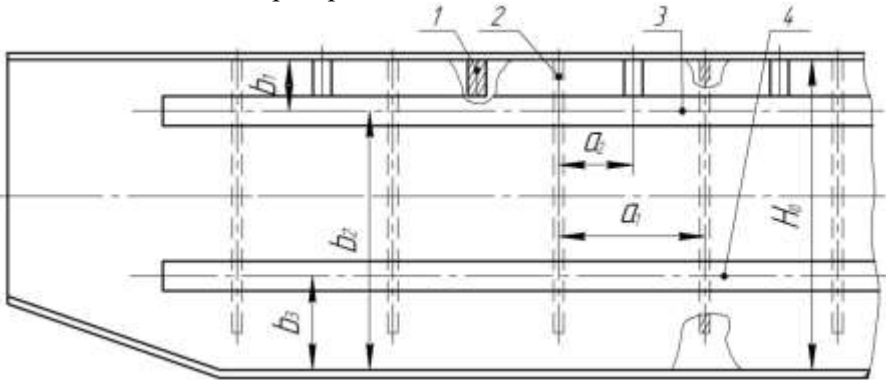
### 5.12 Перевірка місцевої стійкості елементів балки

При забезпеченні загальної стійкості балки можуть виявитися нестійкими стінка або стиснений пояс, що приведе до втрати місцевої стійкості. При цьому вертикальна стінка у результаті деформації виходить із площини балки, а пояс деформується у площині балки.

На ділянках, які примикають до опор, вертикальна стінка сприймає, головним чином, дотичні напруження  $\tau$ , а на ділянці на середині прольоту – нормальні напруження  $\sigma$ . На відстані приблизно однієї чверті прольоту від опори балка сприймає одночасно нормальні і дотичні напруження [4]. Тому перевірка місцевої стійкості стінок виконується для трьох відсіків, які розташовані у середині, на відстані  $\frac{1}{4}$  прольоту та в опорному відсіках. Відсіком називається частина балки, яка замкнена між діафрагмами.

Для забезпечення місцевої стійкості стінки балок укріплюються

ребрами жорсткості (діафрагмами) (рис. 5.2), при цьому необхідно прагнути до того, щоб місцева стійкість задовольнялась при мінімальній кількості ребер.



$H_0$  – висота стінки;

1 – коротке поперечне ребро (мала діафрагма); 2 – основне поперечне ребро (велика діафрагма); 3 – основне поздовжнє ребро; 4 – додаткове поздовжнє ребро

Рисунок 5.2 – Розташування ребер жорсткості у головній балці

При проектуванні балок виконується декілька перевірок на місцеву стійкість.

Місцева стійкість стінок балки може бути забезпечена шляхом встановлення великих діафрагм 2 (рис. 5.2), відстань між якими,  $a_1$ , не повинна перевищувати [4]:

$$\begin{aligned} 2H \text{ при } H/\delta_2 > 100, \\ 2,5H \text{ при } H/\delta_2 < 100. \end{aligned}$$

Після визначення кількості діафрагм з урахуванням  $a_1$ , їх необхідно рівномірно розставити по довжині балки так, щоб місце встановлення діафрагми не співпало з перерізом, у якому діє максимальний згинальний момент. При цьому довжина опорних відсіків може бути менша або дорівнювати  $a_1$ .

Перевірка місцевої стійкості симетричних перерізів з великими діафрагмами виконується для трьох відсіків за формулою [4]:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} + \frac{\sigma_\mu}{\sigma_{\mu 0}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^2} \leq m, \quad (5.55)$$

де  $\sigma$  – крайові нормальні напруження, кгс/см<sup>2</sup> – визначаються для середнього значення згинального моменту в межах відсіку, який перевіряється на місцеву стійкість;

$\sigma_0$  – критичні нормальні напруження, кгс/см<sup>2</sup>;

$\sigma_\mu$  – місцеві нормальні напруження стиснення під зосередженим навантаженням, кгс/см<sup>2</sup>;

$\sigma_{\mu 0}$  – місцеві критичні напруження (кгс/см<sup>2</sup>), визначаються складними емпіричними формулами [3];

$\tau$  – дотичні напруження, кгс/см<sup>2</sup>;

$\tau_0$  – критичні дотичні напруження, кгс/см<sup>2</sup>;

$m$  – коефіцієнт умов роботи.

Критичні нормальні напруження  $\sigma_0$  для коробчастого перерізу балки визначається за формулою [11]:

$$\sigma_0 = 7460 \left( \frac{\delta_z}{H_{\text{сеп}}} \right)^2 \cdot 10^4, \quad (5.56)$$

При визначенні  $\sigma_0$  у відсіку, які розташовані на  $\frac{1}{2}$  і на  $\frac{1}{4}$  довжини балки,  $H_{\text{сеп}} = H$ , а для опорного відсіку  $H_{\text{сеп}} = \frac{H+H_1}{2}$  (рис. 5.3).

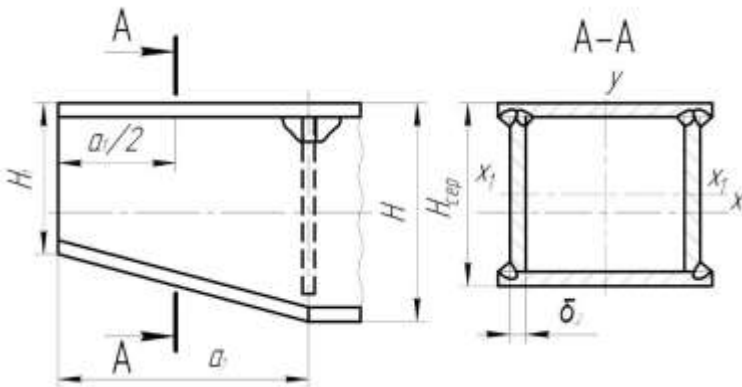


Рисунок 5.3 – Схема для визначення геометричних характеристик середнього перерізу опорного відсіку

Красві напруження  $\sigma$ , визначаються для середнього значення згинального моменту в межах відсіку, який перевіряється, за

формулою:

$$\sigma = \frac{M_{\text{ст}}}{W_{\text{ст}}}. \quad (5.57)$$

Для відсіків, розташованих на  $\frac{1}{2}$  і на  $\frac{1}{4}$  довжини балки, момент, що сприймається стінками  $M_{\text{ст}}$  у середньому перерізі відсіку, що перевіряється, визначається за формулою:

$$M_{\text{ст}} = M \frac{I_{x2}}{I_x}, \quad (5.58)$$

де  $M$  – згинальний момент для середнього перерізу відсіку, що перевіряється, кгс·см, визначається з урахуванням значень (табл. 5.3).

Момент опору перерізу стінок балки відносно горизонтальної осі  $W_{\text{ст}}$ , см<sup>3</sup>, визначається за формулою:

$$W_{\text{ст}} = \frac{2\delta_2 \cdot H_0^2}{6}.$$

Для опорного відсіку краєві напруження визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{6M'_{\text{ст}}}{2\delta_2 H_{\text{cep}}^2},$$

де  $M'_{\text{ст}}$  – момент, який сприймається стінками у середньому перерізі опорного відсіку, кгс·см, визначається за формулою:

$$\begin{aligned} M'_{\text{ст}} &= M' \frac{I'_{x2}}{I'_x}, \quad (5.59) \\ I'_{x2} &= 2\delta_2 \frac{(H_{\text{cep}} - 2\delta_1)^3}{12}, \\ I'_x &= 2 \left[ \delta_2 \frac{(H_{\text{cep}} - 2\delta_1)^3}{12} + B \frac{\delta_1^3}{12} + B\delta_1 \left( \frac{H_{\text{cep}} + \delta_1}{2} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

де  $M'$  – згинальний момент для середнього перерізу опорного відсіку, кгс·см, визначається з урахуванням значень (табл. 5.3);

$I'_{x2}$  – момент інерції стінок у середньому перерізі опорного відсіку, см<sup>4</sup>, (рис. 5.3);

$I'_x$  – момент інерції середнього перерізу опорного відсіку, см<sup>4</sup> (рис. 5.4).

Місцеві напруження стиснення  $\sigma_{\mu}$  під зосередженим вантажем у балках коробчастого перерізу, якщо рейка не розташована над стінкою, приймається:  $\sigma_{\mu} = 0$ .

Величина  $\sigma_{\mu 0}$ , кгс / см<sup>2</sup>, визначається за формулою:

$$\sigma_{\mu 0} = K_1 \left( \frac{\delta_2}{a_1} \right)^2 \cdot 10^6.$$

Значення  $K_1$  пов'язані з відношенням  $a_1/H_0$ :

$a_1/H_0$	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$K_1$	2,21	3,65	4,85	6,08	7,68	9,49	11,46	13,86

Дотичні напруження  $\tau$ , кгс/см<sup>2</sup>, визначаються за формулою:

$$\tau = \frac{Q_{\text{ст}}}{2H_0 \cdot \delta_2},$$

$$Q_{\text{ст}} = Q \frac{I_{x2}}{I_x}. \quad (5.60)$$

де  $Q_{\text{ст}}$  – поперечна перерізувача сила, кгс, для відсіку, який розташовано на  $\frac{1}{2}$  довжини балки, що сприймається стінками у середньому перерізі відсіку.

$Q$  визначаються для середнього перерізу відсіку, що перевіряється, з урахуванням раніш визначених  $Q$  (табл. 5.3). Для опорного відсіку відповідно визначаються  $Q'_{\text{ст}}$  і  $Q'$ .

Критичні дотичні напруження  $\tau_0$ , кгс/см<sup>2</sup>, визначаються за формулою [11]:

$$\tau_0 = \left( 1250 + \frac{950}{\nu^2} \right) \cdot \left( \frac{100\delta_2}{d} \right)^2, \quad (5.61)$$

де  $\nu$  – відношення більшої сторони відсіку до меншої (між  $a_1$  і  $H_0$ ) (рис. 5.3);

$d$  – менша сторона відсіку (довжина  $a_1$  або висота  $H_0$ ), см (рис. 5.2).

Коефіцієнт умов роботи для головної балки приймається [17]:  
 $m = 0,9$ .

Якщо умова 5.55 не виконується, необхідно зменшити відстань  $a_1$  приблизно в 2 рази, шляхом підвищення кількості діафрагм.

Місцева стійкість стінки, яка укріплена діафрагмою вважається

забезпеченою, якщо виконується наступна умова [4, 17]:

$$\frac{H_0}{\delta_2} \leq \sqrt{\frac{2100}{R}}, \quad (5.62)$$

де  $R$  – розрахунковий опір сталі, кгс/см<sup>2</sup>. Приймається по табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Розрахунковий опір прокатної сталі  $R$ , кгс/см<sup>2</sup> [4]

Вид напруженого стану	Клас міцності сталі						
	C38/23	C44/29	C46/33	C52/40	C60/45	C70/60	C85/75
Розтяг, стискання	2100	2600	2900	3400	3800	4400	5300
Згин, крутіння	1300	1500	1700	2000	2300	2600	3100

Якщо умова (5.62) не виконується, необхідно встановити горизонтальне ребро жорсткості 3 у стисненій зоні вертикальної стінки на відстані  $b_1 = (0,2 - 0,3)H_0$  [4] від верхнього поясу (рис. 5.2).

Місцева стійкість симетричних перерізів, які закріплені діафрагмами 2 і поздовжніми ребрами жорсткості 3 (рис. 5.2), перевіряють у трьох відсіках окремо для верхньої та нижньої частин вертикальної стінки (пластинки) відносно горизонтальної осі.

Стійкість верхньої частини вертикального полотна (пластинки) для трьох відсіків визначається за формулою [4]:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{01}} + \frac{\sigma_{\mu}}{\sigma_{\mu 02}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{01}}\right)^2} \leq m, \quad (5.63)$$

де  $\sigma$ ,  $\sigma_{\mu}$ ,  $\tau$ ,  $m$  – визначаються як і для формули (5.55).

При цьому, при визначенні  $M_{ст}$ ,  $M'_{ст}$  і  $Q_{ст}$ ,  $Q'$  відповідно формулам (5.58, 5.59) і (5.60), слід обчислити момент інерції й момент опору перерізу верхньої частини вертикального полотна на дільниці  $b_1$ , відносно горизонтальної осі, яка проходить крізь центр ваги перерізу балки, за формулою:

$$I_{x2} = \frac{\delta_2 b_1^3}{12} + \delta_2 b_1 \cdot \left(\frac{H_0}{2} - \frac{b_1}{2}\right)^2. \quad (5.64)$$

Момент інерції перерізу вертикального полотна відносно горизонтальної осі, яка проходить крізь центр ваги перерізу балки,

визначається за формулою:

$$I_x = \frac{\delta_2 H_0^3}{12}.$$

Нормальні напруження визначаються за формулою:

$$\sigma_{o1} = \frac{1000}{1 - \frac{b_1}{H_0}} \cdot \left( \frac{100\delta_2}{b_1} \right)^2.$$

Дотичні напруження  $\tau_{o1}$  визначають за формулою (5.61) з урахуванням розмірів  $a_1$  і  $b_1$  (рис. 5.2).

Коефіцієнт умов роботи  $m$  визначають таким чином, як і для формули (5.55).

Якщо умова (5.63) не виконується, необхідно поставити малі діафрагми 1 (рис. 5.3) у стисненій зоні балки приблизно на 1/3-1/4 її висоти.

Відстань між малими діафрагмами рекомендується вибирати із умови, при якій рейка повинна повністю сприймати вплив місцевого згину від ходових коліс. При такому припущенні рейка розглядається як нерозрізана балка з опорами на діафрагмах.

Відстань між малими діафрагмами повинна задовольняти такій нерівності [15]:

$$l \geq \frac{6W_x^{min}[\sigma]_p}{P_1},$$

$$W_x = 0,064 \cdot h^3 \quad [18],$$

де  $W_x^{min}$  – найменший момент опору перерізу рейки, см<sup>3</sup>;

$h$  – висота швелера;

$[\sigma]_p$  – допустиме напруження при розтягу, кгс/см<sup>2</sup>, приймається у залежності від типу рейок:

- для рейок типу Р43 і більше –  $[\sigma]_p = 2700$  кгс/см<sup>2</sup>;

- для більш легких типів рейок –  $[\sigma]_p = 2300$  кгс/см<sup>2</sup>.

Перевірка місцевої стійкості нижньої частини вертикального полотна на дільниці  $b_2$ , відносно горизонтальної осі (рис. 5.2), проводиться для трьох відсіків при наявності інерційних навантажень,

що виникають у горизонтальній площині балки (комбінація навантажень Б), за формулою [4]:

$$\sqrt{\left[\frac{\sigma\left(1-\frac{2b_2}{h_0}\right)}{\sigma_{02}} + \frac{\sigma_{\mu}}{\sigma_{\mu 02}}\right]^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{02}}\right)^2} \leq 1, \quad (5.65)$$

де  $\sigma$ ,  $\sigma_{\mu}$ ,  $\tau$  – визначаються таким чином, як і для формули (5.63).

При цьому напруження  $\sigma$  і  $\tau$  визначаються з урахуванням моменту інерції й моменту опору перерізу нижньої частини вертикального полотна ( $H_0 = b_2$ ), відносно горизонтальної осі, яка проходить крізь центр ваги перерізу ( $I_{x2}$ ). Тому при визначенні  $I_{x2}$  за формулою (5.64) слід прийняти  $b_1 = b_2$ .

Напруження  $\sigma_{02}$  визначаються за формулою:

$$\sigma_{02} = \frac{1140}{0,5 - \frac{b_2}{H_0}} \cdot \left(\frac{100\delta_2}{b_2}\right)^2.$$

Напруження  $\tau_{02}$  визначаються за формулою (5.61) з урахуванням розмірів  $a_1$  і  $b_2$  (рис. 5.2).

Якщо умова (5.65) не виконується, на відстані  $b_3 = 0,3H_0$  від нижнього поясу, необхідно встановити додаткове горизонтальне ребро жорсткості 4 (рис. 5.2).

### 5.13 Визначення розмірів діафрагм

Діафрагми повинні щільно приторцьовуватись до верхнього поясу головної балки. Для забезпечення такої можливості й зменшення концентрації напружень у діафрагмі виконується скіс крайок (рис. 5.4).

Напруження зминання  $\sigma_{3M}$  торцевої поверхні діафрагми [15]:

$$\sigma_{3M} = \frac{P_1}{F_m} \leq [\sigma]_{3M}, \quad (5.66)$$

$$F_m = \delta_d \cdot B_1, \quad (5.67)$$

де  $F_m$  – розрахункова площа торцевої поверхні діафрагми, см<sup>2</sup>;  
 $[\sigma]_{зм}$  – допустиме напруження зминання для основного металу,  
 приймається по таблиці 5.7;  
 $\delta_d$  – товщина діафрагми, см.

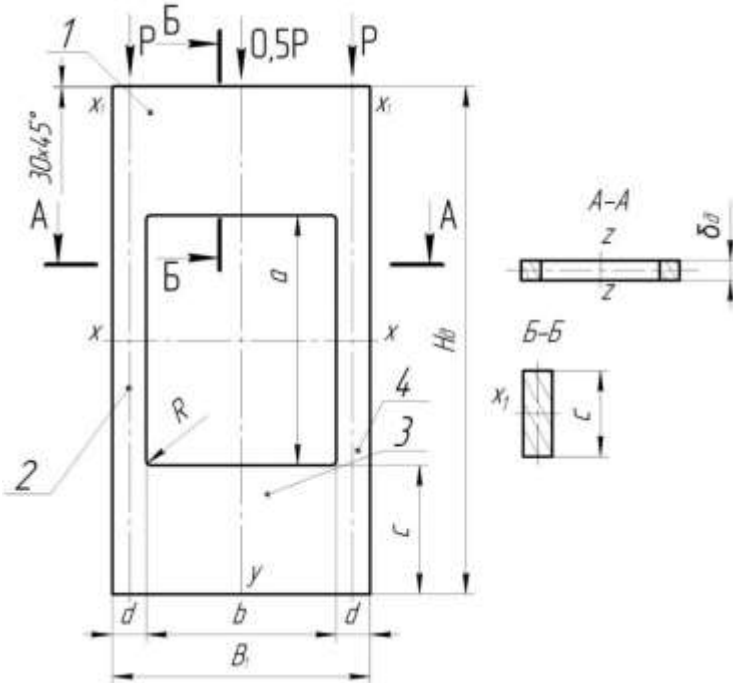


Рисунок 5.4 – Схема до розрахунку діафрагми

Таблиця 5.7 – Допустимі напруження зминання  $[\sigma]_{зм}$  для основного металу торцевої поверхні сталевих конструкцій [10], кгс/см<sup>2</sup>

При урахуванні навантажень	
тільки рухомих і нерухомих	усіх
2100	2550

Так як діафрагма не є основним робочим елементом конструкції, її товщина може бути конструктивно прийнята меншою, ніж товщина вертикальної стінки балки.

Висота великих діафрагм  $H_d$  приймається на 40...60 мм менше висоти стінки балки  $H_0$ . Для полегшення конструкції та зменшення

витрат матеріалу у діафрагмах робиться прямокутний виріз (рис. 5.4).

Мета подальшого розрахунку – визначення розмірів вирізу при зберіганні умови забезпечення міцності діафрагми.

При розрахунку слід мати на увазі, що якщо колесо візка стоїть на балці у площині діафрагми, діафрагма сприймає тільки половину тиску колеса [16].

Частіше рейка лежить на середині балки, тому обидва вертикальних стержня 2 і 4 рами діафрагми (рис. 5.4) навантажені однаково. Таким чином, кожен із стержней сприймає навантаження (рис. 5.4)

$$P = 0,25P_1.$$

Перевірка на міцність стержня рами діафрагми виконується за формулою [18]:

$$\sigma = \frac{P}{F_d} \leq [\sigma]_{\text{ст}}, \quad (5.68)$$

де  $F_d = d \cdot \delta_d$  – площа перерізу стержня рами діафрагми,  $\text{см}^2$ .

З формули (5.68) визначають ширину стержня рами  $d$  і округлюють до ближнього цілого числа. Висота перекладини рами  $c$  діафрагми (рис. 5.4) визначається з умов її роботи на згин з урахуванням того, що вона працює, як нерозрізна балка:

$$c \geq \sqrt{\frac{0,5P_1B_1}{\delta_d \cdot [\sigma]_{\text{згин}}}}, \quad (5.69)$$

де  $[\sigma]_{\text{згин}}$  – допустимі напруження при роботі на згин,  $\text{кгс/см}^2$ .

Висота вирізу у діафрагмі (рис. 5.4),  $\text{см}$ :

$$a = H_d - 2c. \quad (5.70)$$

Ширина вирізу у діафрагмі (рис. 5.4),  $\text{см}$ :

$$b = B_1 - 2d \quad (5.71)$$

Даний розділ завершити накреслюванням рисунка діафрагми з проставленням всіх розмірів. Радіус  $R$  вирізу у діафрагмі (рис. 5.4) приймається конструктивно.

#### 5.14 Вибір профілю перерізу й розмірів поздовжнього ребра жорсткості

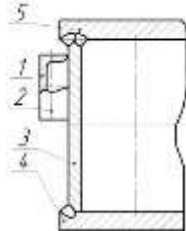
Поздовжні ребра жорсткості встановлюються, як правило, у стисненому поясі балки з метою забезпечення місцевої стійкості стінки. Виготовлення ребер з гнутих профілів швелерного типу передбачає створення найбільших моментів інерції ребер при найменших витратах матеріалу [15].

При наявності одного поздовжнього ребра необхідний момент його інерції  $I_{\text{необх. р.}}$  визначається у залежності від відстані його до стисненого поясу –  $0,2H_0 \dots 0,3H_0$ . Чим більша відстань, тим менше значення необхідного моменту інерції ребра  $I_{\text{необх. р.}}$ . Однак [15]:

$$(1,5H_0 \cdot \delta_2^3) \leq I_{\text{необх. р.}} \leq (7,0H_0 \cdot \delta_2^3).$$

У відповідності з розрахованим  $I_{\text{необх. р.}}$  відповідно стандарту (ДСТУ 3436-96) вибирається дійсна величина моменту інерції швелера  $I_{\text{х. р.}}$ , а потім номер швелера. Конструктивно довжина ребра приймається такою, щоб він переходив у опорні відсіки на 50 см.

Для запобігання попадання сміття, бруду, вологи у середину поздовжнього ребра жорсткості (швелера) до його торців приварюють прямокутні пластини (заглушки) – рис. 5.5.



- 1 – поздовжнє ребро жорсткості; 2 – заглушка поздовжнього ребра жорсткості;  
3 – вертикальна стінка балки; 4 – нижній пояс балки; 5 – верхній пояс балки.

Рисунок 5.5 – Варіант встановлення поздовжнього ребра жорсткості.

Так як заглушка не є основним робочим елементом конструкції, її товщина може бути конструктивно прийнята меншою, ніж товщина вертикальної стінки балки, а її габаритні розміри – за розмірами перетину обраного швелера.

Даний розділ слід завершити рисунком заглушки з усіма розмірами.

### 5.15 Розрахунок міцності зварних з'єднань

Технологічні, конструктивні та монтажні стики елементів балки виконуються, як правило, зварюванням в стик під флюсом. Проектувальник визначає місце конструктивних і монтажних стиків, показує їх конструкцію (вид перетину, скоси крайок, зазори, величину притуплення), призначає спосіб зварювання, наводить необхідні вказівки за технологією зварювання. Для технологічних стиків поясів і стінки розробляються типові стикові з'єднання, що забезпечують рівноміцність. Якщо рівноміцність отримати не можна, проектувальник вказує ділянки балки, в яких за умовами міцності можна розміщувати технологічні стики.

Таврові з'єднання поясів і ребер зі стінкою виконуються кутовими швами. Щоб зменшити зварювальні деформації та знизити трудомісткість, катет цих швів призначають мінімальним. Довгі шви (поясні та шви поздовжніх ребер) виконують автоматичним зварюванням під флюсом, шви вертикальних ребер (діафрагм) – механізованим або ручним зварюванням. Рекомендується всі шви призначати суцільними, уникаючи переривчастих швів.

Якщо балка перевищує по довжині листову сталь, яка є за стандартом, то вертикальні полотна і горизонтальні пояси складаються з двох і більше листів (рис. 5.6).

Кількість стикових швів та їх розташування у вертикальних полотнах і горизонтальних поясах балокзначається, виходячи з конструктивних міркувань. При цьому слід врахувати, що зварні шви не рекомендується розташовувати у площі перерізу, де діє великий згинальний момент.

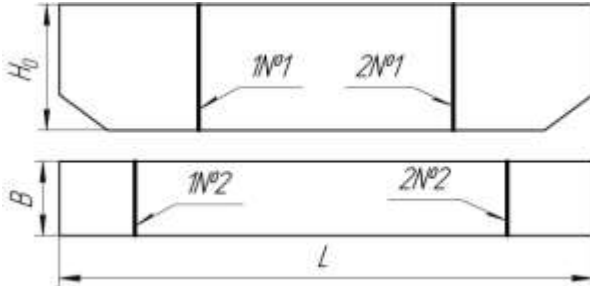


Рисунок 5.6 – Приклад схеми розташування стикових швів на вертикальному й горизонтальному полотнах

З урахуванням даних табл. 5.4 відповідно до ГОСТ 19903-74 (ДСТУ 8540:2015), ГОСТ 82-70 «Прокат стальной горячекатаный широкополосный универсальный. Сортамент» вибирається необхідна довжина листового прокату, розміри якого наводяться у табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Розміри листового прокату, см

Елемент конструкції балки	Товщина	Ширина	Довжина
Пояс			
Стінка			
Діафрагма			

Розрахунок міцності зварних швів виконується для найбільш навантаженого стикового шва стінки. Необхідно вказати його номер згідно рис. 5.6.

Згинальний момент, який приходить на вертикальні стінки, визначається за формулою [12]:

$$M_{ст} = M \frac{I_{x2}}{I_x}, \quad (5.72)$$

де  $M$  – згинальний момент перерізу, у якому розташований зварний шов, який розраховується на міцність.

Нормальні напруження у крайньому волокні стінки і у зварному шві визначаються за формулою [12]:

$$\sigma = \frac{M_{ст}}{W_{ст}} = \frac{6M_{ст}}{2\delta_2 H_0^2} \leq [\sigma]'_p, \quad (5.73)$$

де  $[\sigma]'_p$  – допустимі напруження для метала зварного шва, які приймаються по табл. 4.5, кгс/см<sup>2</sup>.

Напруження у стикових швах горизонтальних поясів перевіряються на сумісну дію згину та нормальної сили, яка викликається тиском ходових коліс, за формулою:

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_{ст} \leq [\sigma]', \quad (5.74)$$

де  $\sigma_{ст} = \frac{P_1}{\delta_1 \cdot B}$  – нормальні напруження стиснення кгс/см<sup>2</sup>;

$\sigma_M = \frac{I_{x1}}{I_x} \cdot \frac{M_{\Pi}}{W_{\Pi}}$  – нормальні напруження згину, кгс/см<sup>2</sup>;

$M_{\Pi}$  – згинальний момент, який діє у перерізі, де розташований стиковий шов пояса, кгс·см. Вказати його номер відповідно з рис. 5.6;

$W_{\Pi} = \frac{2I_{x1}}{H}$  – момент опору пояса балки відносно осі X-X, см<sup>3</sup>.

Після визначення сумарних нормальних напружень їх необхідно порівняти з допустимими. Якщо умова міцності стикових швів пояса (5.74) або стінки (5.73) не виконується, шви слід перенести у перерізи, де діє мінімальний згинальний момент.

Напруження у поясних швах визначаються з урахуванням сколювального зусилля ( $R$ ), яке приходиться на одиницю довжини шва і визначається за формулою [12], кгс/см:

$$R = \frac{Q \cdot S'_x}{I'_x}, \quad (5.75)$$

$$S'_x = B \delta_1 \left( z_2 - \delta_1 + \frac{\delta_1}{2} \right). \quad (5.76)$$

де  $Q$  – максимальна перерізувача сила, кгс;

$S'_x$  – статичний момент пояса відносно осі X-X, см<sup>3</sup>.

Так як верхній пояс, як правило, приварюється до вертикальної стінки двостороннім швом, зусилля  $R$  сприймається двома поясними швами, напруження у яких визначаються за формулою:

$$\tau = \frac{Q \cdot S'_x}{I'_x \cdot \delta_2} = \frac{R}{2\beta K} \leq [\tau]'', \quad (5.77)$$

$$[\tau]'' = j \cdot [\tau]', \quad (5.78)$$

$$j = \frac{1}{\frac{4}{3} - \frac{1}{3} \frac{Q_{min}}{Q_{max}}}, \quad (5.79)$$

де  $[\tau]''$  – допустимі напруження у зварному шві при рухомому навантаженні, кгс/см<sup>2</sup>;

$[\tau]'$  – допустимі дотичні напруження для металу зварного шва, кгс/см<sup>2</sup>;

$j$  – коефіцієнт зниження допустимих напружень [11];

$Q_{min}$ ,  $Q_{max}$  – відповідно мінімальне й максимальне значення поперечної перерізуючої сили, кгс. Визначається по табл. 5.3.

### 5.16 Визначення ваги металоконструкції

Вага конструкції  $G_k$  дорівнює сумі ваги елементів, з яких вона складається [8]:

$$G_k = \sum_{i=1}^n F l \cdot \gamma_z + G_m, \quad (5.80)$$

де  $n$  – число елементів, що складають конструкцію;

$F$  – площа перерізу елементів, см<sup>2</sup>;

$l$  – довжина елемента конструкції, см;

$\gamma_z$  – питома маса заліза, яка умовно прийнята 0,008 кгс/см<sup>3</sup>. Деяке підвищення маси при такому розрахунку враховує запас на відходи при виготовленні;

$G_m$  – вага наплавленого металу, кгс. Приблизно може бути прийнята рівною 0,5...1,0 % ваги конструкції.

Виконати розрахунок ваги всіх елементів балки. Результати розрахунку надати у вигляді табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Результати розрахунку ваги елементів балки

Найменування елементів конструкції	Кількість, шт.	Вага одиниці, кгс	Сумарна вага, кгс
Полотно: - горизонтальне верхнє; - горизонтальне нижнє; - вертикальне			
Діафрагма: - велика; - мала			
Горизонтальне ребро жорсткості			
Заглушка горизонтального ребра			
Наплавлений метал			
Загальна вага балки			

## 5.17 Висновки

Дати стислу характеристику методики розрахунку, що використовувалась при роботі над курсовим проектом та оцінку результатів розрахунку з точки зору їх відповідності вимогам завдання.

# 6 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ І ЗАХИСТУ КП

## 6.1 Вимоги до оформлення курсового проекту

Розрахункову частину проекту надають у вигляді пояснювальної записки (ПЗ), яка виконується згідно вимогами стандарту ДСТУ 3008:2015 [1], у такій послідовності:

- титульний аркуш - оформлюється за формою (Додаток В);
- завдання на проектування;
- реферат;
- зміст;
- перелік скорочень, символів та спеціальних термінів;
- вступ;
- основні розділи (згідно індивідуального завдання);
- висновки;
- перелік посилань;
- додатки.

Завдання на проектування оформлюється студентом згідно додатку Г.

Результати розрахунків повинні бути представлені у вигляді таблиць (табл. 5.3 і 5.4) і додатка до пояснювальної записки КП.

ПЗ повинна виконуватись на аркушах одного сорту білого паперу формату А4 (210×297). З усіх чотирьох боків аркуша повинні залишатися поля. Розмір лівого поля не менш 25 мм, правого – не менш 10 мм, розмір верхнього і нижнього – не менш 20 мм.

Текст ПЗ друкують шрифтом Times New Roman чорного кольору прямого накреслення через півтора міжрядкові інтервали кеглем 14. Вирівнювання тексту по ширині.

Розмір шрифту для написання заголовків у рядках і колонках таблиць та пояснювальних даних на рисунках і в таблицях, встановлюється студентом самостійно.

Всі сторінки курсового проекту мають бути скріплені.

Конструкторська частина проекту згідно ДСТУ.

Креслення зварних конструкцій та вузлів виконується на листі А1 (594×841 мм) з щільного білого паперу і надаються у такому об'ємі, щоб було повне і чітке їх зображення з усіма необхідними проєкціями і зі специфікацією на деталі, які входять до їх складу. Основні надписи на кресленнях виконуються згідно з ДСТУ. Специфікація виконується згідно з ДСТУ 3008:2015 на окремому аркуші і підшивається до ПЗ, як додаток.

Нормативний контроль правильності дотримання вимог ДСТУ здійснює керівник.

## 6.2 Захист проекту

Захист проекту є завершальним етапом роботи і проводиться перед комісією у складі 2-3 викладачів кафедри, в тому числі і керівника курсового проекту із запрошенням студентів.

До захисту подається повністю завершена робота, яка підписана автором та керівником проекту. Загальний час, який відводиться для захисту проекту, 20-25 хв, з яких 8-10 хв надається студенту для виступу, а решта часу – для відповідей на запитання.

Проект оцінюється за стобальною шкалою. При цьому враховується:

- повнота, якість і самостійність виконання поставленої задачі;
- оформлення пояснювальної записки, графічної частини проекту (згідно нормам ДСТУ);
- чіткість виступу студента та його відповіді на запитання;
- планомірність роботи над проектом;
- робота з інформаційними джерелами.

Студент, що не подав курсовий проект у зазначений термін, або не захистив його без поважної причини, вважається таким, що має академічну заборгованість. При одержанні незадовільної оцінки студент переробляє роботу в термін, визначений деканом факультету.

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання.
2. Богинский К.С. Мостовые и металлургические краны / К.С. Богинский. – М.: Машиностроение, 1970. – 300с.
3. Проектирование сварных конструкций в машиностроении / Под ред. С.А. Куркина. – М.: Машиностроение, 1971. – 376 с.
4. Лихтарников Я.М. Расчет сварных конструкций / Я.М. Лихтарников. – К.: Будівельник, 1976. – 350с.
5. ДСТУ 2651:2005/ГОСТ 380-2005. Сталь вуглецева звичайної якості. Марки – Київ. Держспоживстандарт України. – 2006.
6. Справочник по кранам. Т.1/Под ред. А.И. Дукельского. – Л.: Машиностроение, 1971. – 455с.
7. Парницкий А.Б. Мостовые краны общего назначения / А.Б. Парницкий. – М.: Машиностроение, 1971. – 311с.
8. Серенко А.Н. Расчет сварных соединений и конструкций / А.Н. Серенко, М.Н. Крумбольт, К.В. Багрянский. – К.: Вища школа, 1977. – 336 с.
9. Иванченко Ф.К. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин / Ф.К. Иванченко. – К.: Будівельник, 1975. – 485 с.
10. Верник А.Б. Мостовые краны большой грузоподъемности / А.Б. Верник. – М.: Машгиз, 1956. – 295 с.
11. Справочник по кранам. Т.2 / Под ред. А.И. Дукельского. – Л.: Машиностроение, 1971. – 351 с.
12. Николаев Г.А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – Учеб. пособие для машиностроит. вузов. – М.: Высш. школа, 1971. – 760 с.
13. Справочник по кранам. Т.3 / Под ред. А.И. Дукельского. – Л.: Машиностроение, 1971. – 340 с.
14. Парницкий А.Б. Мостовые краны общего назначения / А.Б. Парницкий. – М.: Машиностроение, 1962. – 392 с.
15. Гохберг М.М. Металлические конструкции грузоподъемных машин / М.М. Гохберг. – Л.: Машиностроение, 1969. – 520 с.
16. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Технология

изготовления. Автоматизация производства и проектирование сварных конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1983. – 344 с.

17. Богуславский П.Е. Металлические конструкции грузоподъемных машин и сооружений / П.Е. Богуславский. – М.: Машгиз, 1961. – 520 с.

18. Писаренко А.И. Сопротивление материалов / А.И. Писаренко. – М.: Высшая школа, 1970. – 431 с.

19. Дарков А.В. Сопротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. – М.: Высшая школа, 1975. – 431 с.

**Додаток А**  
**Завдання до курсового проекту РПЗК**

№ варіанту	Вантажопідйомність, G, тс	Проліт крана, L, м	Режим роботи (Л - легкий, С - середній)	Комбінація навантажень	Висота підйому вантажу (Н - нормальна, З - збільшена)	Основний матеріал сталі
1.	250	33	С	А	З	10ХСНД
2.	75	22	С	Б	Н	ВСт2сп
3.	100	13 12	Л	А	З	ВСт4сп
4.	150	22	Л	Б	Н	15ХСНД
5.	100	31	С	А	Н	09Г2С
6.	75	22	Л	А	З	ВСт3сп
7.	100	19	Л	Б	Н	ВСт3сп
8.	75	22	Л	Б	З	ВСт4сп
9.	125	25	Л	Б	З	10ХСНД
10.	100	25	С	А	З	ВСт3сп
11.	200	25	Л	А	Н	15ХСНД
12.	100	13	Л	А	Н	ВСт5сп
13.	75	22	С	Б	З	ВСт4сп
14.	125	19	С	Б	Н	09Г2С
15.	200	16	Л	А	З	18Г2С
16.	100	28	Л	Б	Н	ВСт4сп
17.	200	25	С	Б	Н	ВСт5сп
18.	150	19	С	Б	З	12ГС
19.	75	22	Л	А	Н	ВСт3сп
20.	250	28	С	Б	Н	18Г2С
21.	150	28	С	Б	Н	12ГС
22.	100	19	С	А	З	ВСт3сп
23.	250	33	С	Б	З	15ХСНД
24.	100	13	Л	Б	Н	ВСт4сп
25.	200	16	С	Б	Н	14Г2
26.	75	22	Л	Б	З	ВСт2сп
27.	150	28	Л	А	Н	09Г2С

28.	125	25	С	Б	Н	12ГС
29.	250	33	С	Б	Н	15ХСНД
30.	100	25	С	Б	Н	ВСт3сп
31.	100	22	Л	А	Н	10ХСНД
32.	125	22	С	А	Н	ВСт3сп
33.	200	25	С	Б	З	ВСт5сп
34.	150	33	С	Б	З	10ХСНД
35.	75	22	С	А	Н	15ХСНД
36.	125	13	Л	Б	З	ВСт4сп
37.	150	33	Л	А	Н	15ХСНД
38.	100	22	С	Б	Н	09Г2С
39.	75	22	Л	А	З	ВСт2сп
40.	100	25	Л	А	Н	ВСт3сп
41.	90	22	Л	Б	З	ВСт4сп
42.	125	28	Л	Б	З	09Г2С
43.	145	25	С	Б	З	12ГС
44.	200	25	Л	Б	З	14Г2
45.	125	19	Л	А	Н	ВСт5сп
46.	75	22	С	А	З	ВСт4сп
47.	125	25	С	А	Н	09Г2С
48.	210	16	Л	Б	З	18Г2С
49.	100	31	Л	А	Н	ВСт4сп
50.	230	28	С	А	Н	ВСт5сп
51.	170	19	С	А	З	12ГС
52.	80	22	Л	Б	З	ВСт3сп
53.	250	28	С	А	З	18Г2С
54.	145	28	С	А	Н	12ГС
55.	100	31	С	Б	З	ВСт3сп
56.	250	33	С	А	З	15ХСНД
57.	100	13	Л	А	Н	ВСт3сп
58.	215	16	С	А	Н	09Г2С
59.	75	22	С	А	З	ВСт4сп
60.	160	28	Л	Б	З	09Г2С
61.	125	25	С	Б	Н	10Г2С1
62.	250	33	С	А	Н	18Г2С
63.	100	28	С	А	Н	ВСт3сп

64.	100	22	Л	Б	Н	12ГС
65.	135	25	С	А	Н	ВСт4сп
66.	200	25	С	А	3	ВСт5сп
67.	250	28	С	Б	3	18Г2С
68.	85	22	С	А	Н	ВСт3сп
69.	100	13	Л	Б	Н	ВСт2сп
70.	150	28	С	А	3	15ХСНД
71.	100	31	С	Б	Н	09Г2С
72.	85	22	Л	А	Н	ВСт3сп
73.	100	19	Л	А	3	ВСт3сп
74.	65	22	Л	Б	Н	ВСт2сп
75.	125	25	Л	А	3	10ХСНД
76.	100	25	С	Б	3	ВСт4сп
77.	200	25	Л	Б	3	12ГС
78.	100	13	С	А	3	ВСт5сп
79.	75	22	С	А	Н	ВСт4сп
80.	130	19	С	А	3	09Г2С
81.	215	16	Л	Б	3	15ХСНД
82.	100	28	С	А	3	ВСт4сп
83.	200	25	С	А	Н	ВСт5сп
84.	150	22	С	А	3	12ГС
85.	75	22	Л	Б	Н	ВСт2сп
86.	250	28	С	А	3	18Г2С
87.	170	28	С	А	Н	12ГС
88.	100	25	С	Б	3	ВСт3сп
89.	250	33	С	А	3	15ХСНД
90.	100	13	Л	А	3	ВСт4сп
91.	200	16	С	Б	3	09Г2С
92.	55	22	Л	А	Н	ВСт3сп
93.	145	28	Л	Б	3	09Г2С
94.	125	28	С	А	3	12ГС
95.	250	33	С	А	3	15ХСНД
96.	100	31	С	Б	3	ВСт3сп
97.	100	22	С	А	3	10ХСНД
98.	125	19	С	Б	3	ВСт3сп
99.	200	16	С	А	3	ВСт5сп

100.	100	31	Л	Б	Н	09Г2С
101.	85	22	Л	Б	3	ВСт3сп
102.	120	28	Л	А	Н	ВСт3сп
103.	60	22	Л	Б	Н	ВСт2сп
104.	130	25	С	А	3	15ХСНД
105.	100	22	С	Б	Н	ВСт3сп
106.	200	25	С	Б	3	10ХСНД
107.	110	13	Л	А	Н	ВСт3сп
108.	75	22	С	А	3	ВСт4сп
109.	125	19	С	А	3	09Г2С
110.	220	16	Л	Б	Н	18Г2С
111.	100	28	Л	А	Н	ВСт4сп
112.	200	25	С	А	3	09Г2С
113.	150	19	С	А	3	12ГС
114.	75	22	Л	Б	Н	ВСт2сп
115.	250	28	С	А	3	18Г2С
116.	150	28	С	А	3	12ГС
117.	110	19	С	Б	Н	ВСт3сп
118.	250	33	С	А	3	15ХСНД
119.	100	13	Л	А	Н	ВСт3сп
120.	200	16	С	А	3	14Г2
121.	75	22	Л	А	Н	ВСт2сп
122.	160	28	С	А	3	09Г2С

## Додаток Б

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів курсового проекту	Строк виконання етапів проекту, тиждень	Прим.
1	Вступ. Вибір зварювальних матеріалів. Визначити допустимі напруження для основного металу та зварних з'єднань. Визначити розрахункові навантаження.	2	
2	Визначення внутрішні силові фактори за допомогою програмних засобів.	3	
3	Вибір розмірів елементів в перерізі головної балки та визначення їх основні характеристики. Визначення напруження у небезпечному перерізі балки.	4	
4	З урахуванням методу послідовного наближення визначення на ПК напруження і встановлення кінцевих розмірів елементів перерізу балки.	4	
5	Визначення напружень в опорному перерізі та прогин балки. Перевірка загальної та місцевої витривалості. Визначення розмірів діафрагм, ребер жорсткості.	7	
6	Виконання розрахунків на міцність зварних з'єднань. Визначення маси спроектованої балки.	8	
7	Виконання складального креслення головної балки.	10	
8	Креслення схематичного зображення зварних з'єднань.	11	
9	Висновок. Реферат. Специфікації. Заключне оформлення матеріалів КП.	12	
10	Захист проекту.	13-14	

## Додаток В Титульний аркуш

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**  
Кафедра Обладнання та технологія зварювального виробництва

### КУРСОВИЙ ПРОЕКТ

з дисципліни «Розрахунки та проектування зварних конструкцій  
на тему: «Проектування і розрахунок головної балки мостового крану»

Студента (ки) \_\_ курсу групи ІФ-3\_\_\_\_  
спеціальності 131 Прикладна механіка  
освітньої програми «Технологія та  
устаткування зварювання»

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник доц., канд. техн. наук,  
\_\_\_\_\_ Осіпов М.Ю.

Національна шкала \_\_\_\_\_

Кількість балів: \_\_ Оцінка: ECTS \_\_\_\_

Члени комісії \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис) (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис) (прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя  
20\_\_ рік

## Додаток Г

### Аркуш завдання

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»  
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інженерно-фізичний

Кафедра Обладнання та технологія зварювального виробництва

Дисципліна – Розрахунки та проектування зварних конструкцій

Освітня програма «Технології та устаткування зварювання»

Курс \_\_\_\_\_, група \_\_\_\_\_, семестр \_\_\_\_\_

### ЗАВДАННЯ

на курсовий проект студенту

\_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту:

«Проектування і розрахунок головної балки мостового крану»

2. Термін здачі студентом закінченого проекту: \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту:

- вантажопідйомність,  $G =$  \_\_\_\_\_ тс;
- проліт крану,  $L =$  \_\_\_\_\_ м;
- режим роботи крану \_\_\_\_\_ ;
- комбінація навантаження \_\_\_\_\_ ;
- висота підйому вантажу \_\_\_\_\_ ;
- основний матеріал – сталь \_\_\_\_\_ .

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

- вибір зварювальних матеріалів, визначення допустимих напружень;
- визначення внутрішніх силових факторів та напружень у небезпечному перерізі балки і розрахунок розмірів елементів перерізу балки за допомогою програмних засобів;
- перевірка загальної та місцевої витривалості балки;
- визначення розмірів діафрагм, ребер жорсткості балки;
- виконання розрахунку на міцність зварних з'єднань;
- розрахунок маси спроектованої балки.

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

Лист 1 – складальне креслення головної балки;

Лист 2 – креслення зварних з'єднань.

6. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_ / Осіпов М.Ю.  
 (керівник проекту)