

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Кораблебудівний навчально-науковий інститут

Кафедра зварювального виробництва

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

 С. В. Драган
«11» 12 2025

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему: РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА МЕХАНІЗОВАНОЇ ПОТОКОВОЇ ЛІНІЇ
ВИГОТОВЛЕННЯ МОСТОВИХ БАЛОК ЗІ СТАЛІ S420NL

Виконав студент 6121м групи

 Гунченко О. В.

Керівник роботи

Професор

 Драган С. В.

Миколаїв 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кораблебудівний навчально-науковий інститут

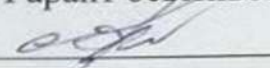
Кафедра зварювального виробництва

Спеціальність 131 «Прикладна механіка»

Освітня програма «Інжиніринг зварювання та споріднених процесів»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

 С.В. Драган

«10» 03 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Студенту гр. 6121м Гунченко Олені Вікторівні

1. Тема роботи: Розробка технології та механізованої потокової лінії виготовлення мостових балок зі сталі S420NL

Керівник роботи: Драган Станіслав Володимирович

Затверджені наказом ректора № 1566 від «13» листопада 2025 року

2. Термін подання роботи: 10.12.2025 р.

3. Вихідні дані по роботі: Креслення конструкції мостової балки, основний матеріал – сталь S420NL, річна програма випуску – 1890 шт.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів):

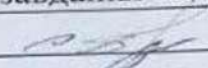
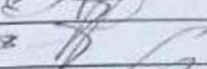
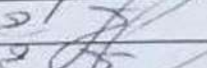
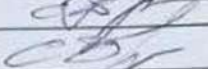
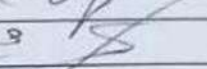
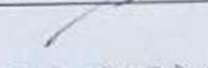
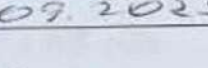
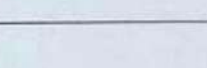
Аналіз базової технології виготовлення великогабаритних балок. Дослідження технології високопродуктивного зварювання товстолистових елементів балок. Розробка технології механізованого виготовлення балок. Проєктування механізованої потокової лінії (МПЛ) складання і зварювання балок. Розробка заходів щодо охорони праці та техніки безпеки. Економічне обґрунтування розробок проєкту МПЛ.

5. Перелік презентаційних матеріалів:

Тема, мета та завдання кваліфікаційної роботи. Конструкція та характеристика типових мостових балок. Характеристики основного металу, оцінка зварюваності. Базова технологія. Розрахунки режимів зварювання. Розрахункова оцінка зварювальних деформацій балок. Дослідження стикових зварних з'єднань. Розробка варіантів технологічного процесу складання і зварювання балок. Циклограма роботи МПЛ. Зварювальні матеріали та

технологічне обладнання. Розрахунок кантувача балок. Технологічний план розміщення виробництва. Зведені затрати на технологічну собівартість складання та зварювання мостової балки. Загальні висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Драган С.В., професор		
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			

7. Дата видачі завдання 10.07.2025

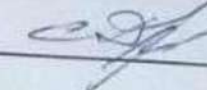
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз особливостей та проблем базової технології виготовлення великогабаритних балок	10.10.2025	
2.	Дослідження процесів високопродуктивного зварювання товстолистових елементів балкових конструкцій	23.10.2025	
3.	Розробка технологічних рішень для механізованого виготовлення балок	10.11.2025	
4.	Проектування механізованої потокової лінії для складання та зварювання балок	20.11.2025	
5.	Розробка комплексу заходів з охорони праці та техніки безпеки під час виготовлення балок	27.11.2025	
6.	Проведення економічного обґрунтування запропонованих технічних рішень у проєкті МПЛ	2.12.2025	
7.	Оформлення пояснювальної записки	10.12.2025	
8.	Підготовка презентаційних матеріалів	18.12.2025	

Студент

 Гунченко О.В.
(ПІБ)

Керівник роботи

 Драган С.В.
(ПІБ)

Анотація

Тема: Розробка технології та механізованої потокової лінії виготовлення мостових балок зі сталі S420NL.

Спеціальність: 131

Гунченко О.В., студентка групи 6121м

Керівник: професор Драган С.В.

У кваліфікаційній роботі розроблено технологію складання та автоматичного зварювання великогабаритної мостової балки на механізованої потокової лінії.

Обґрунтовано вибір способу зварювання під флюсом Tandem SAW, зварювальних матеріалів та основного технологічного обладнання.

Розроблено структурну схему та технологічний план механізованої потокової лінії, циклограму та послідовність виконання складально-зварювальних операцій.

Розраховано технологічну собівартість складально-зварювальних операцій на одну балку та річний обсяг витрат.

Розглянуто питання охорони праці, вентиляції та техніки безпеки під час виконання зварювальних робіт.

Ключові слова: зварювання, технологія, розрахунок, складання, з'єднання, балка, МПЛ, автоматизація, Tandem SAW

Abstract

Topic: Development of technology and mechanized production line for the production of bridge beams from S420NL steel.

Specialty: 131

Gunchenko O.V., student of group 6121m

Supervisor: Professor Dragan S.V.

In the qualification work, the technology of assembly and automatic welding of a large-sized bridge beam on a mechanized production line was developed.

The choice of the Tandem SAW submerged arc welding method, welding materials and main technological equipment was justified.

A structural diagram and technological plan of a mechanized production line, a cycle diagram and the sequence of assembly and welding operations were developed.

The technological cost of assembly and welding operations per beam and the annual cost were calculated.

The issues of labor protection, ventilation and safety during the performance of welding work were considered.

Keywords: welding, technology, calculation, assembly, connection, beam, MPL, automation, Tandem SAW

Зміст

Вступ.....	4
1. Аналіз базової технології виготовлення великогабаритних балок.....	6
1.1. Призначення, умови експлуатації, конструкції мостових балок та вимоги до технології їх виготовлення.....	7
1.2. Властивості матеріалу балок, оцінка зварюваності.....	10
1.3. Особливості та проблеми базової технології зварювання товстолистових елементів балок. Аналіз організаційних форм виробництва зварних балок.....	14
1.4. Висновки та постановка завдань кваліфікаційної роботи.....	19
2. Дослідження технології високопродуктивного зварювання товстолистових елементів балок.....	22
2.1. Обґрунтування вибору методів високопродуктивного автоматичного зварювання поясних швів балок.....	23
2.2. Розрахунки режимів зварювання стикових і таврових з'єднань.....	27
2.3. Розрахункова оцінка зварювальних деформацій балок.....	33
2.4. Складання технологічної документації (WPS A-121-1-23). Результати експериментального дослідження зварних з'єднань.....	35
Висновки.....	37
3. Розробка технології механізованого виготовлення балок.....	38
3.1. Вибір зварювальних матеріалів та технологічного обладнання.....	39
3.2. Розрахунок технологічної оснастки.....	50
3.3. Розробка змісту технологічного процесу, нормування операцій.....	56
3.4. Контроль якості зварювання.....	67
Висновки.....	69
4. Проектування механізованої потокової лінії (МПЛ) складання і зварювання балок.....	70
4.1. Складання варіантів структурної схеми МПЛ та схеми технологічного процесу виготовлення балок.....	71
4.2. Оцінка варіантів структурної схеми (за показниками організаційно-технологічного проектування), вибір оптимального варіанту.....	77
4.3. Побудова циклограми роботи МПЛ.....	78
4.4. Розміщення МПЛ у прольоті цеху, розробка технологічного плану прольоту.....	79
Висновки.....	81
5. Розробка заходів щодо охорони праці та техніки безпеки.....	83
Висновки.....	89
6. Економічне обґрунтування розробок проекту МПЛ.....	90
Висновки.....	98
Загальні висновки.....	99
Список використаних джерел інформації.....	101

					КР.131.6121м.03.00.06.ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент		Гунченко О.В.			Вступ		Аркуш	Аркушів
Керівник		Драган С.В.					4	
Консульт.		.					НУК ім. адм. Макарова	
Зав. Кафед.		Драган С.В.						

Вступ

Мостова балка є ключовим елементом несучої системи прогонових будов автомобільних і залізничних мостів, що сприймає постійні та тимчасові навантаження від руху транспорту, власної маси споруди та динамічних впливів. Балка конструктивно складається зі стінки, верхніх і нижніх полиць та ребер жорсткості, які з'єднуються зварюванням у єдину просторову систему.

Загальні габарити балки становлять $800 \times 1500 \times 9152$ мм, при цьому для виготовлення стінок і полиць застосовується сталь S420NL, а ребра жорсткості та анкери виконуються зі сталі S355. Конструкція включає велику кількість монтажних та технологічних отворів, що ускладнює процеси складання та зварювання, особливо з урахуванням значної товщини листів і підвищених вимог до точності геометрії.

При таких розмірах і масі елементів раціональним є застосування механізованих і автоматичних способів зварювання, які забезпечують стабільну якість формування швів та мінімізацію залишкових деформацій. Вимоги до міцності та довговічності балки визначають необхідність використання сучасних технологій багатодугового зварювання під флюсом, що дає змогу отримати суцільні та рівномірні шви із контрольованим тепловкладенням.

Базові технології виготовлення великих мостових балок відзначаються значною трудомісткістю та високою ймовірністю виникнення дефектів у зварних з'єднаннях при виконанні великої кількості проходів. Це обумовлює потребу в удосконаленні методів складання й зварювання, а також у впровадженні механізованих потокових ліній, які дозволяють підвищити продуктивність та забезпечити стабільну якість виготовлення.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка удосконаленої технології високопродуктивного складання та зварювання сталевих мостових балок шляхом застосування сучасних автоматизованих процесів зварювання під флюсом.

					КР.131.6121м.03.00.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		5

					КР.131.6121м.03.01.06.ПЗ							
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата								
Студент	Гунченко О.В.				Аналіз базової технології виготовлення великогабаритних балок					Аркуш	Аркушів	
Керівник	Драган С.В.										6	
Консульт.	.								НУК ім. адм. Макарова			
Зав. Кафед.	Драган С.В.											

1. Аналіз базової технології виготовлення великогабаритних балок

1.1. Призначення, умови експлуатації, конструкції мостових балок та вимоги до технології їх виготовлення

Мостові балки є головними елементами несучих конструкцій прогонових будов автомобільних та залізничних мостів, які сприймають дію постійних і змінних навантажень, включно з власною вагою прогонової споруди, транспортними та пішохідними навантаженнями, а також додатковими динамічними зусиллями, що виникають від вітрового тиску, гальмування рухомого складу та температурних деформацій згідно з вимогами ДБН В.2.3-26:2024 [1]. Конструктивне призначення балок полягає у забезпеченні необхідної жорсткості та стійкості прогонової будови, передачі навантажень на опорні елементи мосту та гарантуванні безпечної експлуатації протягом усього розрахункового терміну служби, який для сталевих мостових конструкцій становить не менше 100 років за умови виконання вимог щодо якості виготовлення та антикорозійного захисту [2].

Для забезпечення працездатності балки проектується з урахуванням впливу вигину, зсуву та крутіння, що виникають у результаті дії розподілених та зосереджених навантажень, а також локальних силових впливів від температурних градієнтів і деформаційних процесів у зварних швах [3]. Геометричні параметри поперечного перерізу визначаються розрахунковими схемами та умовами міцності згідно з положеннями ДСТУ EN 1993-1-1:2010 [4] та ДСТУ EN 1993-1-8:2011 [5], що регламентують розрахунок і проектування сталевих конструкцій, включаючи зварні з'єднання.

Експлуатаційні умови сталевих мостових балок визначаються комплексом факторів, що впливають на їхню міцність, жорсткість і довговічність протягом усього розрахункового терміну служби.

Температурні умови експлуатації мостових сталевих балок враховують можливе охолодження конструкції до мінус 40 °С, що вимагає застосування сталей із збереженням ударної в'язкості при низьких температурах та призначення відповідних режимів попереднього підігріву й термічної обробки [6].

Навантаження на балки включають постійні (власна вага), тимчасові (транспортні, пішохідні), динамічні (гальмування рухомого складу, пориви вітру, сейсмічні впливи) та локальні силові дії, які формують складний напружено-деформований стан з урахуванням вигину, зсуву та кручення [1, 3].

					КР.131.6121м.03.01.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		7

Вібраційні впливи, що виникають під час руху транспорту, особливо великовантажного та швидкісного, зумовлюють появу циклічних змінних напружень і вимагають забезпечення втомної міцності зварних з'єднань відповідно до встановлених нормативів [7].

Корозійні процеси, зумовлені впливом атмосферних, водних та промислових середовищ, є ключовим чинником довговічності конструкцій і потребують застосування сталей з підвищеною стійкістю та багат шарових систем захисних покриттів [8, 6].

Конструктивне виконання сталевих мостових балок визначається вимогами до несучої здатності, жорсткості, довговічності та можливості механізованого виготовлення зварних з'єднань. У практиці мостобудування застосовуються такі основні типи поперечних перерізів:

1. Балки двотаврового перерізу (Н- та І-подібні).

Це найбільш поширені типи, що формуються зі стінки та двох поясів (верхнього та нижнього). Виготовлення здійснюється методом автоматичного дугового зварювання під флюсом (SAW) з використанням технологій Single Arc, Twin Arc або Tandem Arc для забезпечення необхідної глибини проплавлення та високої продуктивності. Перевагами є універсальність, можливість зміни висоти стінки у широкому діапазоні (від 180 мм до 3000 мм залежно від серії лінії HBWL або BWM) та відносна простота механізованого виготовлення [9 – 11].

2. Таврові балки (Т-подібні).

Застосовуються для прогонових будов малої та середньої довжини, а також як складові комбінованих систем. Таврові балки виготовляються на спеціалізованих установках для зварювання стінки до однієї полиці. Автоматичне зварювання під флюсом забезпечує якісне формування швів і мінімальні залишкові деформації [12].

3. Коробчаті балки.

Це замкнені тонкостінні конструкції, що складаються зі стінок та поясів, з'єднаних у замкнений прямокутний або трапецеїдальний переріз. Вони мають високий момент інерції та стійкість до крутіння, тому застосовуються у великих прогонах і при підвищених динамічних навантаженнях. Технологія виготовлення передбачає застосування багатодугового зварювання під флюсом із використанням кантувальних пристроїв та спеціальної оснастки для зварювання кутових і стикових швів [13, 14].

4. Комбіновані балки.

Містять ознаки як двотаврових, так і коробчатих конструкцій,

					КР.131.6121м.03.01.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		8

наприклад балки змінного перерізу з додатковими ребрами жорсткості або конструкції зі складними перехідними вузлами. Такі балки проектується для специфічних умов експлуатації — великі прогони, підвищене транспортне навантаження, складна просторово-силова схема. Їх виготовлення потребує застосування високоточних систем механізованого складання та багатопрохідного автоматичного зварювання [15].

Виготовлення сталевих мостових балок повинно відповідати комплексу технологічних вимог, які забезпечують надійність і довговічність конструкцій у реальних умовах експлуатації. Основними критеріями є точність геометрії, якість зварних з'єднань, міцність і довговічність [3, 16].

1. Точність геометрії.

Геометричні параметри балок мають відповідати проєктній документації та встановленим допускам [1, 4, 5]. До основних контрольованих показників належать:

- відхилення від прямолінійності осі балки;
- допустимі перекося полиць і стінок;
- відхилення розмірів поперечного перерізу;
- допустимі кути розкриття зварних швів.

Недотримання цих вимог може спричинити концентрацію напружень і зниження несучої здатності конструкції [16, 17].

2. Якість зварних з'єднань.

Зварні шви повинні відповідати вимогам ДСТУ ISO 5817:2016 щодо якості, встановленої для відповідних типів відповідальних конструкцій [18]. До основних показників належать:

- відсутність непроварів, пор, шлакових включень і підрізів;
- правильне формування кореня та підсилення шва;
- відповідність розмірів і конфігурації шва нормативним параметрам.

Якість підтверджується результатами неруйнівного контролю (ультразвукового, радіографічного, візуального) [18].

3. Міцність.

Балка повинна сприймати розрахункові навантаження з урахуванням вигину, зсуву, крутіння та втомних впливів [16, 17]. Розрахунки виконуються відповідно до вимог Єврокоду 3 [4]. Несуча здатність зварних з'єднань перевіряється за критеріями граничних станів і підтверджується випробуваннями контрольних зразків [5].

4. Довговічність.

Розрахунковий термін експлуатації мостових балок має становити не менше 100 років [2]. Для цього передбачаються такі заходи:

- застосування сталей із достатньою ударною в'язкістю при низьких температурах;
- мінімізація залишкових напружень і деформацій у процесі зварювання;
- використання багат шарових систем антикорозійного захисту відповідно до вимог;
- впровадження механізованих і автоматизованих потокових ліній виготовлення, що забезпечують високу повторюваність операцій [2, 19].

1.2. Властивості матеріалу балок, оцінка зварюваності

Представлена балка — зварна металева конструкція з розмірами 800×1500×9152 мм. На верхній полиці розміщені анкери, які слугують каркасом для бетонного покриття (рис. 1.1). Специфікація елементів балки наведена в табл. 1.1.

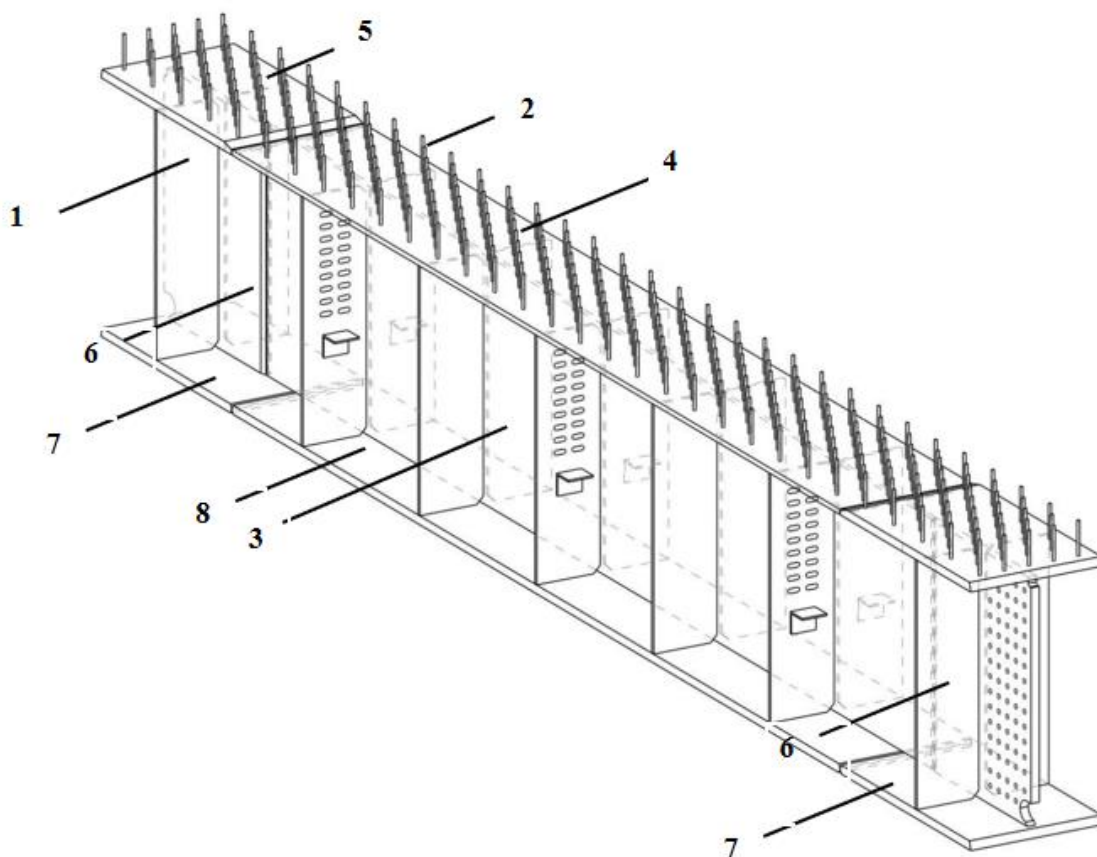


Рис. 1.1. Конструкція балки

					КР.131.6121м.03.01.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		10

Таблиця 1.1. Специфікація елементів балки

Специфікація							
№	Назва дет.	Кільк. шт.	Профіль	Довжина, мм	Маса, кг		Марка металу
					шт.	разом	
1	Ребро	14	— 20×385	1398	84,3	1180,2	S355
2	Анкер	275	○ D16	200	0,3	82,5	S355
3	Стінка велика	1	— 30×1400	7000	2306,0	2306,0	S420NL
4	Полиця велика верхня	1	— 30×800	6400	1204,7	1204,7	S420NL
5	Полиця мала верхня	2	— 50×800	1376	428,1	856,2	S420NL
6	Стінка мала	2	— 50×1400	1060	570,2	1140,4	S420NL
7	Полиця мала нижня	2	— 50×800	1376	423,7	847,4	S420NL
8	Полиця велика нижня	1	— 50×800	6400	2006,0	2006,0	S420NL
Маса наплавленого металу: 2,0‰ = 192,6 кг							

Конструкція балки

Балка складається з трьох частин:

- Центральна частина — дві полиці, стінка та ребра жорсткості.
- Бокові частини — симетричні блоки меншої ширини, різної товщини, що містять дві однакові полиці, стінку та ребра. Кожна стінка має 64 монтажні отвори.
- Ребра центральної частини — 6 одиниць, кожне має по 18 овальних отворів розміром 72×27 мм.

Полиці та стінка виготовляються зі сталі S420NL.

Сталь S420NL (EN 10025-3) — нормалізована дрібнозерниста конструкційна сталь підвищеної міцності, що відрізняється хорошою зварюваністю, високою межею плинності та ударною в'язкістю навіть при низьких температурах (до –50 °C). Застосовується у мостобудуванні, вантажопідйомних конструкціях та важкій техніці [20].

Ребра жорсткості та анкери виготовляються зі сталі S355.

Сталь S355 (EN 10025-2) — високоміцна конструкційна сталь, відрізняється хорошою зварюваністю, високою міцністю та помірною в'язкістю, що робить її незамінною в мостобудуванні та виробництві важкої техніки [21].

Кутики виготовляються зі сталі C245.

Сталь спеціального призначення C245 (ГОСТ 27772-2015) застосовується для виготовлення прокату, призначеного для будівельних

конструкцій зі зварними або іншими з'єднаннями. Сталь зварюється без обмежень і широко використовується в будівництві [22].

Хімічний склад та фізико-механічні властивості сталей S420NL, S355 та C245 наведені в табл. 1.2 та 1.3 відповідно [20 – 22].

Таблиця 1.2. Хімічний склад сталей S420NL, S355 та C245

Елемент	S420NL	S355	C245
C	≤0,20	≤0,24	≤0,22
Mn	1,00–1,70	≤1,60	≤1,00
V	≤0,20	—	—
Cr	≤0,30	—	≤0,30
Ni	≤0,80	—	≤0,30
Mo	≤0,10	—	—
Cu	≤0,55	≤0,55	≤0,30
P	≤0,025	≤0,025	≤0,04
S	≤0,020	≤0,025	≤0,025
Si	≤0,60	0,15–0,80	0,06–0,16

Таблиця 1.3. Фізико-механічні властивості сталей S420NL, S355 та C245

Властивість	S420NL	S355	C245
Межа міцності, МПа	500–720	470–630	370
Межа текучості, МПа	320–420(залежно від товщини)	355	235–245 (залежно від товщини)
Модуль пружності, ГПа	210	210	206
Відн. подовження, %	не менше 18	18–22	20–24
Густина, г/см³	7,85	7,85	7

Зварюваність конструкційних сталей, які використовуються у мостобудуванні, оцінюється за їхньою хімічною композицією, товщиною виробів та структурними особливостями. Ключовим параметром є вуглецевий еквівалент ($C_{екв}$), що характеризує схильність матеріалу до утворення холодних тріщин у зоні термічного впливу (ЗТВ). Розрахунок виконується за формулою (1.1) [23]:

$$C_{екв} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \quad (1.1)$$

де C, Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu – вміст відповідних елементів у %.

Вплив вуглецевого еквіваленту ($C_{екв}$) на зварюваність:

- $C_{екв} \leq 0,40\%$ – добра зварюваність, підігрів зазвичай не потрібний.

- $0,40\% < C_{\text{екв}} \leq 0,70\%$ – зварюваність обмежена, рекомендований попередній підігрів.
- $C_{\text{екв}} > 0,70\%$ – зварюваність різко погіршується, необхідний високотемпературний попередній і супутній підігрів, суворий контроль режимів [23].

Розрахуємо вуглецевий еквівалент для сталі S420NL за формулою (1.1):

$$C_{\text{екв}} = 0,17 + \frac{1}{6} + \frac{0,2 + 0,05 + 0,1}{5} + \frac{0,4 + 0,2}{15} = 0,45$$

Таким чином, сталь S420NL при $C_{\text{екв}} = 0,45\%$ характеризується задовільною зварюваністю, але потребує застосування попереднього підігріву та контролю тепловкладення для запобігання утворенню холодних тріщин.

Основними дефектами при зварюванні товстолистових елементів є:

- холодні тріщини у ЗТВ, що виникають через водень, високу жорсткість з'єднання та напруження;
- гарячі тріщини у металі шва при високому вмісті сірки та фосфору;
- ламкість при низьких температурах, зумовлена недостатньою ударною в'язкістю сталі [19].

Для легованої дрібнозернистої сталі S420NL схильність до утворення гарячих тріщин у зварних швах оцінюється за показником HCS (Hot Crack Susceptibility) [24].

Розрахунок виконується за формулою (1.2):

$$HCS = \frac{C(S + P + 0,04Si + 0,01Ni) \times 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V}, \quad (1.2)$$

де C, S, P, Si, Ni, Mn, Cr, Mo, V – вміст відповідних елементів у %.

Схильність до гарячих тріщин за показником HCS залежать від рівня міцності сталі:

- для сталей з межою міцності $\sigma_b < 700$ МПа матеріал вважається потенційно схильним до утворення гарячих тріщин у разі, якщо $HCS > 4$;
- для високоміцних сталей з $\sigma_b > 700$ МПа виникнення гарячих тріщин у зварних швах можливе вже за умови $HCS > 2$ [24].

Розрахуємо показник HCS для сталі S420NL за формулою (1.2):

$$HCS = \frac{0,17 \times (0,015 + 0,02 + 0,04 \times 0,3 + 0,01 \times 0,4) \times 10^3}{3 \times 1 + 0,2 + 0,05 + 0,1} = 2,6$$

Для сталі S420NL при номінальній товщині прокату ≤ 63 мм межа міцності становить $\sigma_b = 520\text{--}720$ МПа [25]. Оскільки гарантоване значення

					КР.131.6121м.03.01.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		13

межі міцності для даної сталі не перевищує 700 МПа, оцінку схильності до утворення гарячих тріщин доцільно виконувати за критерієм $HCS > 4$. За результатами розрахунку $HCS = 2,6$, що є меншим за критичне значення. Таким чином, сталь S420NL не виявляє схильності до утворення гарячих тріщин у зварних швах за умови дотримання раціональних режимів зварювання.

Для зниження ризику утворення тріщин застосовують:

- контроль вмісту домішок (S, P);
- застосування зварювальних матеріалів із низьким вмістом дифузійного водню (≤ 5 мл/100 г наплавленого металу) [26, 27].

Попередній підігрів

Попередній підігрів знижує швидкість охолодження зварного з'єднання, зменшуючи ризик утворення мартенситу та холодних тріщин, запобігає надмірному підвищенню твердості [28]. Температура підігріву ($T_{\text{під}}$) для легованих сталей з вуглецевим еквівалентом $C_{\text{екв}} > 0,4\%$ визначається формулою (1.3), °C [24]:

$$T_{\text{під}} = 350 \sqrt{[C_{\text{екв}}]} - 0,25,$$

де $[C_{\text{екв}}] = C_{\text{екв}}(0,005 \times \delta + 1)$. δ – товщина з'єднуваного металу, мм [24].

$$T_{\text{під}} = 350 \sqrt{0,5} - 0,25 = 175 \text{ °C}$$

Таким чином, сталь S420NL потребує попереднього підігріву до 175 °C для зниження ризику виникнення холодних тріщин.

1.3. Особливості та проблеми базової технології зварювання товстолистових елементів балок. Аналіз організаційних форм виробництва зварних балок

Зварювання товстолистових елементів ($t \geq 30$ мм), що застосовуються у конструкціях мостових балок, супроводжується низкою технологічних проблем, які знижують продуктивність процесу та впливають на якість кінцевого виробу [29].

1. Зварювальні деформації та залишкові напруження.

При зварюванні великих елементів відбувається нерівномірний розподіл теплових потоків, що зумовлює:

- поперечні та поздовжні деформації;
- викривлення полиць і стінок балок;
- появу залишкових напружень, які знижують втомну міцність конструкції.

					КР.131.6121м.03.01.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		14

Особливо небезпечні деформації у поясних швах, оскільки вони змінюють геометрію балки та ускладнюють монтаж у прогоновій споруді [29].

2. Велика кількість проходів.

Для забезпечення провару у стикових та таврових з'єднаннях товщиною понад 40 мм необхідно виконувати багатопрохідне зварювання [30]. Це призводить до:

- значного збільшення тривалості зварювального циклу;
- підвищених витрат зварювальних матеріалів та електроенергії;
- накопичення теплового впливу, що збільшує зону структурних змін у сталі (зростання зерна, утворення твердих структур у ЗТВ) [30, 31].

3. Небезпека дефектів у зварних швах.

При традиційних технологіях (ручне дугове або механізоване зварювання) зростає ймовірність виникнення дефектів, зокрема:

- пори – внаслідок недостатнього захисту зони зварювання або наявності вологи у флюсі/дроті;
- підрізи – при неправильному положенні електрода або надмірному струмі;
- шлакові включення – при недостатньому очищенні між проходами;
- непровари – через недостатню теплову енергію дуги чи неправильну підготовку кромок.

Такі дефекти суттєво знижують втомну міцність з'єднань і вимагають додаткового неруйнівного контролю (ультразвуковий, рентгенографічний) [32].

4. Низька продуктивність традиційних методів.

Через багатопрохідність, потребу у підігріві та додатковий контроль якості, продуктивність ручного та напівавтоматичного зварювання товстолистових елементів є недостатньою для сучасних потокових ліній виготовлення мостових балок. Це обмежує можливість їх застосування у масовому виробництві [9, 10].

У сукупності зазначені проблеми визначають необхідність пошуку високопродуктивних автоматизованих методів (наприклад, SAW Twin Arc, Tandem Arc), які дозволяють знизити кількість проходів, мінімізувати деформації та забезпечити стабільну якість зварних швів [9, 10].

Перехід від ручного та механізованого зварювання до автоматизованих і механізованих ліній є ключовим напрямом розвитку технологій виготовлення мостових балок. Такі системи поєднують операції складання,

зварювання, транспортування та контролю в єдиний технологічний цикл, що дозволяє істотно знизити трудомісткість виробництва, підвищити точність геометрії та стабільність якості зварних швів. Завдяки цьому забезпечується висока продуктивність і ефективне виготовлення товстостінних елементів балок із мінімальними деформаціями [33, 34]. Типові приклади сучасних установок, що застосовуються у таких лініях, наведено на рис. 1.2 та 1.3. Приклад автоматичної зварювальної машини портального типу наведено на рис. 1.4 [34].

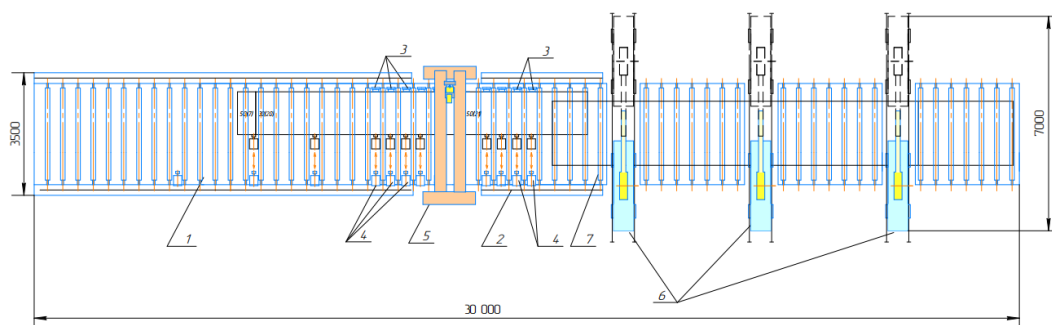


Рис. 1.2. Установка для автоматизованого зварювання полотнищ та листів балок (двотавра): 1. Рольганг; 2. Флюсова подушка; 3. Упори для позиціонування листів; 4. Штовхачі для притискання листів до упорів; 5.

Портал у комплекті зі зварювальною установкою (для автоматичного зварювання під флюсом); 6. Кантувач (книжкового типу на візку); 7. Рольганг

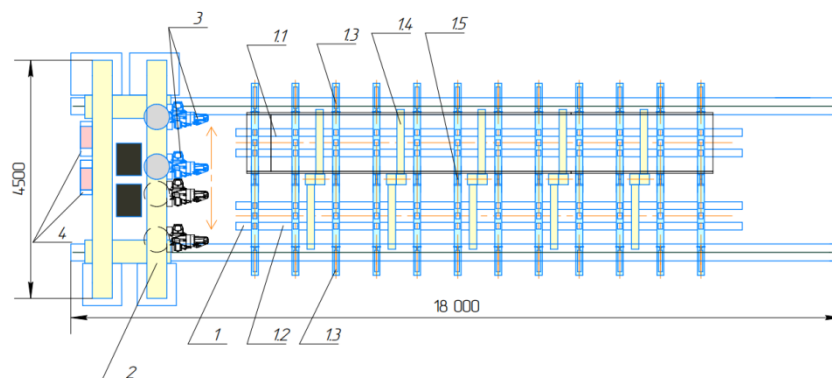


Рис. 1.3. Установка для складання та автоматичного зварювання двотаврових балок: 1. Складальний стенд; 1.1. Перша позиція стенду; 1.2. Друга позиція стенду; 1.3. Гідравлічні притиски; 1.4. Кантувач; 1.5. Упори; 2. Портал зі зварювальним обладнанням; 3. Комплект зварювального обладнання для SAW-зварювання (під флюсом); 4. Комплект зварювального обладнання для MIG-MAG зварювання



Рис. 1.4. Автоматична зварювальна машина портального типу

Серед сучасних механізованих рішень для виготовлення зварних балок ключове місце займають автоматизовані лінії типу HBWL (H-Beam Welding Line) та BWM (Beam Welding Machine). Ці комплекси забезпечують інтеграцію операцій складання, зварювання та виправлення геометрії, що дозволяє підвищити продуктивність і якість виробництва мостових балок у порівнянні з традиційними методами. Основні технічні параметри систем наведено у табл. 1.4 [9, 10].

Таблиця 1.4. Основні технічні параметри систем

Параметр	HBWL	BWM
Тип виробництва	Потокова лінія для складання та зварювання Н-балок	Універсальна машина для зварювання балок
Тип зварювання	Автоматичне дугове зварювання під флюсом (SAW, Tandem Arc)	Автоматичне дугове зварювання під флюсом (SAW, Twin/Tandem Arc)
Діапазон товщин стінки, мм	6–80	6–60
Діапазон товщин полиць, мм	6–50	6–40
Макс. висота балки, мм	до 2000	до 1500
Макс. довжина балки, м	15–18	12–15
Система контролю	Автоматичне центрування, виправлення геометрії	Механізми вирівнювання полиць і стінок
Продуктивність	Висока (потокове виробництво, мінімальна участь оператора)	Середня/висока (гнучкість при серійно-дрібносерійному виробництві)
Застосування	Масове виготовлення мостових і будівельних балок	Гнучке виробництво з різною номенклатурою

Загальний вигляд лінії з виробництва двотаврових балок наведено на рис. 1.5 [34].



Рис. 1.5. Лінія по виробництву двотаврових балок (загальний вигляд)

Аналіз характеристик [9, 10]:

1. Продуктивність. Лінії HBWL завдяки потоковій організації та повній автоматизації забезпечують продуктивність, що у 2–3 рази перевищує показники універсальних машин BWM, і у 5–7 разів — показники напівавтоматичного зварювання. BWM поступаються за швидкістю, проте залишаються більш універсальними при невеликих серіях.

2. Точність виготовлення. HBWL обладнані автоматичними системами центрування та виправлення геометрії, що дозволяє утримувати відхилення у межах $\pm 1,5$ мм по висоті та ширині балки. У BWM точність залежить від участі оператора та налаштувань обладнання, проте контроль частково автоматизований.

3. Зварювання балок змінного перерізу. HBWL здатні ефективно працювати з балками як сталого, так і змінного перерізу завдяки синхронізованим приводам подачі та адаптивному керуванню швидкістю зварювання. У BWM така можливість реалізована обмежено, що знижує їхню придатність для складних мостових конструкцій.

4. Діапазон товщин і розмірів. HBWL дозволяють виготовляти балки зі стінками завтовшки до 80 мм та полиць до 50 мм, з максимальною висотою до 2000 мм і довжиною до 18 м. Для BWM ці параметри дещо нижчі: товщина стінки до 60 мм, полиць до 40 мм, висота балки до 1500 мм, довжина до 15 м. Цей діапазон достатній для більшості будівельних і частини

мостових конструкцій, проте для важких прогонових споруд потрібні саме HBWL.

HBWL є оптимальним рішенням для масового виробництва мостових балок зі стабільною якістю та високою продуктивністю, тоді як BWM доцільніше використовувати у підприємствах із меншою номенклатурою та середньою серійністю виробництва. Обидві системи демонструють високий рівень автоматизації й забезпечують відповідність сучасним вимогам до точності та довговічності зварних мостових конструкцій [9, 10].

1.4. Висновки та постановка завдань кваліфікаційної роботи

Аналіз базової технології виготовлення великогабаритних мостових балок показав низку суттєвих проблем, що обмежують ефективність виробництва та надійність експлуатації зварних конструкцій у мостобудуванні.

1. Продуктивність.

Традиційні технології виготовлення балок, що спираються на ручне або напівавтоматичне дугове зварювання, характеризуються низькою швидкістю виконання операцій, значними витратами праці та необхідністю багаторазових проходів при зварюванні товстостінних елементів. Це призводить до зниження темпів виготовлення прогонових конструкцій та підвищення їх собівартості. Навіть при використанні окремих автоматизованих систем (BWM) продуктивність залишається недостатньою для масового будівництва сучасних мостових споруд [1, 9 – 10].

2. Проблеми при зварюванні товстостінних елементів.

Зварювання листів товщиною понад 40–50 мм супроводжується виникненням значних зварювальних деформацій, високим ризиком утворення дефектів (гарячих тріщин, пор, непроварів), а також потребою у ретельному попередньому та супутньому підігріві. Це ускладнює контроль якості та збільшує тривалість виробничого циклу. При використанні класичних процесів SAW (Single Arc) для зварювання товстолистових елементів зростає потреба у великій кількості проходів, що знижує економічність технології та підвищує ймовірність накопичення дефектів [29, 30].

3. Вимоги до точності.

Мостові балки належать до категорії конструкцій підвищеної відповідальності. Будь-які відхилення від проектних геометричних параметрів можуть спричинити концентрацію напружень, зниження втомної міцності та скорочення терміну служби споруди. Тому для забезпечення

					КР.131.6121м.03.01.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		19

відповідності нормативам (ДБН В.2.3-26:2024, ДСТУ EN 1993-1-1:2010, ДСТУ EN 1993-1-8:2011) необхідні сучасні технологічні рішення, здатні гарантувати високу точність складання та стабільну якість зварних з'єднань [1, 4, 5].

4. Обмеженість організаційних форм виробництва.

Ручне та напівавтоматичне зварювання, які й досі застосовуються на частині підприємств, не відповідають сучасним вимогам щодо серійності та продуктивності. Використання універсальних автоматизованих машин (BWM) дає змогу підвищити якість, проте не забезпечує масштабності й стабільності потокового виробництва. Повноцінну відповідь на потреби мостобудування дають лише спеціалізовані автоматизовані лінії (HBWL), але їх застосування потребує попереднього наукового обґрунтування вибору методів зварювання, режимів роботи та проектування допоміжного обладнання [9, 10, 34].

Виходячи з виявлених проблем, у кваліфікаційній роботі ставляться такі основні завдання:

1. Розробити технологію високопродуктивного зварювання товстолистових елементів мостових балок, що забезпечує мінімізацію деформацій, зменшення кількості проходів і підвищення якості зварних з'єднань.

2. Обґрунтувати вибір оптимальних методів автоматичного зварювання (SAW Single Arc, Twin Arc, Tandem Arc) для поясних і стінових швів балок із урахуванням вимог до міцності, втомної довговічності та продуктивності.

3. Виконати розрахунки режимів зварювання стикових і таврових з'єднань, а також провести розрахункову оцінку зварювальних деформацій із метою забезпечення нормативної точності геометрії балок.

4. Розробити методику експериментального дослідження зварних з'єднань та провести випробування для підтвердження працездатності обраної технології.

5. Сформулювати структурну схему механізованого технологічного процесу виготовлення балок, вибрати зварювальні матеріали й обладнання, а також виконати розрахунок допоміжної технологічної оснастки.

6. Спроектувати механізовану потокову лінію (далі – МПЛ) складання і зварювання балок, включаючи оцінку варіантів її структурних схем, побудову циклограми роботи та розробку технологічного плану розміщення у прольоті цеху.

7. Розробити заходи з охорони праці та техніки безпеки при експлуатації зварювального обладнання та організації потокового виробництва.

8. Виконати економічне обґрунтування проєкту МПЛ, оцінити доцільність упровадження розробленої технології з урахуванням витрат на обладнання, експлуатацію та зниження собівартості продукції.

					КР.131.6121м.03.01.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		21

					КР.131.6121м.03.02.06.ПЗ							
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата								
Студент	Гунченко О.В.				Дослідження технології високопродуктивного зварювання товстолистових елементів балок					Аркуш	Аркушів	
Керівник	Драган С.В.										22	
Консульт.	.								НУК ім. адм. Макарова			
Зав. Кафед.	Драган С.В.											

2. Дослідження технології високопродуктивного зварювання товстолистових елементів балок

2.1. Обґрунтування вибору методів високопродуктивного автоматичного зварювання поясних швів балок

Для виготовлення великогабаритних мостових балок найбільш поширеним є дугове зварювання під флюсом (SAW, Submerged Arc Welding), яке забезпечує стабільну якість та можливість механізації процесу. Залежно від вимог до продуктивності застосовуються різні схеми організації дуги [34, 35].

SAW Single Arc (однодугове зварювання).

Це базовий варіант дугового зварювання під флюсом, при якому використовується один електродний дріт (рис. 2.1). Метод характеризується високою якістю шва та добрим формуванням кореня, але при зварюванні товстостінних елементів ($t \geq 30$ мм) потребує багатопрохідного виконання. Застосовується для стикових і таврових швів у малосерійних конструкціях [36].

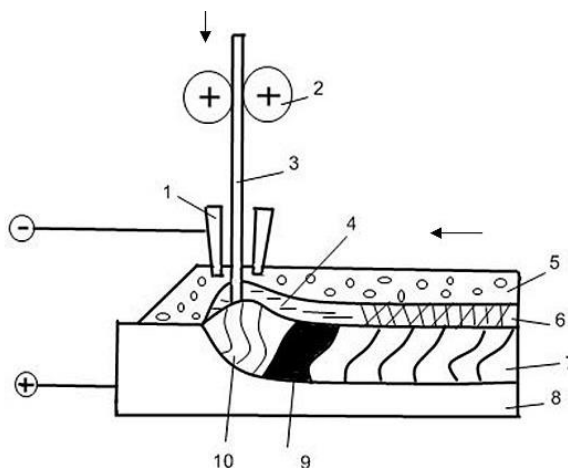


Рис. 2.1. Схема однодугового зварювання під флюсом: 1 – струмопідвід, 2 – механізм подачі дроту, 3 – дріт, 4 – рідкий шлак, 5 – флюс, 6 – шлакова кірка, 7 – зварний шов, 8 – основний метал, 9 – зварювальна ванна, 10 – електрична дуга

SAW Twin Arc (зварювання двома електродами в одній ванні).

У цьому варіанті два електроди зварюють в одній зварювальній ванні з використанням спільного шару флюсу. Це підвищує продуктивність у 1,5–2 рази порівняно з однодуговим зварюванням, зменшує кількість проходів і знижує тепловий вплив на метал. Метод придатний для таврових та стикових швів балок середньої та великої товщини [37]. Схема зварювання двома електродами в одній ванні наведена на рис. 2.2.

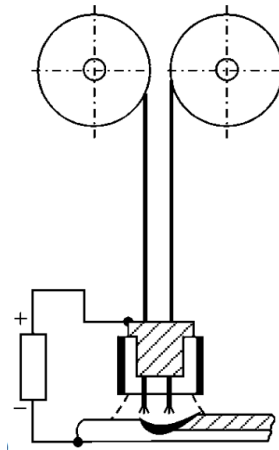


Рис. 2.2. Схема зварювання двома електродами в одній ванні

Однак процес потребує спеціального контактного складання для витримування високої температури від двох дротів, оскільки звичайні наконечники для ручного зварювання швидко зношуються при інтенсивних циклах роботи. Налаштування обладнання ускладнене через необхідність використання складної конструкції контактних наконечників для двох дротів [38]. Крім того, у технології Twin Arc кожен електрод може працювати від окремого джерела живлення — зазвичай один на прямій полярності (DCER), інший на зворотній (DCEN). Така схема дозволяє ефективніше розподіляти тепловий потік між електродами, покращуючи проплавлення і формування шва, але вимагає використання двох незалежних джерел живлення, що підвищує вартість і складність системи. Саме через потребу у двох контурах живлення Twin Arc є менш економічним рішенням порівняно з Tandem Arc [37].

SAW Tandem Arc (послідовне дво– або багатодугове зварювання).

Цей метод передбачає розташування декількох електродів уздовж напрямку шва з утворенням послідовних зварювальних ванн. Завдяки цьому досягається:

- значне підвищення продуктивності (у 2–3 рази порівняно з Single Arc);
- можливість виконання швів великої площі за меншу кількість проходів;
- стабільне формування металу шва з мінімізацією дефектів [37].

Схема послідовного дводугового зварювання та приклади устаткування наведені на рис. 2.3 та 2.4 відповідно.

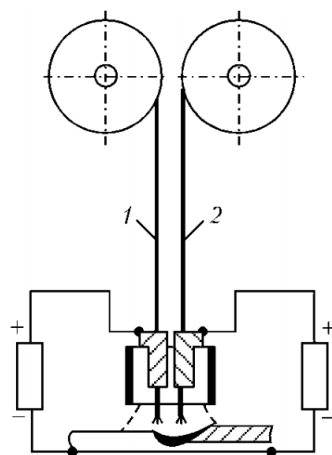


Рис. 2.3. Схема послідовного дводугового зварювання



Рис. 2.4. Устаткування для дводугового зварювання

У порівнянні з SAW Twin Arc, SAW Tandem Arc надає більш широкі можливості для керування тепловкладенням у зону зварювання, сприяє підвищенню стійкості металу шва до утворення гарячих і холодних тріщин завдяки можливості забезпечити оптимальні швидкості охолодження [39, 40]. Крім того, механічні характеристики зварних з'єднань при дводуговому зварюванні значно покращуються. Продуктивність цього процесу може досягати 6–9 кг/год. Застосування дводугового зварювання забезпечує стабільну якість зварних швів навіть при вузькій роздільній кромці [37]. Саме Tandem SAW є найбільш перспективним для потокових ліній виготовлення мостових балок, що підтверджується досвідом промислових ліній CORIMPEX типу HBWL та BWM. Ці установки забезпечують високу точність геометрії та здатність зварювати балки змінного перерізу з товщиною стінки до 80 мм [9, 10].

У виробництві балок великої товщини ефективним є застосування модифікованих багатодугових схем з комбінованим струмом (постійним для передньої дуги та змінним для задньої). Це дозволяє зменшити глибину зони

термічного впливу, покращити структуру металу шва та знизити ризик утворення тріщин у сталі S420NL з підвищеним вуглецевим еквівалентом. У поєднанні з автоматизованим контролем подачі флюсу та відстеженням шва системи Tandem SAW формують рівномірне проплавлення по всій товщині стику навіть при змінному перерізі балки [34, 37].

На підставі проведеного аналізу методів високопродуктивного зварювання для товстолистових елементів обираємо технологію SAW Tandem Arc, оскільки вона забезпечує найкраще співвідношення продуктивності, стабільності процесу та керованості тепловкладення. Завдяки можливості формувати якісний шов за мінімальної кількості проходів і зменшувати ризик дефектів цей метод є найбільш раціональним для виготовлення мостових балок великої товщини та змінного перерізу, що визначає його перевагу над однодуговими та двоелектродними схемами [37].

Організаційні форми виробництва зварних балок можна класифікувати за рівнем механізації та автоматизації зварювального процесу: ручне, механізоване та автоматичне потокове виробництво [34, 37]. У межах даної роботи розглядається технологія виготовлення товстостінних мостових балок, для яких доцільним є застосування автоматичного та механізованого зварювання. Такі методи забезпечують необхідну точність, повторюваність геометрії та стабільну якість швів.

Механізоване потокове виробництво.

- Передбачає інтеграцію операцій складання, зварювання, транспортування та контролю в єдину технологічну лінію.
- Переваги: максимальна продуктивність, точність геометрії, мінімізація людського фактора, можливість виготовлення балок змінного перерізу.
- Приклади: сучасні автоматизовані лінії зварювання балок CORIM.

PEX типу HBWL та BWM, які забезпечують зварювання стінок товщиною до 80 мм та автоматичний контроль геометрії [9, 10, 34].

Удосконалення таких систем полягає у впровадженні адаптивних алгоритмів керування дугою, які автоматично коригують параметри струму та швидкість подачі електродів залежно від товщини стінки та температурного поля. Це дозволяє знизити споживання енергії на 10–15 % і підвищити стабільність форми шва. Крім того, застосування інтелектуальних систем моніторингу температури та деформацій у реальному часі дає змогу контролювати процес зварювання товстостінних елементів без зупинки виробничого циклу [9, 10, 34].

Таким чином, оптимальним методом високопродуктивного зварювання поясних швів мостових балок є автоматичне багатодугове зварювання під флюсом типу Tandem SAW, реалізоване у складі механізованих потокових ліній. Цей підхід забезпечує поєднання високої швидкості зварювання, стабільної якості шва, зменшення теплових деформацій та можливість виготовлення балок великої товщини (до 80 мм) у промислових масштабах.

2.2. Розрахунки режимів зварювання стикових і таврових з'єднань

Для таврових з'єднань, а також для стикових з'єднань зі скосом кромek режими зварювання розраховуємо за площею наплавленого металу. Розрахунок виконується за схемою [41]:

$$s \rightarrow d_e \rightarrow I_{зв} \rightarrow U_o \rightarrow F_n \rightarrow V_{зв} \rightarrow V_{др}$$

В залежності від товщини металу (катету шва) обираємо діаметр електрода, від якого залежить зварювальний струм $I_{зв}$. Для механізованих способів зварювання та автоматичного зварювання під флюсом:

$$I_{зв} = \left(\frac{\pi d_e^2}{4} \right) \times j, \quad (2.1)$$

де j – допустима густина струму, вибирається у залежності від діаметра електродного дроту d_e .

Напруга на дузі для механізованих способів зварювання та автоматичного зварювання під флюсом:

$$U_o = 20 + \left(\frac{50 \times 10^{-3}}{\sqrt{d_e}} \right) \times I_{зв} \pm 1B, \quad (2.2)$$

де d_e – діаметр електрода, мм.

Площа шару наплавленого металу F визначається геометрією зварного з'єднання, за один прохід для механізованого зварювання $F = 30 - 70 \text{ мм}^2$.

Швидкість зварювання $V_{зв}$ (см/с) розраховується за формулою:

$$V_{зв} = \frac{\alpha_n I_{зв}}{36\gamma F_i}, \quad (2.3)$$

де α_n – коефіцієнт наплавлення; F_i – площа шару, наплавленого за один прохід (см^2); γ – щільність металу електродного дроту ($\gamma = 7,9 \text{ г/см}^3$).

Кількість проходів залежить від площі наплавленого металу всього з'єднання (F_n) і площі одного проходу (F_n, F_1). $F_i = 30 - 70 \text{ мм}^2$ для механізованого і автоматичного зварювання, $F_1 \leq 30 \text{ мм}^2$.

$$n = \frac{(F_n - F_1)}{F_i} + 1 \quad (2.4)$$

Швидкість подачі дроту, м/год

					КР.131.6121м.03.02.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		27

$$V_{no} = \frac{4\alpha_{\rho} I_{36}}{\pi d_e^2 \gamma} \quad (2.5)$$

де α_{ρ} – коефіцієнт розплавлення електрода.

$$\alpha_{\rho} = 7 + 0,04 \frac{I_{36}}{d_e}$$

$\alpha_n = \alpha_{\rho} (1 - \psi)$, де $\psi = 2\%$.

Ефективна теплова потужність, Дж

$$Q_e = I_{36} \times U_{\partial} \times \eta \quad (2.6)$$

де η – ефективний ККД нагріву (для механізованого зварювання в газовій суміші $\eta = 0,75$; для автоматичного зварювання під флюсом $\eta = 0,85$).

Погонна енергія, Дж/см

$$q_n = \frac{I_{36} \times U_{\partial} \times \eta}{V_{36}} \quad (2.7)$$

Продуктивність наплавлення, кг/год

$$G_n = \alpha_n I_{36} 10^{-3}, \quad (2.8)$$

Спочатку розраховуємо таврові та стикові з'єднання для автоматичного зварювання під флюсом, а далі — для механізованого зварювання в захисних газах.

Проведемо відповідні розрахунки за формулами, вказаними вище.

Таврове з'єднання (рис. 2.5). Поясний шов

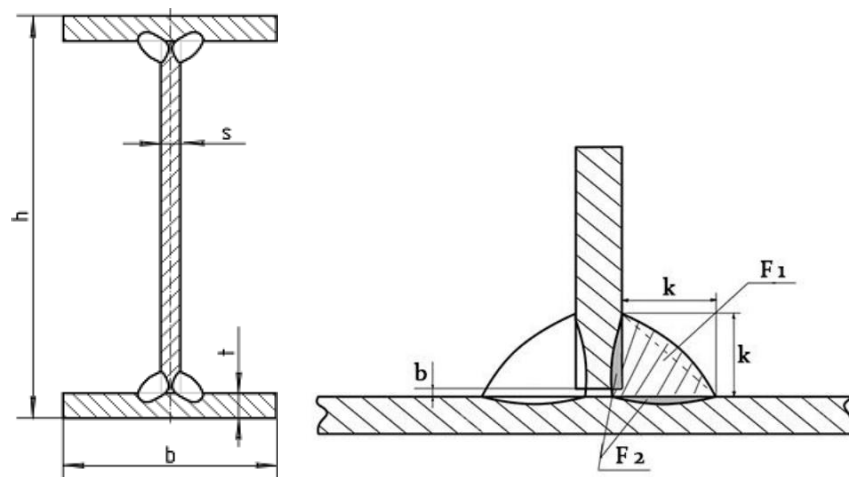


Рис. 2.5. Таврове з'єднання

Приймаємо катет шва $k = 22$ мм

$s = 30$ мм

$d_e = 3$ мм

$L_{ш} = 9,152$ м

$F_1 = 30$ мм²

$$F_i = 59 \text{ мм}^2$$

Площа шару наплавленого металу визначається за формулою (2.9) [41]:

$$F_n = \frac{k^2}{2} + 1,05k \quad (2.9)$$

$$F_n = \frac{22^2}{2} + 1,05 \times 22 = 265 \text{ мм}^2.$$

$$n = \frac{265 - 30}{59} + 1 = 3,9 + 1 = 5 \text{ проходів.}$$

Для автоматичного зварювання під флюсом $j = 45 - 90$, тоді зварювальний струм:

$$I_{зв} = \left(\frac{3,14 \times 3^2}{4} \right) \times 85 = 600 \text{ А, при дводуговому зварюванні } I_{зв} = 1200 \text{ А.}$$

Напруга на дузі

$$U_d = 20 + \left(\frac{50 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} \right) \times 600 = 29 \pm 1 \text{ В.}$$

Приймаємо $U_d = 29 \text{ В.}$

$$\alpha_p = 7 + 0,04 \times \frac{600}{3} = 15 \text{ г/(А} \times \text{год)}$$

$$\alpha_n = 15 \times 0,98 = 14,7 \text{ г/(А} \times \text{год)}$$

Швидкість зварювання

$$V_{зв} = \frac{14,7 \times 600}{36 \times 7,9 \times 0,59} = 52 \text{ см/хв} = 8,6 \text{ мм/с} = 31 \text{ м/год} = 0,86 \text{ см/с}$$

Швидкість подачі дроту

$$V_{пд} = \frac{4 \times 15 \times 600}{3,14 \times 3^2 \times 7,9} = 161,25 \text{ м/год}$$

Ефективна теплова потужність

$$Q_e = 600 \times 29 \times 0,85 = 14790 \text{ Дж}$$

Погонна енергія

$$q_n = \frac{600 \times 29 \times 0,85}{0,86} = 17197,7 \text{ Дж/см}$$

Продуктивність наплавлення

$$G_n = 14,7 \times 600 \times 10^{-3} = 8,82 \text{ кг/год}$$

Основний час зварювання розраховуємо за формулою (2.10) [41]:

$$T_o = \frac{n}{V_{36}} \times k_3 \quad (2.10)$$

					КР.131.6121м.03.02.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		29

$$T_o = \frac{2,5}{31} \times 1,25 = 0,1 \text{ год (на 1 м)}$$

$$T_{\text{заг}} = 0,1 \times 9,152 \times 4 = 3,66 \text{ год (на всі поясні шви).}$$

Стикове з'єднання 2.5.5 (рис. 2.6). Стінка

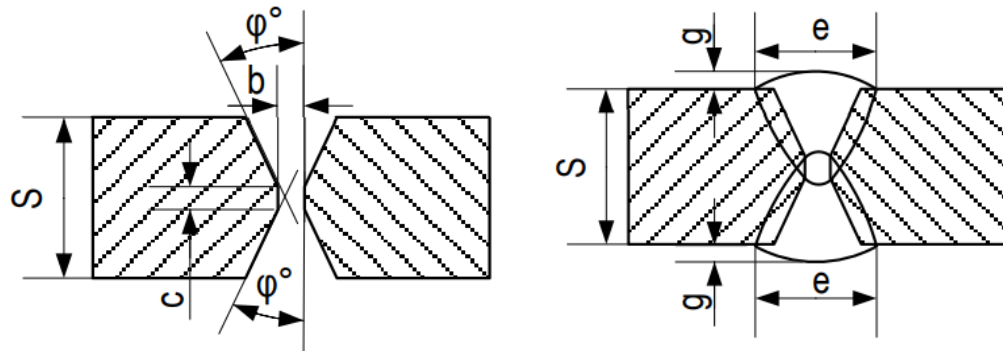


Рис. 2.6. Стикове з'єднання

$$F_H = \frac{s \times b + 2 \times 0,75eg + (s - c)^2}{2 \times \tan \alpha / 2} \quad (2.11)$$

$$F_H = \frac{30 \times 1 + 2 \times 0,75 \times 28 \times 2,5 + (30 - 8)^2}{2 \times 0,2679} = 199,8 \text{ мм}^2 = 200 \text{ мм}^2.$$

$$F_1 = 30 \text{ мм}^2$$

$$F_i = 62 \text{ мм}^2$$

$$n = \frac{100 - 30}{62} + 1 = 1,1 + 1 = 3 \text{ проходи (з одного боку).}$$

$$T_o = \frac{3}{30} \times 1,25 = 0,125 \text{ год (на 1 м)}$$

$$T_{\text{заг}} = 0,125 \times 2,8 = 0,35 \text{ год (два шва з одного боку).}$$

Стикове з'єднання 2.5.5. Полиця верхня

$$T_o = 0,125 \text{ год (на 1 м)}$$

$$T_{\text{заг}} = 0,125 \times 1,6 = 0,2 \text{ год (два шва з одного боку).}$$

Стикове з'єднання 2.5.5. Полиця нижня

Площу наплавки розраховуємо за формулою (2.11):

$$F_H = \frac{30 \times 1 + 2 \times 0,75 \times 28 \times 2,5 + (50 - 8)^2}{2 \times 0,2679} = 399,3 \text{ мм}^2 = 400 \text{ мм}^2.$$

$$F_1 = 30 \text{ мм}^2$$

$$F_i = 50 \text{ мм}^2$$

$$n = \frac{200 - 30}{50} + 1 = 3,4 + 1 = 5 \text{ проходів (з одного боку).}$$

$$T_o = \frac{5}{30} \times 1,25 = 0,2 \text{ год (на 1 м)}$$

$$T_{\text{заг}} = 0,2 \times 1,6 = 0,3 \text{ год (два шва з одного боку).}$$

Розраховані параметри для стикових з'єднань 2.5.5 наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Розраховані параметри для стикових з'єднань 2.5.5

Тип з'єднання	s, мм	d _с , мм	I _{зв} , А	U _д , В	F _п , мм ²	V _{зв} , м/год	V _{пл} , м/год	Q _с , Дж	q _р , Дж/см	G _п , кг/год
Стикове з'єднання 2.5.5 / Стіна	30	4	600	35	200	30	90,7	17 850	20755,8	8,82
Стикове з'єднання 2.5.5 / Полиця верхня	30	4	600	35	200	30	90,7	17 850	20755,8	8,82
Стикове з'єднання 2.5.5 / Полиця нижня	50	4	600	35	400	30	90,7	17 850	20755,8	8,82

Таврове з'єднання. Ребра жорсткості

Катет шва k = 12 мм

s = 20 мм

d_с = 1,4 мм

L_ш = 3,9 м (на 1 ребро)

Кількість ребер – 14 шт.

Для механізованого зварювання в суміші 80% Ar + 20% CO₂ j = 90 – 150 А/мм². Тоді зварювальний струм:

$$I_{\text{зв}} = \left(\frac{3,14 \times 1,4^2}{4} \right) \times 130 = 200 \text{ А}$$

Напруга на дузі

$$U_{\text{д}} = 20 + \left(\frac{50 \times 10^{-3}}{\sqrt{1,4}} \right) \times 200 = 29 \pm 1 \text{ В.}$$

Приймаємо U_д = 29 В.

Для зварювання дротами суцільного перерізу в газовій суміші із застосуванням інверторних синергетичних джерел живлення α_н = 18...22 г/(А×год) [41].

Приймаємо $\alpha_n = 20 \text{ г/(А×год)}$, тоді $\alpha_p = \frac{20}{1-\psi} = \frac{20}{0,98} = 20,4 \text{ г/(А×год)}$.

Площу наплавки розраховуємо за формулою (2.9):

$$F_n = \frac{12^2}{2} + 1,05 \times 12 = 84,6 \text{ мм}^2.$$

$$F_1 = 30 \text{ мм}^2$$

$$F_i = 54,6 \text{ мм}^2$$

$$n = \frac{84,6 - 30}{54,6} + 1 = 1 + 1 = 2 \text{ проходи.}$$

Швидкість зварювання

$$V_{зв} = \frac{20 \times 200}{36 \times 7,9 \times 0,546} = 15,48 \text{ м/год} = 0,43 \text{ см/с}$$

Швидкість подачі дроту

$$V_{пд} = \frac{4 \times 20,4 \times 200}{3,14 \times 1,4^2 \times 7,9} = 335,7 \text{ м/год}$$

Ефективна теплова потужність

$$Q_e = 200 \times 29 \times 0,75 = 4350 \text{ Дж}$$

Погонна енергія

$$q_n = \frac{200 \times 29 \times 0,75}{0,43} = 10116,3 \text{ Дж/см}$$

Продуктивність наплавлення

$$G_n = 20 \times 200 \times 10^{-3} = 4 \text{ кг/год}$$

Основний час розраховуємо за формулою (2.12) [41]:

$$T_o = \frac{F_1 \gamma}{I_1 \alpha_n} + \frac{F_i \gamma}{I_n \alpha_n}, \quad (2.12)$$

де F_1 — площа поперечного перерізу зварного шва для першого проходу, см^2 (приймається $0,2 \dots 0,4 \text{ см}^2$); F_i — площа поперечного перерізу шва для наступного проходу (приймається $0,3 \dots 0,7 \text{ см}^2$). $F_i = 54,6 \text{ мм}^2$.

$$T_o = \frac{30 \times 7,9}{200 \times 20} + \frac{54,6 \times 7,9}{200 \times 20} = 0,17 \text{ г (на 1 м)}$$

$$T_{заг} = 0,17 \times 3,9 = 0,65 \text{ г (на 1 ребро).}$$

$$T_{заг} \text{ на всі ребра} = 0,65 \times 14 = 9,1 \text{ год.}$$

Параметри режимів зварювання усіх розрахованих з'єднань наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Параметри режимів зварювання усіх розрахованих з'єднань

Параметр	Таврове з'єднання / Поясний шов	Стикове з'єднання 2.5.5 / Стіна	Стикове з'єднання 2.5.5 / Полиця (верхня)	Стикове з'єднання 2.5.5 / Полиця (нижня)	Таврове з'єднання / Ребра жорсткості
d_e , мм	3,0	4,0	4,0	4,0	1,4
$I_{зв}$, А	600 (при дводуговому зв. — 1200)	600	600	600	200
U_d , В	29	35	35	35	29
F_n , мм ²	265	200	200	400	84,6
$V_{зв}$, м/год	31	30	30	30	15,48
$V_{пд}$, м/год	161,25	90,7	90,7	90,7	335,7
Q_e , Дж	14 790	17 850	17 850	17 850	4 350
$q_{п}$, Дж/см	17 197,7	20 755,8	20 755,8	20 755,8	10116,3
G_n , кг/год	8,82	8,82	8,82	8,82	4,00

2.3. Розрахункова оцінка зварювальних деформацій балок

Для визначення необхідності введення в технологічний процес операцій усунення зварювальних деформацій поясних швів балки проведемо відповідні розрахунки. Загальна схема кутової деформації при зварюванні двотавра наведена на рис. 2.6 [3].

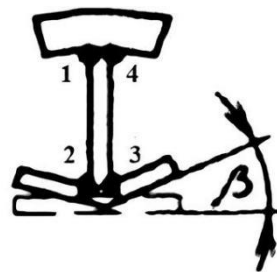


Рис. 2.6. Загальна схема кутової деформації при зварюванні двотавра

При заварюванні таврових з'єднань (2.7) кутова деформація складається з двох частин, обумовлених різними причинами. Перша – нерівномірне прогрівання полиці – аналогічна наплавленню валика на пластину, з тією лише різницею, що в даному випадку ступінь прогрівання по товщині полиці визначається не всією погонною енергією, а тільки її частиною, яка йде на нагрівання полиці $q_{п.п}$. Друга причина – ливарна усадка наплавленого металу між стінкою і полицею. По зовнішній поверхні шва ця усадка більша, ніж у вершині, тому спочатку прямий кут зменшується. Це зменшення не залежить від площі наплавлення і при однопрохідному зварюванні складає близько 0,02 рад (2.7, а) [3].

Загальна кутова деформація після заварювання таврового з'єднання з двох боків складається із залишкового повороту стінки відносно полиці у бік першого шва і зламу полиці на кут $\beta_{\Sigma} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_k$ (рис. 2.7) [3].

В тавровому з'єднанні після виконання кутового шва виникає поворот ребра відносно пластини на кут $\beta_0 = 0,02$ рад (ливарна усадка) [3].

Після зварювання другого шва виникає кутовий злам пластини.

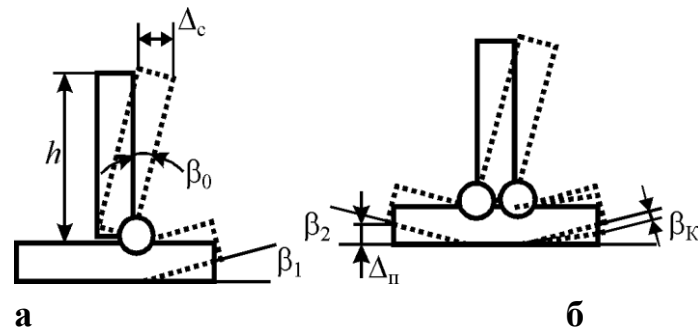


Рис. 2.7. Кутова деформація при зварюванні таврового з'єднання: а – виконання першого шва; б – виконання другого шва

Кути β_1 та β_2 визначаються за допомогою діаграми (рис. 2.8) у залежності від параметрів зони прогрівання пластини [3]. Для визначення кутів β_1 та β_2 потрібно попередньо визначити частку погонної енергії, яка йде на нагрівання пластини, до якої приварюється ребро жорсткості. Ця частина розраховується у залежності від співвідношення зварюваних товщин:

$$q_{п.п} = \frac{2s_{п}}{s_{р} + 2s_{п}} \times q_{п} \quad (2.13)$$

$$q_{п.п} = \frac{2 \times 30}{30 + 2 \times 30} \times 17197,7 = 11465 \text{ Дж/см.}$$

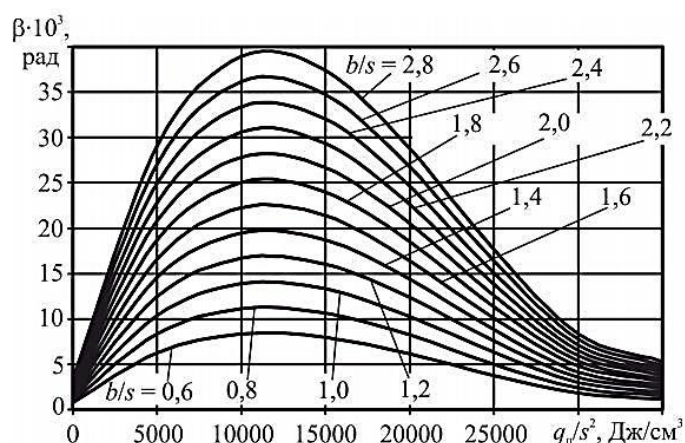


Рис. 2.8. Залежність кутових деформацій від питомої погонної енергії

Питома погонна енергія прогрівання пластини:

$$\frac{q_{n.n.}}{S_n^2} = \frac{11465}{9} = 1273,9 \text{ Дж/см}^3$$

Ширина прогрівання $b = 1,7k$; $b = 1,7 \times 2,2 = 3,74$ см; відносна ширина прогрівання $\frac{b}{s} = \frac{3,74}{3} = 1,25$ см.

Тоді, $\beta_1 = 0,002$ рад; $\beta_2 = \beta_1 = 0,002$ рад.

Кут повороту стінки відносно полиці при зварюванні двостороннього таврового шва:

$$\beta_k = 0,02 \left(\frac{k}{s_n} \right)^2 \quad (2.14)$$

$$\beta_k = 0,02 \left(\frac{2,2}{3} \right)^2 = 0,01 \text{ рад.}$$

Загальна кутова деформація

$$\beta_\Sigma = 0,002 + 0,002 + 0,01 = 0,014 \text{ рад.}$$

Максимальне відхилення кромки полиці

$$\Delta \Pi = \beta_\Sigma \frac{b_n}{4} \quad (2.15)$$

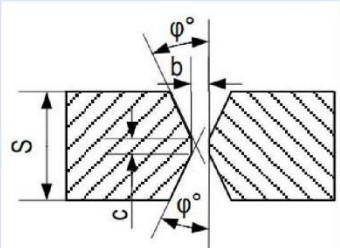
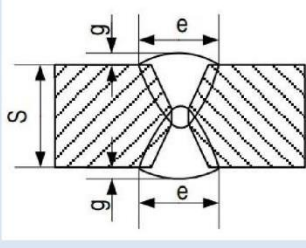
$$\Delta \Pi = 0,014 \times \frac{80}{4} = 0,28 \text{ см} = 2,8 \text{ мм.}$$

Грибоподібність практично не впливає на несучу здатність елементів та на наступні операції встановлення ребер жорсткості. Допустима в межах не більше ніж 15 мм [3]. Згідно з розрахунками, деформація допустима і не потребує правки.

2.4. Складання технологічної документації (WPS A-121-1-23).

Результати експериментального дослідження зварних з'єднань

Для забезпечення відповідності обраної технології високопродуктивного зварювання вимогам чинних міжнародних стандартів було розроблено Специфікацію процесу зварювання (WPS) № A-121-1-23 (ДСТУ EN ISO 15614-1:2019 [42]). Специфікація процесу зварювання наведена на рис. 2.9.

СПЕЦИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ (ДСТУ EN ISO 15614-1:2019)				WPS № A-121-1-23						
З'єднання: стикове з'єднання										
Конструктивні елементи підготовки кромки / 2.5.5 Dimensioning of clearing (Joint preparation): to ISO 9692-2: 1998				Конструктивні елементи зварного шва та технологія зварювання / Elements of weld and welding sequences: 2.5.5 to ISO 9692-2: 1998						
										
S, мм	b, мм	c, мм	$\phi_1 = \phi_2$, грд.	S, мм	e_1 , мм		e_2 , мм		g_1 , мм	g_2 , мм
30	1,5±0,5	6±0,5	30±3	30	23	±3	23	±3	3 ⁺¹ ₋₂	3 ⁺¹ ₋₂

Спосіб підготовки кромки:	термічна різка / механічна обробка
Вимоги по зачищенню кромки	механічне зачищення ≥ 25 мм
Основний метал:	S420NL – 1.3 за ISO/TR 15608:2017
Діапазон товщин	BW: 16 ÷ 64 мм

ВІДОМОСТІ ПРО ЗВАРЮВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ				
Присадні матеріали:	Марка	Тип електроду / Категорія	Класифікація	Діаметр електроду, мм
	OK Autrod 12.32 (ESAB)	S3Si	EN ISO 14171-A	4.0
Допоміжні матеріали:				
Захисний газ або флюс	Тип або марка	Витрата газу, л/мін		
		Захисного	Піддув зі зворотного боку	
OK Flux 10.71 (ESAB)	EN ISO 14174: S A AB 1 67 AC H5	не застосовується / N/A	не застосовується / N/A	

ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНОЛОГІЮ ЗВАРЮВАННЯ	
Положення при зварюванні: PA (нижнє)	
Схвалені положення при зварюванні: PA by ISO 6947:2019	
Струм та полярність:	постійний струм, зворотна полярність
Багатопрорідна:	багатопрорідна
Попередній підігрів:	175 °C залежить від C _{св.} та товщини

РЕЖИМИ ЗВАРЮВАННЯ						
Прохід №	Ø електрода, мм	Струм, А	Напруга, V	Швидкість зварюв. *, мм/с	Швидкість подачі дроту*, м/хв	Погонна енергія, кДж/мм
кореневий прохід(и)	4.0	560-600	28-30	8.3	N/A	1.89–2.17
заповнюючий прохід(и)	4.0	580-620	29-31	8.3	N/A	2.20–2.50
облицювальний прохід(и)	4.0	560-600	31-33	8.3 (50 см/хв)	N/A	2.24–2.54

Рис. 2.9. Специфікація процесу зварювання (WPS № A-121-1-23; ДСТУ EN ISO 15614-1:2019)

Макрошліф стикового зварного з'єднання, отриманий за результатами експериментального дослідження, наведено на рис. 2.10.

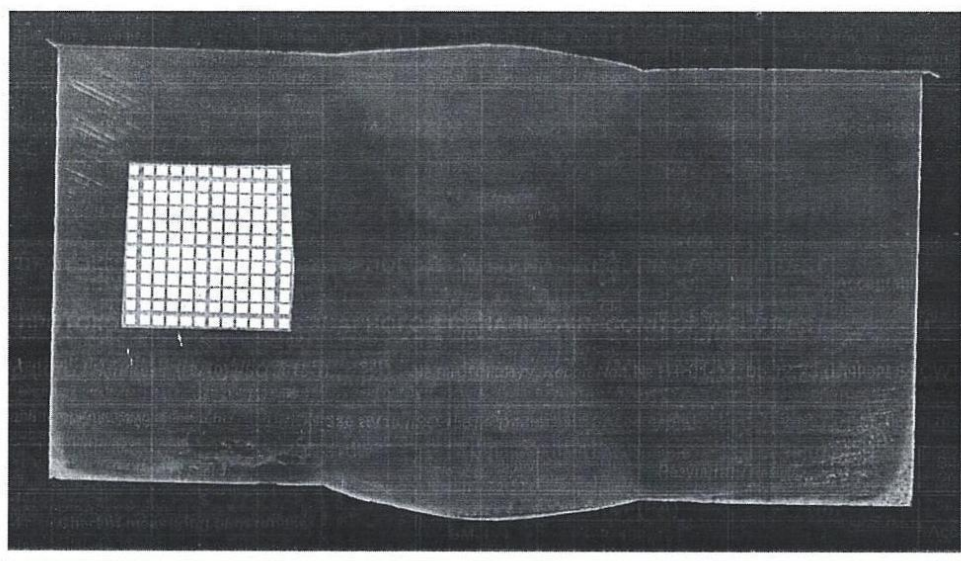


Рис. 2.10. Макрошліф стикового зварного з'єднання, отриманий за результатами експериментального дослідження

Висновки

1. З метою удосконалення технології зварювання товстостінних елементів мостових балок для виконання поясних швів обрано автоматичне багатодугове зварювання під флюсом Tandem SAW, яке забезпечує підвищену продуктивність (до 6–9 кг/год), стабільне формування шва та кероване тепловкладення.

2. Для поясних швів отримано такі параметри режиму зварювання: $I_{зв} = 600$ А (при двох дугах — 1200 А), $U_d = 29$ В, $V_{зв} = 31$ м/год; для стикових з'єднань 2.5.5: $I_{зв} = 600$ А; $U_d = 35$ В; $V_{зв} = 30$ м/год; для таврових з'єднань ребер жорсткості: $I_{зв} = 200$ А; $U_d = 29$ В; $V_{зв} = 15,48$ м/год.

3. Розрахована кутова деформація таврових з'єднань поясних швів становить $\beta\Sigma = 0,014$ рад, що відповідає максимальному відхиленню кромки $\Delta p = 2,8$ мм. Отримане значення значно менше допустимого (до 15 мм), тому технологія не потребує введення додаткових операцій правки деформацій.

4. На основі розрахованих режимів оформлено WPS A-121-1-23 (ДСТУ EN ISO 15614-1:2019). Експериментальний макрошліф стикового зварного з'єднання підтвердив якісне формування металу без дефектів.

Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата

КР.131.6121м.03.02.06.ПЗ

Арк.

37

					КР.131.6121м.03.03.06.ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент	Гунченко О.В.				Розробка технології механізованого виготовлення балок		Аркуш	Аркушів
Керівник	Драган С.В.						38	
Консульт.	.						НУК ім. адм. Макарова	
Зав. Кафед.	Драган С.В.							

3. Розробка технології механізованого виготовлення балок

3.1. Вибір зварювальних матеріалів та технологічного обладнання

З огляду на хімічний склад сталі та конструктивні особливості з'єднань, зварювальні матеріали мають бути максимально наближені за складом і властивостями до основного металу, що забезпечує сумісність, стабільне формування шва та необхідні механічні характеристики наплавленого металу.

Для автоматичного зварювання під флюсом товстостінних елементів балки обрано зварювальний дріт ОК Autrod 12.32, міднений, нелегований, призначений для зварювання низьковуглецевих та конструкційних сталей. Дріт загального призначення, що забезпечує стабільне горіння дуги, рівномірну подачу та надійну передачу зварювального струму завдяки якісному мідненню та контрольованим геометричним параметрам. ОК Autrod 12.32 характеризується добре визначеним хімічним складом і зменшеними допусками відносно стандартів, що забезпечує відтворюваність механічних властивостей металу шва під час тривалих циклів автоматизованого зварювання. Дріт застосовується для зварювання конструкційних, суднобудівних, котельних та дрібнозернистих сталей, а також інших відповідальних елементів [43]. Хімічний склад дроту ОК Autrod 12.3 наведено в табл. 3.1 [43].

Таблиця 3.1. Хімічний склад дроту ОК Autrod 12.32

Елемент	C	Mn	Si	P	S
%	0,11–0,15	1,65–1,80	0,25–0,35	max 0,015	max 0,010

Також обрано агломерований основний флюс багатоцільового призначення ОК Flux 10.71, який характеризується високими зварювально-технологічними властивостями. Флюс призначений для виконання одно- і багатопрхідних зварних швів на листах будь-якої товщини та може застосовуватись у комбінації з різними дротами як суцільного, так і порошкового перерізу. Наплавлений метал містить менше 5 мл водню на 100 г, що забезпечує високу якість і пластичність з'єднання. Флюс поєднує добрі пластичні властивості металу з відмінними технологічними характеристиками.

Швидкотвердіючий шлак та можливість виконання зварювання на високих швидкостях дозволяють ефективно використовувати флюс при горизонтальному виконанні поясних швів на вертикальних стінках. Флюс однаково добре працює як на постійному, так і на змінному струмі, забезпечуючи легке відокремлення шлаку та стабільне формування шва.

Незначне легування Si та Mn робить його придатним для багатопрохідного зварювання товстостінних виробів [44]. Хімічний склад флюсу OK Flux 10.71 наведено в табл. 3.2 [44].

Таблиця 3.2. Хімічний склад флюсу OK Flux 10.71

Хімічні сполуки	Al ₂ O ₃ +MnO	CaF ₂	CaO+MgO	SiO ₂ +TiO ₂
%	35	15	25	20

Для механізованого зварювання в газовій суміші обрано дріт OK AristoRod 12.50 ESAB та захисну газову суміш 80% Ar + 20% CO₂. Дріт є неомідненим та спеціально розробленим для процесів MAG-зварювання конструкційних і низьколегованих сталей, де важливими є стабільність дуги, низьке розбризкування та висока якість формування шва [45, 46].

OK AristoRod 12.50 має унікальну поверхневу обробку ASC (Advanced Surface Characteristics), що забезпечує рівномірну подачу, стабільне горіння дуги та зниження ймовірності порушення подачі дроту під час тривалих циклів механізованого зварювання. Висока чистота поверхні, контрольований діаметр по всій довжині та низький вміст домішок (S та P) дозволяють отримувати метал шва з високими механічними властивостями та мінімальною кількістю дефектів. Відсутність мідного покриття зменшує зношування контактних наконечників і сприяє підвищенню довговічності обладнання, що є особливо важливим при зварюванні на підвищених режимах у середовищі змішаного газу MAG [45]. Хімічний склад дроту OK AristoRod 12.50 наведено в табл. 3.3 [45].

Таблиця 3.3. Хімічний склад дроту OK AristoRod 12.50 ESAB

Елемент	C	Mn	Si	P	S
%	0,06 - 0,14	1,40 - 1,60	0,80 - 1,00	max 0,025	max 0,025

Для механізованого зварювання доцільно обрати захисну газову суміш 80 % Ar + 20 % CO₂, оскільки вона забезпечує струменеве перенесення металу та формування чашкоподібного профілю проплавлення основного металу, подібного до профілю, що утворюється при зварюванні у чистому CO₂. Така комбінація газів гарантує стабільність дуги, високоякісне формування шва та значно зменшує розбризкування металу у порівнянні з процесами з чистим CO₂. Практика показує, що зварювання у суміші 75–80 % Ar та 20–25 % CO₂ є ефективною альтернативою традиційним процесам у CO₂, поєднуючи переваги аргону у стабілізації дуги з активністю CO₂ для досягнення необхідної глибини проплавлення та пластичності наплавленого

металу [46]. Механічні властивості наплавленого металу, що забезпечуються обраним дротом ОК AristoRod 12.50 ESAB та захисною газовою сумішшю 80 % Ar + 20 % CO₂ наведено в табл. 3.4 [45].

Таблиця. 3.4. Механічні властивості наплавленого металу, що забезпечуються обраним дротом ОК AristoRod 12.50 ESAB та захисною газовою сумішшю 80 % Ar + 20 % CO₂.

Межа плинності, ст, МПа	Тимчасовий опір розриву, св, МПа	Відносне подовження, δ, %	Ударна в'язкість KCV, Дж/см ² (+20 °C)	Ударна в'язкість KCV, Дж/см ² (- 30 °C)	Ударна в'язкість KCU, Дж/см ² (- 60 °C)
470	560	26	130	70	≥34

Таким чином, для автоматичного зварювання під флюсом застосовуємо зварювальний дріт ОК Autrod 12.32 та флюс ОК Flux 10.71, що забезпечують стабільне формування шва, високу пластичність наплавленого металу та мінімальний вміст водню. Для механізованого зварювання в газовому середовищі обрано дріт ОК AristoRod 12.50 ESAB у поєднанні з захисною газовою сумішшю 80 % Ar + 20 % CO₂, що гарантує стабільність дуги, зменшене розбризкування та високу якість формування шва.

Зварювальний комплекс Jasic MZ-1250 (M310) для автоматичного дугового зварювання під флюсом (рис. 3.1; 3.2) включає інверторне джерело, блок керування МК-1 та зварювальний трактор АТ-1 з механізмом подачі дроту (касули до 25 кг), бункером флюсу та панеллю керування. Призначений для стикових, напусткових, кутових, таврових з'єднань і наплавлення. Забезпечує надійну роботу в умовах важкого виробництва, працює на постійному струмі, допускає товщину кромки до 60 мм і зварювання суцільним або порошковим дротом.



Рис. 3.1. Зварювальне джерело інверторного типу Jasic MZ-1250 (M310)

Модель MZ-1250 (M310) належить до інверторного типу за принципом роботи, що забезпечує тривалу роботу при високих значеннях струму та напруги, а також стабільність процесу зварювання. Джерело оснащено цифровими індикаторами основних параметрів, що дають змогу плавно та точно регулювати робочі режими [47]. Технічні характеристики зварювального джерела Jasіc MZ-1250 (M310) наведено в табл. 3.5 [47].

Таблиця 3.5. Технічні характеристики зварювального джерела Jasіc MZ-1250 (M310)

Параметр	Значення
Номінальна напруга живлення	380 В
Тип струму	Змінний трифазний, 50 Гц
Номінальна потужність (повна)	65 кВА
Активна потужність	55,25 кВт
Максимальний зварювальний струм	1250 А
Номінальна робоча сила струму (ПВ 100%)	1100 А
Межі регулювання зварювального струму	100–1250 А
Робоча напруга	15–50 В
Номінальна робоча напруга	44 В
Напруга холостого ходу	79 В
Діаметр зварювального дроту	3.0 / 4.0 / 5.0 / 6.0 мм
Коефіцієнт потужності (cos φ)	0.85
ККД	91 %
ПВ (протяжність включення)	100 %
Клас захисту	IP21
Охолодження	Повітряне
Габаритні розміри (Д×Ш×В)	890 × 400 × 811 мм
Вага	115 кг
Діапазон робочих температур	–5 °С ... +40 °С

Блок керування МК-1, що входить до складу зварювального комплексу MZ-1250, забезпечує регулювання основних параметрів зварювання та контроль руху зварювального трактора. Компактне виконання та ергономічна передня панель з цифровими індикаторами дають змогу оперативно відстежувати силу струму, напругу дуги, швидкість подачі дроту та переміщення автомата. Мікропроцесорне керування з підтримкою режимів СС (з постійним струмом) і СV (з постійною напругою) забезпечує стабільність горіння дуги для різних діаметрів дроту, а плавне регулювання струму, напруги й швидкостей дозволяє точно налаштовувати процес. Блок узгоджує роботу джерела живлення, головки та механізму подачі дроту, має систему індикації стану, захист від перевантажень і аварійне відключення, що гарантує стабільність параметрів і безпечну експлуатацію комплексу [47].

Зварювальний трактор АТ-1 (рис. 3.2) призначений для автоматичного зварювання під флюсом і забезпечує стабільне переміщення зварювальної головки вздовж шва з точно керованою швидкістю. Його конструкція включає самохідну каретку, зварювальну головку з чотирироlikовою подачею дроту, флюсовий бункер, блок керування та систему направляючих рейок, що разом забезпечує рівномірне формування шва та надійну подачу дроту.



Рис. 3.2. Зварювальний трактор АТ-1

АТ-1 сумісний із джерелом живлення Jasic MZ-1250 (M310), працює на постійному струмі та використовує дріт діаметром 3,0–6,0 мм. Точне регулювання швидкості переміщення (0,1–1,5 м/хв) забезпечується електродвигуном постійного струму з редуктором, а механізм подачі дроту (0,3–3,0 м/хв) підтримує стабільну довжину дуги. Зварювальна головка має вертикальні, горизонтальні регулювання та поворот $\pm 45^\circ$, що дозволяє виконувати різні типи швів.

Флюсовий бункер об'ємом 6 л оснащено дозатором і ситом, а конструкція трактора передбачає просте регулювання положення головки та пальника. Клас захисту IP21 забезпечує роботу в умовах помірного запилення й вологості. Технічні характеристики зварювального трактора АТ-1 наведено у табл. 3.6.

Таблиця 3.6. Технічні характеристики зварювального трактора АТ-1

Параметр	Значення
Номинальна напруга живлення	380 В, 50 Гц
Напруга живлення приводів (подача дроту, переміщення)	110 В DC
Номинальний струм приводів	0,4 А (переміщення), 1,0 А (подача дроту)

Продовження таблиці 3.6. Технічні характеристики зварювального трактора АТ-1

1	2
Межі регулювання швидкості переміщення	0,1–1,5 м/хв
Межі регулювання подачі дроту	0,3–3,0 м/хв
Діапазон регулювання зварювального струму	100–1250 А
Діаметр електродного дроту	3,0 / 4,0 / 5,0 мм
Об'єм флюсового бункера	6 л
Місткість касети для дроту	25 кг
Межі переміщення поперечної балки	70 мм
Межі переміщення зварювальної головки	100 × 100 × 70 мм
Кут повороту балки	± 90°
Кут відхилення пальника	± 45°
ККД	85 %
ПВ (протяжність вкл.)	100 %
Клас захисту	IP21
Габаритні розміри	1080 × 480 × 740 мм
Вага (без флюсу і дроту)	55 кг

У складі комплексу Jasic MZ-1250 + МК-1 + АТ-1 цей трактор виконує функцію пересувної зварювальної головки, узгодженої з блоком керування МК-1, який задає параметри дуги, швидкість подачі дроту й переміщення. Така інтеграція забезпечує стабільність процесу зварювання, високу продуктивність і якість шва навіть при тривалих циклах автоматизованого виробництва [47].

Для зварювання поясних швів обрано зварювальну головку типу АДФ-2500 (Тандем) (рис. 3.3), яка разом із джерелом зварювального струму — випрямлячем типу ВДУ-1250 — становить основу зварювальної установки.



Рис. 3.3. Зварювальна головка типу АДФ-2500 (Тандем)

Головку спроектовано з акцентом на надійність та зручність роботи при зварюванні стикових і кутових з'єднань «у човник» і з нахиленим

електродом. Номінальний струм кожної дуги становить 1250 А, сумарний — 2500 А при ПВ = 100 %. Конструкція допускає комплектування системами позиціювання, стеження за стиком, відеоспостереження та флюсообігу. Головка включає два незалежні механізми подачі дроту, струмопідводи та супорти. Ведучий електрод розташовано вертикально, ведений — під кутом 60–70°, причому кути та відстань між електродами (20–50 мм) регулюються. Керування здійснюється з пультів із цифровою індикацією струму, напруги та швидкості зварювання [48]. Технічні характеристики головки типу АДФ-2500 наведено в табл. 3.7 [48].

Таблиця 3.7. Технічні характеристики головки типу АДФ-2500

Параметр	Значення
Номінальний зварювальний струм кожної дуги при ПВ = 100 %, А	1250
Сумарний зварювальний струм при ПВ = 100 %, А	2500
Діаметр електродного дроту, мм	2–5
Межі регулювання швидкості подавання електродного дроту, м/год	12–360
Межі регулювання швидкості зварювання, м/год	15–120
Кут повороту зварювальної головки навколо вертикальної осі	$\pm 90^\circ$
Кут повороту зварювальної головки навколо горизонтальної осі	$\pm 45^\circ$
Кут відхилення осі токопроводу від вертикальної осі	0–45° (вперед)
Вертикальне зміщення подаючого пристрою перпендикулярно шву, мм	100
Потужність, споживана компонентами головки, ВА, не більше	600

В якості джерела зварювального струму використовується зварювальний випрямляч типу ВДУ-1250 (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Зварювальний випрямляч типу ВДУ-1250

Випрямляч ВДУ-1250 у комплекті зі зварювальним автоматом призначений для зварювання в середовищі захисних газів або для зварювання та наплавлення під флюсом виробів із вуглецевих та низьковуглецевих сталей. Також може бути використаний для повітряно-дугового різання або стругання вугільним електродом. Є напівкерованим тиристорним випрямлячем. Має два види жорстких зовнішніх вольт-амперних характеристик для зварювання та наплавлення під шаром флюсу [49].

Технічні характеристики зварювального випрямляча типу ВДУ-1250 наведено в табл. 3.8 [49].

Таблиця 3.8. Технічні характеристики зварювального випрямляча типу ВДУ-1250

Параметр	Значення
Напруга живлення, В	380 × 3ф
Частота мережі живлення, Гц	50
Номінальна споживана потужність, кВт	75
Діапазон регулювання зварювального струму, А	250–1250
ПВ при макс. зварювальному струмі, %, не менше	100
Зварювальний струм при ПВ 100%, А	1250
Напруга холостого ходу, В, не більше	55
Тип охолодження	Примусове
Межі регулювання зварювальної напруги, В	24...44
Габарити (Ш×В×Д), мм	790 × 610 × 1410
Маса, кг	500

Для виконання зварних швів ребер жорсткості застосовується механізоване зварювання в середовищі газової суміші 80 % Ar + 20 % CO₂ апаратом для механізованого зварювання КП-010-3 з джерелом живлення ВДМ-6304М. Такий комплекс забезпечує стабільне горіння дуги, низький рівень розбризкування та високу якість формування шва при зварюванні елементів товщиною до 20 мм [50, 51]. Застосування дроту ОК AristoRod 12.50 ESAB (d = 1,4 мм) забезпечує необхідні механічні властивості металу шва і сумісність з газовою сумішшю 80 % Ar + 20 % CO₂ [52], що спрощує логістику витратних матеріалів у межах одного виробництва [45].

Апарат КП-010-3 (рис. 3.5) призначений для механізованого зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів. Конструкція апарата забезпечує стабільне горіння дуги та рівномірне формування валика шва. Усі силові й газові з'єднання розміщено всередині корпусу, що запобігає випадковим пошкодженням, а доступ до системи подачі дроту здійснюється через знімну передню панель. Розмотувальний пристрій має

систему гальмування, яка перешкоджає самовільному розмотуванню дроту після зупинки двигуна подачі.



Рис. 3.5. Апарат для механізованого зварювання КП-010-3

Механізм подачі дроту чотирироликівий, що підвищує стабільність подачі, дозволяє використовувати порошкові дроти та забезпечує швидке перезавантаження касети. Система керування побудована на основі зворотних зв'язків, що забезпечує сталість режимів зварювання. Для зручності транспортування апарат обладнано колесами [50]. Технічні характеристики апарата для механізованого зварювання КП-010-3 наведено в табл. 3.9 [50].

Таблиця. 3.9. Технічні характеристики апарата для механізованого зварювання КП-010-3

Параметр	Значення
Напруга живлення, В	380 (трифазна мережа, 50 Гц)
Номінальний зварювальний струм при ПВ = 60 %, А	315
Діапазон регулювання зварювального струму, А	50–315
Регулювання напруги дуги	плавне
Діаметр зварювального дроту, мм	1,0–2,0 (суцільний), 1,2–2,0 (порошковий)
Швидкість подачі дроту, м/год	120–1100 (плавне регулювання)
Габарити, мм (В × Ш × Д)	510 × 300 × 660
Маса, кг	28

Зварювальний випрямляч ВДМ-6304М (рис. 3.6) є універсальним джерелом живлення для автоматичного, механізованого та ручного дугового

зварювання. Забезпечує стабільні дугові властивості, плавне перенесення металу й мінімальне розбризкування, зберігаючи високу якість шва навіть за тривалої роботи.



Рис. 3.6. Зварювальний випрямляч ВДМ-6304М

Випрямляч обладнаний системою в'ялових характеристик, що розширює технологічні можливості його використання у складі різних зварювальних комплексів. Передбачена можливість роботи як багатопостового джерела при підключенні через баластні реостати. Конструкція з колісною опорою полегшує переміщення обладнання у межах виробничої ділянки [51]. Технічні характеристики зварювального випрямляча ВДМ-6304М наведено в табл. 3.10 [51].

Таблиця. 3.10. Технічні характеристики зварювального випрямляча ВДМ-6304М

Параметр	Значення
Напруга живлення, В	3 × 380
Номінальний зварювальний струм, А	630
Тривалість навантаження (ПН)	100 %
Напруга холостого ходу, В	не більше 70
Кількість зварювальних постів	до 4
Споживана потужність, кВА	не більше 50
Габаритні розміри (Д × Ш × В), мм	1110 × 620 × 850
Маса, кг	не більше 280

Для виконання операцій дугового приварювання анкерів застосовується зварювальний пістолет для дугового приварювання шпильок Bolte GD 25 (рис. 3.7), призначений для важких режимів експлуатації (Heavy-Duty) та роботи зі шпильками великого діаметра. Модель GD 25 відповідає

вимогам стандарту DIN EN ISO 14555 і забезпечує процес Drawn Arc Stud Welding (дугове приварювання шпильок (анкерів) з відтяжкою електрода) із використанням керамічного кільця або захисного газу.



Рис. 3.7. Зварювальний пістолет Bolte GD 25

Пістолет призначений для приварювання анкерів діаметром 3–25 мм та довжиною 10–525 мм. Модель оснащена електронним керуванням підйому електрода, що забезпечує точне позиціонування шпильки перед запуском дуги та стабільні параметри приварювання. Регульований підйом у межах 0–6 мм з кроком 0,3 мм дозволяє адаптувати процес до різних діаметрів і марок сталі. Плавність занурення шпильки забезпечується гідравлічним демпфером, а термостійкий ізолюваний пластиковий корпус гарантує безпеку роботи та довговічність у складних виробничих умовах.

Для контролю якості приварювання можливе встановлення опційної системи вимірювання ходу шпильки, що забезпечує автоматизований моніторинг параметрів приварювання та спрощене налаштування режиму [54]. Технічні характеристики зварювального пістолета Bolte GD 25 наведено в табл. 3.11 [53].

Таблиця 3.11. Технічні характеристики зварювального пістолета Bolte GD 25

Параметр	Значення
Тип керування	Електронне, автоматичний підйом (automatic lift)
Спосіб зварювання	Drawn Arc із керамічним кільцем або газом (DIN EN ISO 14555)
Діаметр шпильок	Ø3–25 мм
Довжина шпильок	10–525 мм
Матеріали	Сталь, нержавіюча сталь
Регулювання підйому	0–6 мм, крок 0,3 мм
Демпфер поршня	Гідравлічний, плавне регулювання
Зварювальний кабель	2 м, 120 мм ²
Габаритні розміри (Ш×В×Д)	68 × 180 × 295 мм

В якості джерела живлення для пістолета Bolte GD 25 використовується зварювальний випрямляч ВДУ-1250, описаний вище.

3.2. Розрахунок технологічної оснастки

Для виконання зварювальних операцій товстостінної балки доцільним є застосування кантувача типу D-8000 як основного елемента технологічної оснастки. Використання мостових кранів у цьому випадку визнано менш доцільним через обмежену маневровість і складність точного позиціонування виробу. Кантувач, навпаки, забезпечує надійне та контрольоване переміщення деталей у процесі зварювання, що підвищує безпеку робіт і стабільність технологічних параметрів. Такий підхід дозволяє ефективно організувати виробничий процес під час складання або ремонту великогабаритних металоконструкцій [54].

Кантувач типу D-8000 (рис. 3.8) — це потужне високотехнологічне промислове обладнання, призначене для точного позиціонування та переміщення великогабаритних і важких виробів. Пристрій забезпечує стабільну роботу у виробничих і промислових процесах, що потребують високої точності, надійності та безпеки, і є оптимальним рішенням для малярних ділень, фарбувальних камер та камер очищення. Даний кантувач оснащений електричним приводом, що забезпечує плавне та точне регулювання руху. Потужний мотор-редуктор і система тягових ланцюгів дозволяють безперервно та без ривків обертати люльку з виробом, а електрична шафа керування дає змогу оператору легко контролювати всі параметри роботи. Пристрій призначений для точного позиціонування виробів під час нанесення та сушіння лакофарбових покриттів, з можливістю обертання на 360°.

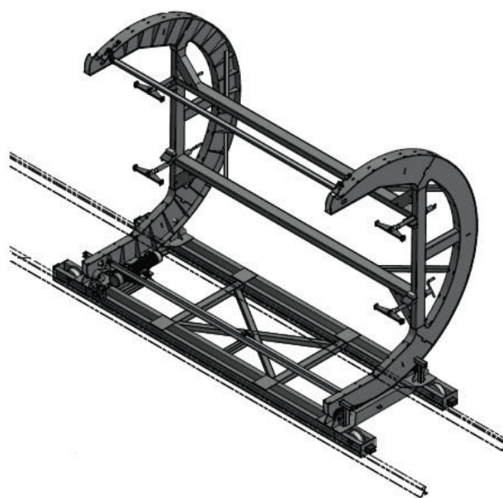


Рис. 3.8. Кантувач типу D-8000

Завдяки механічним стопорам і системі безпеки пристрій надійно фіксується під час транспортування, запобігаючи небажаному руху або зміщенню вантажу. Конструкція кантувача забезпечує високий рівень стійкості під час роботи навіть із масивними об'єктами [54].

Кантувач типу D-8000 розрахований на експлуатацію в широкому діапазоні температур — від -20 до $+90$ °С, при відносній вологості до 80%, що гарантує ефективність роботи в різних кліматичних і виробничих умовах. Це дозволяє використовувати його як у фарбувальних процесах, так і в технологічних операціях, пов'язаних із обробкою або складанням бронетехніки.

Основні переваги кантувача типу D-8000:

- Висока вантажопідйомність — до 8000 кг, що забезпечує стабільність і безпеку під час роботи з важкими виробами.
- Електричний привід, який гарантує точне керування, плавність рухів і максимальну безпеку експлуатації.
- Механізми безпеки, включаючи транспортні стопори та фіксатори, для запобігання небажаному переміщенню виробу.
- Зручність і легкість обслуговування завдяки ергономічному дизайну та детальній інструкції користувача.
- Оптимізація виробничих процесів, що скорочує час обробки бронетехніки та підвищує якість виконання робіт.

Кантувач типу D-8000 повністю відповідає чинним вимогам безпеки та нормативам. Його конструкція розроблена з урахуванням промислових стандартів, що забезпечує тривалий термін служби за умови правильного використання та регулярного технічного обслуговування [54].

Характеристики кантувача типу D-8000 наведено в табл. 3.12 [54].

Таблиця 3.12. Характеристики кантувача типу D-8000

Параметр	Значення
Тип і модель	D-8000
Вантажопідйомність	8000 кг
Кут повороту у горизонтальній площині	360 градусів
Привід	Електричний
Напруга	380 В
Номінальна потужність двигуна	2,2 кВт
Розміри рами (Ш × Д × В)	1876 мм × 6020 мм × 200 мм
Маса рами	900 кг
Розміри люльки (радіус / довжина)	1930 мм / 4830 мм
Маса люльки	2036 кг
Допустима температура експлуатації	від -20°C до $+90^{\circ}\text{C}$
Вологість	не більше 80% при 25°C

Принцип роботи кантувача

Люлька кантувача опирається на два ряди роликів опор, один з яких є приводним, а другий холостим (непривідним). Приводом кантувача є електродвигун, з'єднаний із приводним валом за допомогою муфти черв'ячного редуктора. Для збільшення сили зчеплення та забезпечення плавності обертання зварюваного виробу всі ролики облаштовують гумовими вантажними шинами [55].

Основними технічними характеристиками кантувальних пристроїв є: вантажопідйомність; діаметр роликів; діапазон діаметрів зварюваних виробів; швидкість обертання виробу (робоча та маршова); споживна потужність.

Мета розрахунку кантувального пристрою полягає у визначенні зусиль на роликів опор при різних значеннях діаметра виробу, діаметрів осі холостого та вала приводного ролика, потужності приводу та запасу зчеплення кантувача [55].

Необхідно визначити опорні реакції роликів опор Q_1 і Q_2 , відповідні колові зусилля T_1 і T_2 , а також розрахункові діаметр опорних роликів D_p , валу d_1 та осі d_2 , які забезпечують міцність і надійність роботи кантувача при заданих навантаженнях. Вихідні дані для розрахунків наведені в табл. 3.13. Розрахункова схема роликів опор наведена на рис. 3.9.

Таблиця 3.13. Вихідні дані для розрахунків

G	D	α	i_p	n	L	D_p	ε	$k_q = \frac{1}{f}$	$\Gamma = \mu$	40 XH → $[\sigma]$
10×10^3 Н	1,7 м	75°	4	1,4	300 мм / 0,30 м	450 мм / 0,45 м	0 (семетр. балка)	0,02	$(25...30) \times 10^{-4}$ м	95...115 МПа

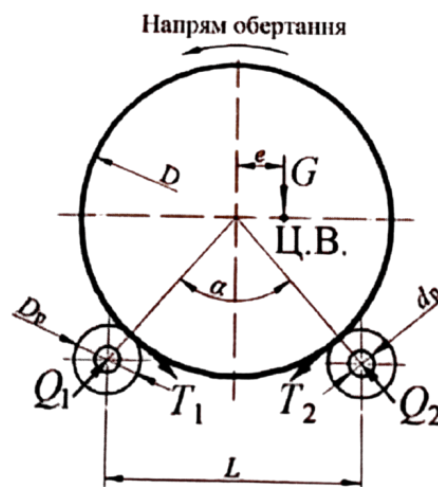


Рис. 3.9. Розрахункова схема роликів опор

Активним навантаженням кантувача є вага зварювального виробу G .

Центральний кут α для забезпечення безпечної роботи кантувача приймається в межах $\alpha = 50...120^\circ$. Значення кута α дозволяє визначити діапазон діаметрів D виробів, які можна обертати на кантувачі.

Відстань між роликами розраховується за формулою:

$$D = \frac{L}{\sin \alpha / 2} - D_p \rightarrow L = (D + D_p) \times \sin \alpha / 2 \quad (3.6)$$

Діапазон D виробів:

$$D_{\max} = \frac{L}{\sin 25^\circ} - D_p \quad (3.7)$$

$$D_{\min} = \frac{L}{\sin 60^\circ} - D_p \quad (3.8)$$

При обертанні зварюваного виробу на роликів опорах виникають опорні реакції Q_1 і Q_2 та колові зусилля T_1 і T_2 ,

Q_1 і T_1 відповідає привідній опорі, Н. Q_2 і T_2 — непривідній (холостій) опорі, Н. При відсутності дисбалансу виробу ($\varepsilon = 0$) $Q_1 = Q_2$ та $T_1 = T_2$. Опорні реакції роликів опір розраховуються за формулою, Н:

$$Q_{1(2)} = \frac{G}{2 \cos \alpha / 2} \left(1 - \frac{\varepsilon \cos \alpha}{\sin \alpha / 2} + \frac{\varepsilon + \sin \alpha / 2}{b \cos \alpha / 2 - \sin \alpha / 2} \right), \quad (3.9)$$

$$\text{де } b = \frac{D_p}{f d_p + 2\mu}, \quad (3.10)$$

(D_p , d_p — діаметри опорного ролика та осі (вала) ролика в підшипниках (у першому наближенні приймається $d_p = 0,1D_p$), м; f — коефіцієнт тертя в підшипниках роликів опор (для підшипників кочення $f = 0,02$); μ — коефіцієнт тертя кочення на поверхні ролика (для роликів з гумовим покриттям $\mu = (25...35)10^{-4}$ м).

Колові зусилля розраховуються за формулою:

$$T_{1(2)} = G \left(\varepsilon + \frac{\varepsilon + \sin \alpha / 2}{b \sin \alpha + \cos \alpha - 1} \right) \quad (3.11)$$

Розрахункове навантаження на вал (вісь) ролика:

$$P_{1(2)} = \frac{\sqrt{Q^2 + T^2}}{i_p} \times k_p, \quad (3.12)$$

де P_1 , P_2 — навантаження на одну ведучу (привідну) і холосту (непривідну) опори, Н; i_p — число роликів опор в одному ряду; k_p — коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу навантаження на роликів опори (для роликів з гумовим покриттям при $i_p \geq 3$ $k_p = 1,2...1,3$).

Розрахунок осі холостої роликів опори

Вісь холостої роликоопори розраховують як двоопорну шарнірно закріплену балку, навантажену посередині прольоту зосередженою силою P_2 .

Діаметр осі визначається з умови міцності такої балки при згинанні моментом, Нм:

$$M_{зг} = \frac{P_2 l_2}{4}, \quad (3.13)$$

де l_2 — відстань між підшипниками осі, м.

Діаметр осі розраховується за формулою (розрахунковий діаметр):

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{M_{зг}}{0,1[\sigma]}}, \quad (3.14)$$

де $[\sigma]$ — допустиме напруження для сталевих осей при згинанні, МПа.

Розрахунок привідного вала

При проєктуванні кантувача знайдене значення діаметра осі d_2 слід порівняти з попередньо вибраним d_p . Якщо різниця становитиме більше 5%, розрахунки слід виконати в другому наближенні.

Привідний вал ведучих роликоопор також розглядається як двоопорна шарнірно закріплена балка, але навантажена посередині прольоту одночасно згинальним моментом $M_{зг} = \frac{P_1 l_1}{4}$ та крутним моментом $M_{кр}$, Нм:

$$M_{кр} = T_1 \frac{D_p}{2} + \left(f \frac{d_p}{2} + \mu \right) \times \sqrt{Q_1^2 + T_1^2} \quad (3.15)$$

Еквівалентний розрахунковий момент на валу розраховується за формулою:

$$M_e = \sqrt{M_{зг}^2 + M_{кр}^2} \quad (3.16)$$

Розрахунковий діаметр привідного вала розраховується за формулою:

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{M_e}{0,1[\sigma]}} \quad (3.17)$$

Остаточний вибір діаметра вала d_1 здійснюється так само, як для осі ролика d_2 .

Необхідна потужність привідного двигуна, Вт, визначається при маршовій швидкості обертання виробу:

$$N = \frac{M_{кр} \times \omega}{\eta_0}, \quad (3.18)$$

де $\omega = \frac{\pi n}{30}$ – кутова швидкість вала, с^{-1} ; n – частота обертання привідного вала, об/хв; η_0 – загальний ККД привідного механізму (орієнтовно приймається $\eta_0 = 0,4 \dots 0,5$).

Перевірка запасу зчеплення привідних роликів із виробом здійснюється відповідно до умови

$$k_{зч} = \frac{Q_1 \times \varphi}{T_1} \geq 3, \quad (3.19)$$

де φ – коефіцієнт зчеплення роликів із виробом (для роликів з гумовим покриттям $\varphi = 0,3 \dots 0,4$).

Згідно з вищезазначеними формулами розраховуємо кантувач для забезпечення його надійної та безпечної роботи під час обертання і позиціонування зварювальних виробів, оцінки міцності вузлів, стабільності руху та необхідної потужності приводу.

Розраховуємо відстань між роликами за формулою (3.6):

$$L = (1,7 + 0,45) \times 0,6087 = 1,43 \text{ м} = 1,3 \text{ м}$$

Діапазон D виробів (3.7; 3.8):

$$D_{\max} = \frac{1,3}{0,4226} - 0,45 = 2,6 \text{ м}$$

$$D_{\min} = \frac{1,3}{0,866} - 0,45 = 1,0 \text{ м}$$

Опорні реакції роликів опір, Н:

У першому наближенні приймаємо $d_p = 0,1 D_p = 0,1 \times 0,45 = 0,045 \text{ м}$

$$b = \frac{0,45}{0,02 \times 0,055 + 2 \times 30 \times 10^{-4}} = 65,22$$

$$Q_{1(2)} = \frac{10 \times 10^3}{2 \times 0,7933} \left(1 - 0 + \frac{0,6087}{65,22 \times 0,7934 - 0,6087} \right) = 6359 \text{ Н}$$

Колові зусилля, Н:

$$T_{1(2)} = 10 \times 10^3 \left(0 + \frac{0 + 0,6087}{6522 \times 0,9659 + 0,2588 - 1} \right) = 97,79 \text{ Н}$$

Навантаження на вал (вісь) ролика, Н:

При $i_p \geq 3$ коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу навантаження на роликоопори (для роликів з гумовим покриттям) $k_p = 1,2 \dots 1,3$.

$$P_{1(2)} = \frac{\sqrt{6359^2 + 97,78^2}}{4} \times 1,25 = 1987 \text{ Н}$$

Згинальний момент, Нм:

					КР.131.6121м.03.03.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		55

$$M_{32} = \frac{1987 \times 0,30}{4} = 149 \text{ Нм}$$

Діаметр осі, м:

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{149}{0,1 \times 105 \times 10^6}} = 0,024 \text{ м}$$

Приймаємо $d_p = d_2 = 0,024 \text{ м}$.

Навантаження на привідний вал $M_{3г} = 149 \text{ Нм}$.

Крутний момент, Нм

$$M_{кр} = 97,78 \times \frac{0,45}{2} + \left(0,02 \times \frac{0,024}{2} + 30 \times 10^{-4} \right) \times \sqrt{6359^2 + 97,78^2} = 44,6 \text{ Нм}$$

Еквівалентний розрахунковий момент на валу, Нм:

$$M_e = \sqrt{149^2 + 44,6^2} = 155,5 \text{ Нм}$$

Розрахунковий діаметр привідного вала, м:

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{155,5}{0,1 \times 105 \times 10^6}} = 0,0248 \text{ м}$$

Приймаємо $d_1 = d_2 = 0,025 \text{ м}$.

Потужність приводу, кВт:

$$\omega = \frac{3,14 \times 1,4}{30} = 0,147 \text{ с}^{-1}$$

$$N = \frac{44,6 \times 0,147}{0,45} = 4,7 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт зчеплення:

$$k_{3ч} = \frac{6359 \times 0,35}{97,78} = 22,76$$

Умова зчеплення виконується.

Для кантування балки, що виготовлюється, обираємо кантувальний пристрій вантажопідйомністю 10 т, з діаметром роликів 450 мм та діапазоном діаметрів зварюваних виробів 1...2,6 м. Споживна потужність - 4,7 кВт.

3.3. Розробка змісту технологічного процесу, нормування операцій

Для виготовлення зварної балки необхідно розробити відповідний технологічний процес. Залежно від умов виробництва можливе кілька підходів до його формування.

Розробимо технологічний процес, що охоплює основні етапи складання та зварювання конструкції (рис. 3.10).

					КР.131.6121м.03.03.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		56

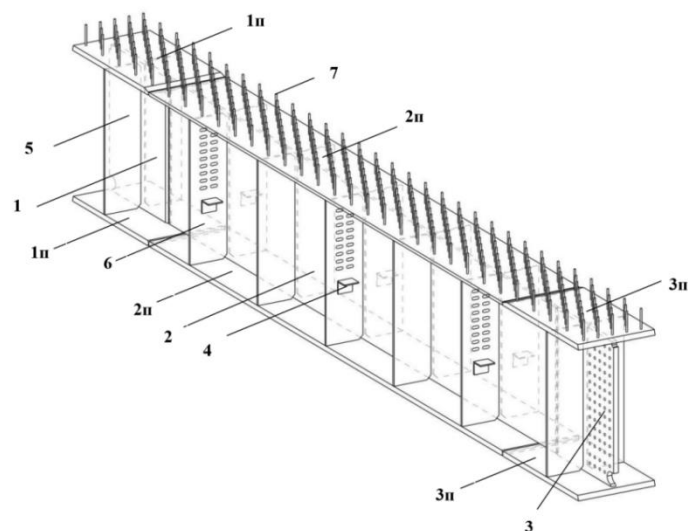


Рис. 3.10. Зварна балка

Технологічний процес, що охоплює основні етапи складання та зварювання конструкції наведено в табл. 3.14.

Таблиця 3.14. Технологічний процес складання та зварювання конструкції

Найменування операції	Переходи	Технологічні комплекси прийомів	Режими	Устаткування, оснастка, інструмент	Норма часу, год ²
1. Складання стінки	Складання дет. 1 і 2 Складання дет. 1-2 і 3	1.1 Подача дет. 1 1.2 Орієнтування дет. 1 1.3 Закріплення дет. 1 1.4 Подача дет. 2 1.5 Орієнт. дет. 2 1.6 Закріп. дет. 2 1.7 Прихоплення 1.8 Подача дет. 3 1.9 Орієнт. дет. 3 1.10 Закріп. дет. 3 1.11 Прихоплення		Складальний стенд Апарат для механізованого зварювання КП 010-3 Д\ж – випрямляч ВДМ-6304М	0,6

Продовження таблиці 3.14. Технологічний процес складання та зварювання конструкції

1	2	3	4	5	6
2. Зварювання стінки	Зварюван. дет. 1,2	2.1 Зачищення прихоплень 2.2 Зварювання двох верхніх шарів	АФ I = 600 А U = 35 В V _{зв} = 30 м/год	Зварювальний стенд Зварювальний автомат АДФ-1000 головка Д/ж – випрямляч ВДМ-6304М	0,35
3. Кантування		3.1 Перекантування стінки на 180 град. 3.2 Закріплення стінки		Мостовий кран	0,2
4. Зварювання стінки (1-2 і 3)		4.1 Зварювання двох шарів	АФ I = 600 А U = 35 В V _{зв} = 30 м/год	Зварювальний стенд Зварювальний автомат АДФ-1000 головка Д/ж – випрямляч ВДМ-6304М	0,35

Продовження таблиці 3.14. Технологічний процес складання та зварювання конструкції

1	2	3	4	5	6
5. Складання полиць	Складання дет. 1п1 і 2п1 Складання дет. 1п1, 2п1 і 3п1 Складання дет. 2п1 і 2п2 Складання дет. 2п1, 2п2 і 2п3	5.1 Подача дет. 1п1 5.2 Орієнтування дет. 1п1 5.3 Закріплення дет. 1п1 5.4 Подача дет. 2п1 5.5 Орієнт. дет. 2п1 5.6 Закріп. дет. 2п1 5.7 Прихоплення 5.8 Подача дет. 3п1 5.9 Орієнт. дет. 3п1 5.10 Закріп. дет. 3п1 5.11 Прихоплення 5.12 Подача дет. 2п1 5.13 Орієнт. дет. 2п1 5.14 Закріп. дет. 2п1 5.15 Подача дет. 2п2 5.16 Орієнт. дет. 2п2 5.17 Закріплення дет. 2п2 5.18 Прихопл. 5.19 Подача дет. 2п3 5.20 Орієнт. дет. 2п3 5.21 Закріп. дет. 2п3 5.22 Прихопл.		Складальний стенд Апарат для механізованого зварювання КП 010-3 Дж – випрямляч ВДМ-6304М	0,7

Продовження таблиці 3.14. Технологічний процес складання та зварювання конструкції

1	2	3	4	5	6
6. Зварювання полиць з одного боку	Зварюван. чотирьох швів з одного боку	6.1 Зачищення прихоплень 6.2 Зварювання чотирьох верхніх швів	АФ $I = 600 \text{ A}$ $U = 35 \text{ В}$ $V_{зв} = 30 \text{ м/год}$	Зварювальний стенд Зварювальний автомат АДФ-1000 головка Д/ж – випрямляч ВДМ-6304М	0,5
7. Кантування		7.1 Перекантування полиць по черзі 7.2 Закріплення полиць 7.3 Зачищення прихоплень		Мостовий кран	0,2
8. Зварювання полиць зі зворотнього боку		8.1 Зварювання чотирьох швів	АФ $I = 600 \text{ A}$ $U = 35 \text{ В}$ $V_{зв} = 30 \text{ м/год}$	Зварювальний стенд Зварювальний автомат АДФ-1000 головка Д/ж – випрямляч ВДМ-6304М	0,5

Продовження таблиці 3.14. Технологічний процес складання та зварювання конструкції

1	2	3	4	5	6
9. Складання двотавра	Складання полиці 1 і стінки Складання полиці 1 і стінки з полицею 2	9.1 Подача полиці 1 9.2 Орієнтування полиці 1 9.3 Закріплення полиці 1 9.4 Прихоплення 9.5 Подача стінки 9.6 Орієнтування стінки 9.7 Закріплення стінки 9.8 Прихоплення 9.9 Подача полиці 2 9.10 Орієнтування полиці 2 9.11 Закріплення полиці 2 9.12 Прихоплення		Складальний стенд Апарат для механізованого зварювання КП 010-3 Д/ж – випрямляч ВДМ-6304М	3,68
10. Зварювання 1го поясного шва двотавра	Зварюван. полки 1 зі стінкою	10. 1 Зварювання одного поясного шва	АФ I = 600 А U = 29 В V _{зв} = 31 м/год	Зварювальний стенд Зварювальний автомат АДФ-1000 головка Д/ж – випрямляч ВДМ-6304М	1,7

Продовження таблиці 3.14. Технологічний процес складання та зварювання конструкції

1	2	3	4	5	6
11. Кантування		11.1 Перекантуван ня на 90 град.		Мостовий кран	0,2
12. Зварювання 2го поясного шва двотавра		12. 1 Зварювання 2го поясного шва	АФ I = 600 А U = 29 В V _{зв} = 31 м/год	Зварювальний стенд Зварювальний автомат АДФ- 1000 головка Д/ж – випрямляч ВДМ-6304М	1,7
13. Кантування		13.1 Перекантуван ня двотавра на 180 град. 13.2 Орієнтування двотавра 13.3 Закріплення двотавра		Мостовий кран	0,2
14. Зварювання 3го поясу шва	Зварюван. полиці 2 зі стілкою	14.1 Зварювання одного поясного шва	АФ I = 600 А U = 29 В V _{зв} = 31 м/год	Зварювальний стенд Зварювальний автомат АДФ- 1000 головка Д/ж – випрямляч ВДМ-6304М	1,7
15. Кантування		15.1 Перекантуван ня на 90 град. 15.2 Закріплення		Мостовий кран	0,2
16. Зварювання 4го поясного шва		16.1 Зварювання другого поясного шва	АФ I = 600 А U = 29 В V _{зв} = 31 м/год	Зварювальний стенд Зварювальний автомат АДФ- 1000 головка Д/ж – випрямляч ВДМ-6304М	1,7

Продовження таблиці 3.14. Технологічний процес складання та зварювання конструкції

1	2	3	4	5	6
17. Зачищення поверхонь ребер жорсткості під привар кутиків 4				Зачисна переносна машина	0,15
18. Розмічування розташування кутиків 4				Крейда, нитка, молоток, кернер	0,3
19. Складання кутиків 4 з ребрами жорсткості 6	Складання кутиків 4 з ребрами жорсткості 6	19.1 Орієнтування кутиків 4 по розмітці 19.2 Закріплення кутиків 4 19.3 Прихоплення		Складальний стенд Апарат для механізованого зварювання КП 010-3 Дж – випрямляч ВДМ-6304М	0,6
20. Зварювання кутиків 4 з ребрами жорсткості 6	Зварюван. Кутиків 4 з ребрами жорсткості 6	20.1 Зачищення прихоплень 20.2 Зварювання кутиків 4 з ребрами жорсткості 6	М I = 200 А U = 29 В V _{зв} = 15,48 м/год	Складальний стенд Апарат для механізованого зварювання КП 010-3 Дж – випрямляч ВДМ-6304М	0,2
21. Зачищення поверхонь двотавра для приварювання ребер жорсткості 5 і 6				Зачисна переносна машина	0,37
22. Розмічування розташування ребер жорсткості 5 і 6				Крейда, нитка, молоток, кернер	1,4

Продовження таблиці 3.14. Технологічний процес складання та зварювання конструкції

1	2	3	4	5	6
23. Складання ребер жорсткості 5 і 6 з двотавром	Почергове розміщен. ребер жорсткості 5 і 6	23.1 Подача ребер жорсткості 5 і 6 23.2 Орієнтування ребер жорсткості 5 і 6		Складальний стенд Апарат для механізованого зварювання КП 010-3 Дж – випрямляч ВДМ-6304М	7,4
23. Складання ребер жорсткості 5 і 6 з двотавром		23.3 Закріплення ребер жорсткості 5 і 6 23.4 Прихоплення			
24. Зварювання ребер жорсткості 5 і 6 з двотавром з одного боку	Зварюван. ребер жорсткості 5 і 6 зі стіною з одного боку «в човник». Зварюван. ребер жорсткості 5 і 6 з полицями	24.1 Приварювання ребер жорсткості 5 і 6 по черзі з одного боку	М I = 200 А U = 29 В V _{зв} = 15,48 м/год	Складальний стенд Апарат для механізованого зварювання КП 010-3 Дж – випрямляч ВДМ-6304М	4,56
25. Кантування		25.1 Перекантування двотавра на 90 град.		Мостовий кран	0,2
26. Зварювання ребер жорсткості 5 і 6 з двотавром з іншого боку	Зварюван. ребер жорсткості 5 і 6 зі стінкою «в човник». Зварюван. ребер жорсткості 5 і 6 з полицями	26.1 Приварювання ребер жорсткості 5 і 6 почергово з іншого боку	М I = 200 А U = 29 В V _{зв} = 15,48 м/год	Складальний стенд Апарат для механізованого зварювання КП 010-3 Дж – випрямляч ВДМ-6304М	4,56

Продовження таблиці 3.14. Технологічний процес складання та зварювання конструкції

1	2	3	4	5	6
27. Зачищення поверхні верхньої полиці для приварювання анкерів 7				Зачисна переносна машина	0,5
28. Розмічува ння поверхні верхньої полиці для приварювання анкерів 7				Крейда, нитка, молоток, кернер	1,5
29. Зварювання анкерів 7		29.1 Приварювання анкерів 7 по розмітці	М I = 1000 А U = 28 В		2,3
30. Контроль якості поясних швів	Візуальн. контроль якості поясних швів			Лупа	1,22
31. Контроль якості стикових з'єднань	Ультразву ковий контроль якості стикових з'єднань			Дефектоскоп, УСД - 50	0,3

Згідно з розробленим технологічним процесом, час виготовлення балки становить 39,54 години, при цьому у виробничому процесі беруть участь 31 працівник.

Доцільність організації виготовлення конструкцій на потоковій механізованій або автоматизованій лінії визначається мінімальним значенням річної програми, яке розраховується як [41]:

$$П_{\min} = 0,6 \frac{\Phi_{\text{д.м}} n}{T}, \quad (3.20)$$

де 0,6 — коефіцієнт використання устаткування лінії на початковому етапі її експлуатації. Для освоєної та налагодженої автоматизованої лінії цей коефіцієнт може підвищитися до 0,7...0,75; n — число робочих місць (позицій) потокової лінії; T — тривалість технологічного процесу; $\Phi_{\text{д.м}}$ — дійсний річний фонд виробничого часу робочого місця (позиції) лінії [41].

$$n = 31$$

$$T = 39,54 \text{ год.}$$

$$P_{\min} = 0,6 \frac{3977 \times 31}{39,54} = 1890 \text{ шт.}$$

Приймаємо річну програму — 1890 шт.

Такт випуску являє собою розрахункову величину проміжку часу між випуском з лінії одного та випуском наступного такого ж самого виробу, що виготовляється безпосередньо перед першим [41]:

$$t = \frac{\Phi_{\text{д.м}}}{P} \quad (3.21)$$

$$t = \frac{3977}{1890} = 2,1 \text{ год.}$$

Діаграма тривалості операцій наведена рис. 3.11.

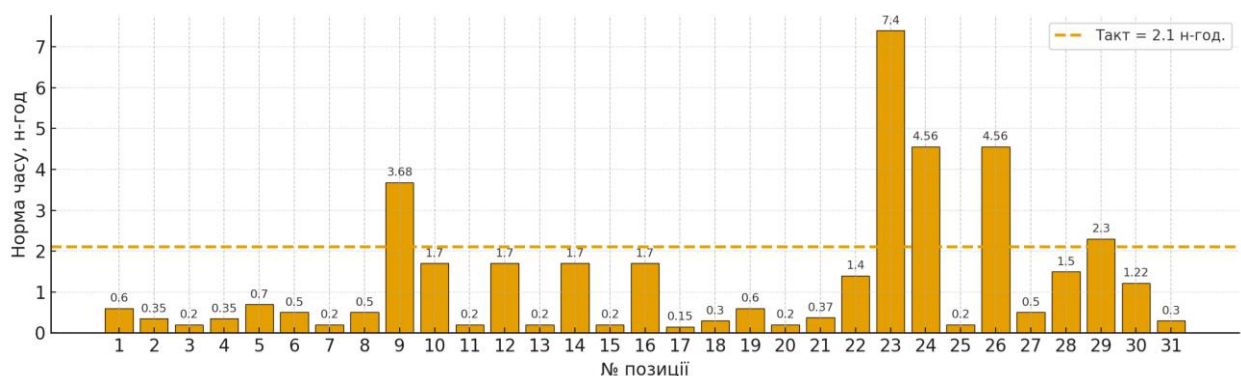


Рис. 3.11. Діаграма тривалості операцій

Одним із методів пошуку оптимального варіанта лінії, з огляду на простоту розрахунків, наочності та швидкості отримання остаточного результату, є метод, заснований на аналізі структурних схем лінії за певними їх показниками. Такими показниками, зокрема, є [41]:

Технічна продуктивність лінії

$$Q_T = \frac{1}{t_{\max}} \quad (3.22)$$

Технічна продуктивність лінії характеризує ефективність роботи механізованої потокової лінії як ланки всього ланцюга виготовлення даного типу суднокорпусної конструкції, а середній коефіцієнт завантаження позицій лінії є кількісною характеристикою синхронізації операцій даного технологічного процесу [41].

Середній коефіцієнт завантаження робочих місць (позицій) лінії

$$K_{з.ср} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \times \frac{t_i}{t_{\max}} \quad (3.23)$$

Приведена трудомісткість виготовлення розрахункової секції

$$T_{np} = \sum_{i=1}^n a_i \times t_i, \quad (3.24)$$

де n — число позицій лінії; a_i , t_i — кількість основних робітників та тривалість виконання робіт на i -й позиції відповідно; $t_{\max}$ — тривалість виконання робіт на найбільш навантаженій позиції даної структурної схеми (варіанта) потокової лінії.

Згідно з розрахунками за формулами 3.22, 3.23, 3.24 отримуємо:

$Q_T = 0,135$ шт./год.; $K_{з.ср} = 0,172$; $T_{пр} = 39,54$ люд.-год.

У результаті розрахункової перевірки розробленого технологічного процесу (Варіант І) встановлено, що тривалість окремих операцій перевищує допустимі значення, тоді як значна частина операцій виконується з недозавантаженням обладнання, що спричиняє простой. Завантаженість робочих місць виробничої лінії є нерівномірною ($K_z = 0,172$). На підставі зазначеного виникає потреба в розробці альтернативних варіантів технології виготовлення конструкції. З метою скорочення тривалості виробничого циклу доцільно об'єднати окремі операції та винести частину з них за межі основної виробничої лінії.

3.4. Контроль якості зварювання

Для оцінювання якості зварних швів товстостінної балки, крім візуального огляду, застосовується ультразвуковий метод неруйнівного контролю, який дає змогу виявляти приховані дефекти у з'єднаннях металевих конструкцій. Основою цього методу є використання ультразвукових хвиль — пружних коливань у матеріальному середовищі з частотою, що перевищує 20 кГц. Міцні метали добре проводять звукові хвилі, тому їх можна досліджувати на значну глибину. Коли хвиля досягає межі двох середовищ з різною акустичною проникністю, відбувається часткове заломлення й відбиття сигналу, що фіксується приладом.

Найбільш поширеним і ефективним способом ультразвукової дефектоскопії є луна-метод. Він базується на реєстрації відбитих імпульсів (луна-сигналів) від межі виробу або внутрішніх дефектів. Зондуючий імпульс приладу проходить крізь метал балки, і на екрані відображається відбитий сигнал — так званий донний луна-сигнал. Порівнюючи час проходження хвилі до відбиття і назад, з урахуванням швидкості поширення ультразвуку в

					КР.131.6121м.03.03.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		67

даному матеріалі, визначають товщину виробу або глибину розташування дефекту. Контроль проводиться з одного боку виробу, що спрощує діагностику та не вимагає повного доступу до об'єкта. При цьому визначаються координати, форма та орієнтація дефекту.

Ультразвуковий метод дозволяє виявляти такі типи дефектів, як непровари, тріщини, пори, неметалічні включення або раковини. Особливо актуальним він є для товстостінних елементів, де інші види неруйнівного контролю (наприклад, капілярний або магнітопорошковий) мають обмежену глибину дії. Ультразвуковий контроль забезпечує високу точність, безпечність та економічність процесу перевірки, не пошкоджуючи досліджуваний об'єкт [56].

Норми допустимих розмірів поверхневих дефектів в зварних з'єднаннях (за ДСТУ-Н Б А.3.1-16:2013) наведені в табл. 3.15 [57].

Таблиця 3.15. Норми допустимих розмірів поверхневих дефектів в зварних з'єднаннях

Зовнішній дефект	Допустимі розміри
Підріз	Глибина — до 5 % товщини прокату, що зварюється, але не більше 1 мм
Подовжені і сферичні поодинокі включення	Глибина — до 10 % товщини прокату, що зварюється, але не більше 3 мм. Довжина — до 20 % довжини оціночної ділянки (довжину оціночної ділянки, що контролюється, слід приймати за даними таблиці 18)
Подовжені і сферичні включення у вигляді ланцюжків або скупчень	Глибина — до 5 % товщини прокату, що зварюється, але не більше 2 мм. Довжина — до 20 % довжини оціночної ділянки
Непровари, ланцюжки і скупчення пор, сусідніх по довжині швів	Відстань між найближчими кінцями дефектів — не менше 200 мм

Допустимі поверхневі дефекти зварних з'єднань не повинні перевищувати значень, наведених в табл. 3.15. Будь-які тріщини в зварних швах, незалежно від їх типу чи розміру, не допускаються. Поверхня шва має бути рівномірно лускатою, без пропалів, підрізів і напливів.

Для товстостінної балки передбачено комплексний контроль якості: 100% усіх швів проходять візуальний контроль, а стикові з'єднання додатково контролюються УЗК у повному обсязі (100%). Поясні шви також перевіряються ультразвуком вибірково (30%), шви ребер жорсткості проходять тільки візуальний контроль.

Висновки

1. Для автоматичного зварювання під флюсом стикових і поясних швів товстостінної балки обрано зварювальний дріт ОК Autrod 12.32 у поєднанні з агломерованим основним флюсом ОК Flux 10.71, що забезпечує стабільне формування шва, низький вміст дифузійного водню (<5 мл/100 г) та високу пластичність наплавленого металу.

2. Для механізованого зварювання в захисних газах (кутові шви ребер жорсткості, прихоплення) обрано неоміднений дріт ОК AristoRod 12.50 ESAB (діаметр 1,4 мм) із захисною газовою сумішшю 80 % Ar + 20 % CO₂, що гарантує мінімальне розбризкування, стабільне струменеве перенесення металу та високу якість шва.

3. Для стикових швів під флюсом застосовується комплекс Jasіc MZ-1250 (M310) з трактором АТ-1. Поясні шви балки виконуються зварювальною головкою Тандем АДФ-2500 у поєднанні з джерелом живлення ВДУ-1250. Ребра жорсткості, кутики та прихоплення виконуються апаратом для механізованого зварювання КП-010-3 з джерелом ВДМ-6304М. Приварювання анкерних шпильок діаметром 16 мм виконується пістолетом Bolte GD 25 методом Drawn Arc Stud Welding із під'єднанням до ВДУ-1250.

7. Для кантування балки під час складально-зварювальних робіт розраховано кантувач типу D-8000 вантажопідйомністю 10000 кг. Діаметр ролика $D_p = 450$ мм; діаметр осі (вала) ролика $d = 25$ мм, відстань між роликами $L = 300$ мм; необхідна потужність приводу $N = 4,7$ кВт; можливість обертання на 360°, що значно ефективніше за використання мостових кранів.

8. Розроблено детальний технологічний процес виготовлення балки, що включає 31 операцію з нормами часу; загальна трудомісткість однієї балки становить 39,54 люд.-год. Розрахункова мінімальна річна програма для доцільності організації потокової лінії — 1890 шт.; такт випуску — 7,41 год при середньому коефіцієнті завантаження позицій 0,172, що вказує на необхідність подальшої оптимізації процесу.

9. Для контролю якості зварних з'єднань, крім візуального огляду, передбачено застосування ультразвукового методу неруйнівного контролю (дефектоскоп типу УСД-50), що дозволяє надійно виявляти внутрішні дефекти в товстостінних елементах балки. Усі шви балки проходять 100% візуальний контроль, а стикові — додатково повний УЗК (100%). Поясні шви перевіряються ультразвуком вибірково (30%), шви ребер жорсткості проходять лише візуальний контроль.

					КР.131.6121м.03.03.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		69

					КР.131.6121м.03.04.06.ПЗ								
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата									
Студент	Гунченко О.В.				Проектування механізованої потокової лінії (МПЛ) складання і зварювання балок					Аркуш	Аркушів		
Керівник	Драган С.В.										70		
Консульт.	.								НУК ім. адм. Макарова				
Зав. Кафед.	Драган С.В.												

4. Проектування механізованої потокової лінії (МПЛ) складання і зварювання балок

4.1. Складання варіантів структурної схеми МПЛ та схеми технологічного процесу виготовлення балок

Проведений аналіз діючого технологічного процесу виготовлення балки (варіант І) показав низку суттєвих недоліків, серед яких надмірна тривалість окремих операцій, нерівномірне завантаження робочих місць, значні простої та низький середній коефіцієнт завантаження позицій. Це свідчить про недостатню синхронізацію операцій та неефективне використання виробничих ресурсів. У зв'язку з цим виникає необхідність перегляду структури технології та розроблення альтернативних підходів до організації потокового виробництва. У даному розділі сформовано й обґрунтовано можливі варіанти структурної схеми механізованої потокової лінії, які мають забезпечити скорочення виробничого циклу, підвищення рівня механізації та оптимізацію завантаження обладнання й персоналу.

Технологічний процес складання та зварювання конструкції (Варіант ІІ) наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Технологічний процес складання та зварювання конструкції: Варіант ІІ

№ позиції	№ та зміст операції	Заг. тривал. робіт на позиції, год	Кількість робітників, чол.	№ та зміст операції	Заг. тривал. робіт на позиції, год	Кількість робітників, чол.
	Лінія 1 (для центральної частини балки)			Лінія 2 (для бокових блоків балки)		
1.	1. Зачищення поверхонь під встановлення ребер жорсткості 2. Розмічування місць встановлення ребер жорсткості	1,28	2	1. Зачищення поверхонь під встановлення ребер жорсткості 2. Розмічування місць встановлення ребер жорсткості	0,52	1

Продовження таблиці 4.1. Технологічний процес складання та зварювання конструкції: Варіант II

1	2	3	4	5	6	7
	Лінія 1 (для центральної частини балки)			Лінія 2 (для бокових блоків балки)		
1.	3. Зачищення поверхні під встановлення анкерів 4. Розмічування місць встановлення анкерів 5. Зачищення поверхонь ребер жорсткості для встановлення кутиків 6. Розмічування поверхонь реб. жорст. для встановлення кутиків 7. Складання реб. жорст. з кутиками 8. Привар. кутиків			3. Зачищення поверхні під встановлення анкерів 4. Розмічування місць встановлення анкерів 5. Зачищення поверхонь ребер жорсткості для встановлення кутиків 6. Розмічування поверхонь реб. жорст. для встановлення кутиків 7. Складання реб. жорст. з кутиками 8. Привар. кутиків		

Продовження таблиці 4.1. Технологічний процес складання та зварювання конструкції: Варіант II

1	2	3	4	5	6	7
	Лінія 1 (для центральної частини балки)			Лінія 2 (для бокових блоків балки)		
2.	1. Складання двотавра центральної частини балки	1,7	2	1. Складання двотавра бокового блоку 1 2. Складання двотавра бокового блоку 2	1,36	2
3.	1. Зварювання першого поясного шва 2. Кантування 3. Зварювання другого поясного шва	1,65	2	1. Зварювання бокового блоку 1 2. Кантування	1,82	2
4.	1. Кантування 2. Зварювання третього поясного шва 3. Кантування	1,45	2	1. Зварювання бокового блоку 2 2. Кантування	1,82	2
5.	1. Зварювання четвертого поясного шва 2. Контроль якості поясних швів	1,87	2	1. Складання ребер жорсткості бокових блоків балки	2,00	1
6.	1. Складання ребер жорсткості з двох боків	2,05	2	1. Зварювання ребер жорсткості обох блоків з одного боку 2. Кантування 3. Зварювання реб. жорст. обох блоків з іншого боку	1,62	2

Продовження таблиці 4.1. Технологічний процес складання та зварювання конструкції: Варіант II

1	2	3	4	5	6	7
	Лінія 1 (для центральної частини балки)			Лінія 2 (для бокових блоків балки)		
7.	1. Зварювання ребер жорсткості з одного боку 2. Кантування 3. Зварювання ребер жорсткості з іншого боку	1,83	3	1. Зняття секцій з ліній		
Для центрального і бокових блоків балки:						
8.	1. Складання центрального і бокових блоків балки. Час: 1,41 год; 1 людина					
9.	1. Зварювання блоків з одного боку 2. Кантування Час: 1,83 год; 2 чол.					
10.	1. Зварювання блоків з іншого боку 2. Кантування Час: 1,83 год; 2 чол.					
11.	1. Приварювання анкерів 2. Контроль якості монтажних швів 3. Контроль якості анкерів Час: 1,15 год; 3 чол.					

Згідно з розробленим технологічним процесом, час виготовлення балки становить 18,05 години, при цьому у виробничому процесі беруть участь 33 працівника.

Діаграма тривалості операцій (на лінії 1) наведена рис. 4.1.

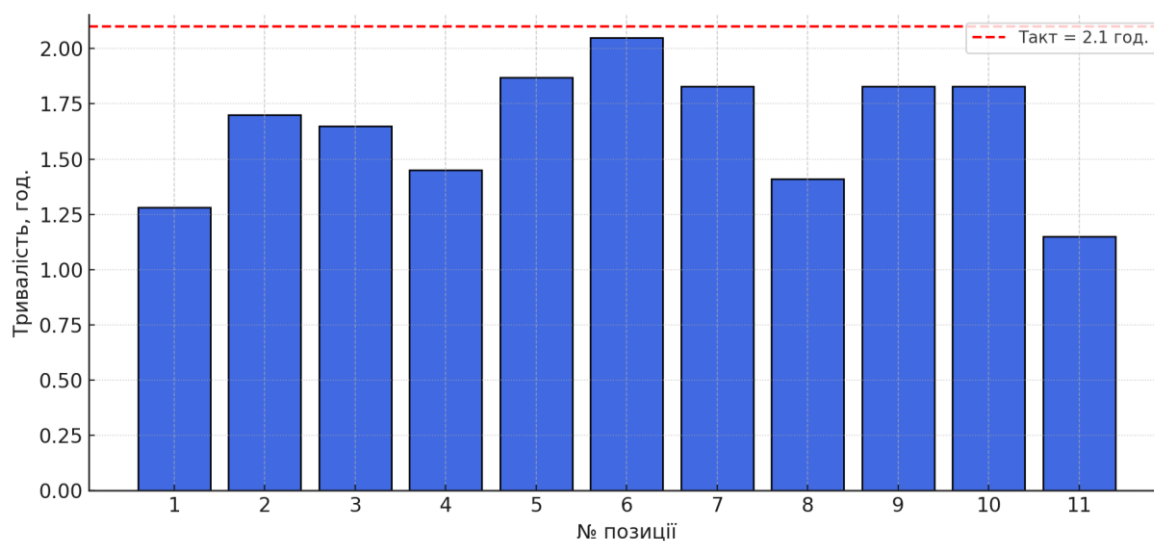


Рис. 4.1. Діаграма тривалості операцій (на лінії 1)

Згідно з розрахунками за формулами 3.22, 3.23, 3.24 отримуємо:

$$Q_T = 0,476 \text{ шт./год.}; K_{з.ср} = 0,48; T_{пр} = 53,43 \text{ люд.-год.}$$

У результаті розрахункової перевірки технологічного процесу за варіантом II встановлено, що він забезпечує часткове впорядкування структури виробництва та перерозподіл операцій, однак характеризується підвищеною трудомісткістю, значною чисельністю персоналу та потребою в додатковому устаткуванні. Це обумовлює зростання виробничих витрат і свідчить про недоцільність його впровадження в заданих умовах. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення більш ефективного варіанта МПЛ. Розробимо Варіант III технологічного процесу складання та зварювання конструкції (табл. 4.2).

Таблиця 4.2. Технологічний процес складання та зварювання конструкції: Варіант III

№ позиції	Зміст операції	Загальна тривалість робіт на позиції, год	Кількість робітників, чол.
1	Зачищення та розмічування поверхонь під ребра жорсткості і анкери, складання стінки та полиць (поз. 1, 5, 21, 22, 27, 28)	1,69	4
2	Зварювання стінки та полиць з обох боків, кантування та ультразвуковий контроль якості стикових швів (поз. 2-4; 6-8; 31)	2,0	2
3	Складання двотавра (поз. 9)	1,84	2
4	Зварювання 1-го та 2-го поясних швів, кантування (поз. 10-13)	1,95	2
5	Зварювання 3-го та 4-го поясних швів, кантування (поз. 14-16)	1,95	2
6	Складання ребер жорсткості з обох боків (поз. 23)	1,85	4
7	Зварювання ребер жорсткості з одного боку, кантування (поз. 24, 25)	1,57	4

Продовження таблиці 4.2. Технологічний процес складання та зварювання конструкції: Варіант III

1	2	3	4
8	Зварювання ребер жорсткості з іншого боку, кантування (поз. 24, 26)	1,57	4
9	Візуальний контроль якості поясних швів, зварювання анкерів (поз. 29, 30)	1,91	2
Окреме робоче місце	Зачистка та розмічування поверхонь ребер під кутики; складання та зварювання кутиків (поз. 17 - 20)	1,25	1

Згідно з розробленим технологічним процесом, час виготовлення балки становить 16,33 години, при цьому у виробничому процесі беруть участь 27 працівників.

Діаграма тривалості операцій наведена на рис. 4.2.

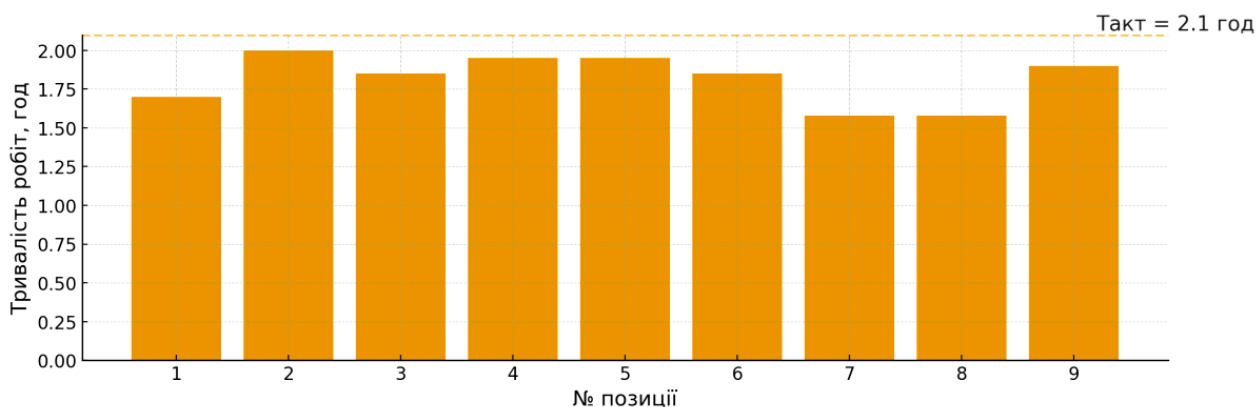


Рис. 4.2. Діаграма тривалості операцій

Згідно з розрахунками за формулами 3.22, 3.23, 3.24 отримуємо:

$$Q_T = 0,5 \text{ шт./год.}; K_{з.ср} = 0,9; T_{пр} = 46,02 \text{ люд.-год.}$$

Удосконалена схема технологічного процесу виготовлення балок наведена на рис. 4.3.

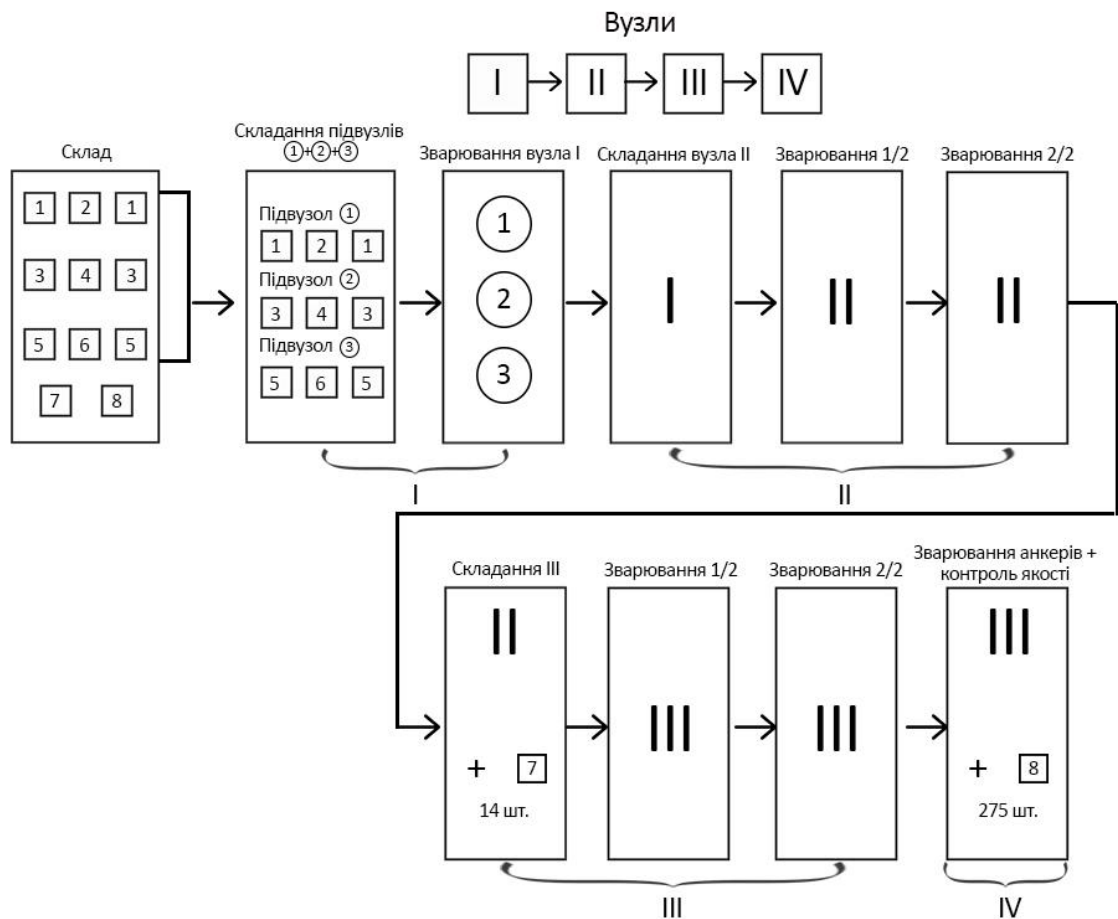


Рис. 4.3. Удосконалена схема технологічного процесу виготовлення балок

4.2. Оцінка варіантів структурної схеми (за показниками організаційно-технологічного проєктування), вибір оптимального варіанту

Для визначення найефективнішого варіанта виготовлення балки проведено порівняльний аналіз трьох розроблених технологічних схем. Основними критеріями оцінки стали технічна продуктивність, середній коефіцієнт завантаження робочих місць, приведена трудомісткість, а також загальна кількість виробничих позицій і задіяного персоналу [41].

Порівняльна характеристика показників варіантів механізованої потокової лінії наведена в табл. 4.3.

Таблиця 4.3.

На основі порівняльної характеристики показників видно, що для варіанту III середній коефіцієнт завантаження позицій ($K_{з.ср} = 0,9$) є найбільш наближеним до рівномірного та забезпечує раціональне використання виробничих потужностей. При цьому технічна продуктивність лінії становить $Q_T = 0,5$ шт./год., а приведена трудомісткість – $T_{пр} = 46,02$ люд.-год., що є меншим порівняно з іншими варіантами. Кількість позицій у варіанті III ($n = 9$) дозволяє скоротити цикл виготовлення конструкції та зменшити загальні трудові витрати. За таких умов доцільним є обрання третього варіанту як базового для впровадження в організацію виробництва.

Варіант II, хоча й характеризується зменшеною кількістю позицій ($n = 11$), виявився фінансово більш затратним: його приведена трудомісткість становить $T_{пр} = 53,43$ люд.-год., а чисельність робітників – $a = 33$. Збільшення трудових і матеріальних витрат, а також потреба у додатковому устаткуванні роблять варіант II менш доцільним для впровадження за умов наявних ресурсів.

Таким, чином, обираємо варіант III.

4.3. Побудова циклограми роботи МЛП

Величину технологічного циклу визначають шляхом побудови графіка циклограми послідовно-паралельного виконання всіх операцій (рис. 4.4).

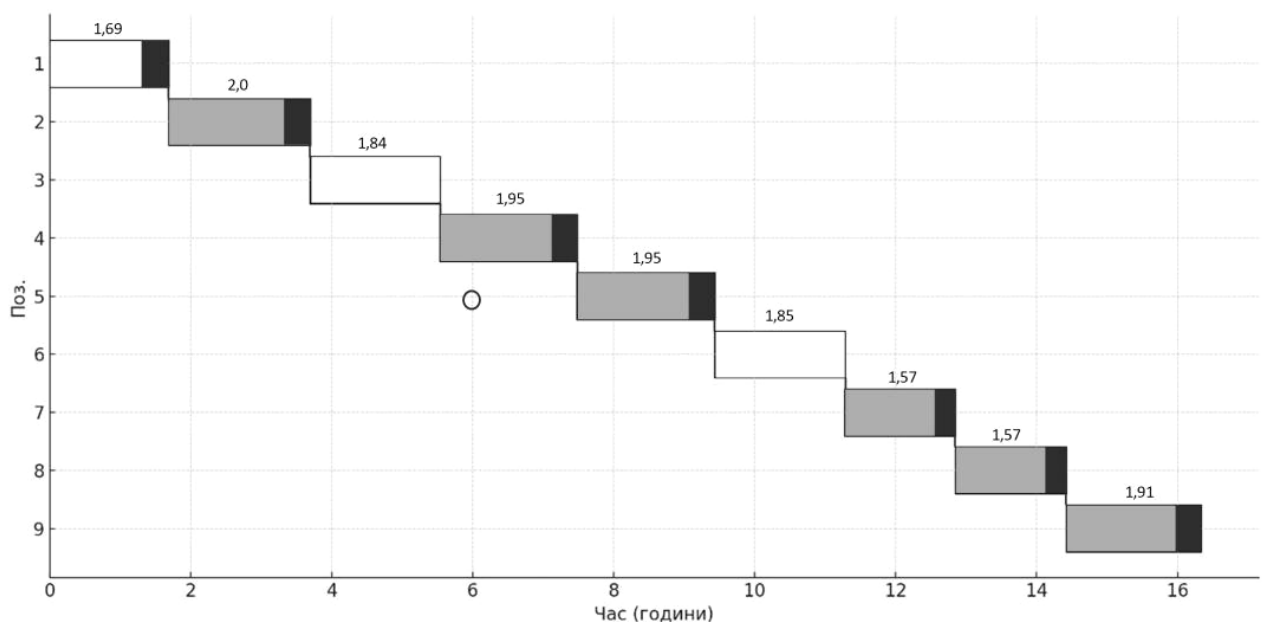


Рис. 4.4. Циклограма послідовно-паралельного виконання всіх операцій: – складання; – зварювання; – інші операції; – окреме робоче місце.

4.4. Розміщення МПЛ у прольоті цеху, розробка технологічного плану прольоту

Після вибору оптимального варіанта МПЛ виникає необхідність її розміщення у прольоті цеху та розробки технологічного плану прольоту. Для прийнятого режиму роботи і такту лінії потрібно визначити умови розміщення обладнання, допустимі навантаження на підлогу, а також виконати розрахунок запасу основних деталей і параметрів контейнерів для їх зберігання з подальшим формуванням схеми розташування у прольоті цеху [41].

Компонувальна схема МПЛ наведена на рис. 4.5.

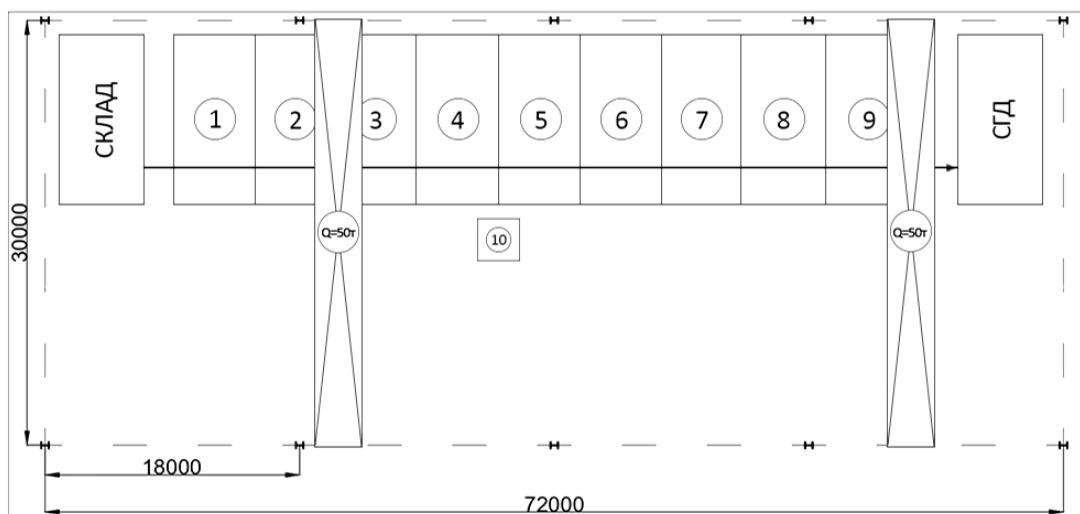


Рис. 4.5. Компонувальна схема МПЛ

Режим роботи МПЛ – двозмінний ($8 \times 2 = 16$ год.)

Такт роботи – 2,1 год.

Допустиме навантаження на $1 \text{ м}^2 = 0,5 \text{ т/м}^2$ (IV клас [41])

Розрахунок запасу листів:

Найбільша деталь – стінка велика.

$$\frac{16}{21} = 7,6 = 8 \text{ шт.}$$

Зберігається у контейнері розміром $7,5 \times 5,5 \times 0,7$.

Маса контейнера – 1 т.

Площа контейнера – $41,25 \text{ м}^2$.

Маса контейнера з балками:

$$M_{\text{заг}} = 2,306 \times 8 + 1 = 19,5 \text{ т.}$$

Навантаження на 1 м^2 :

$$\frac{19,5}{41,25} = 0,47 \text{ т/м}^2, \text{ що не більше допустимого.}$$

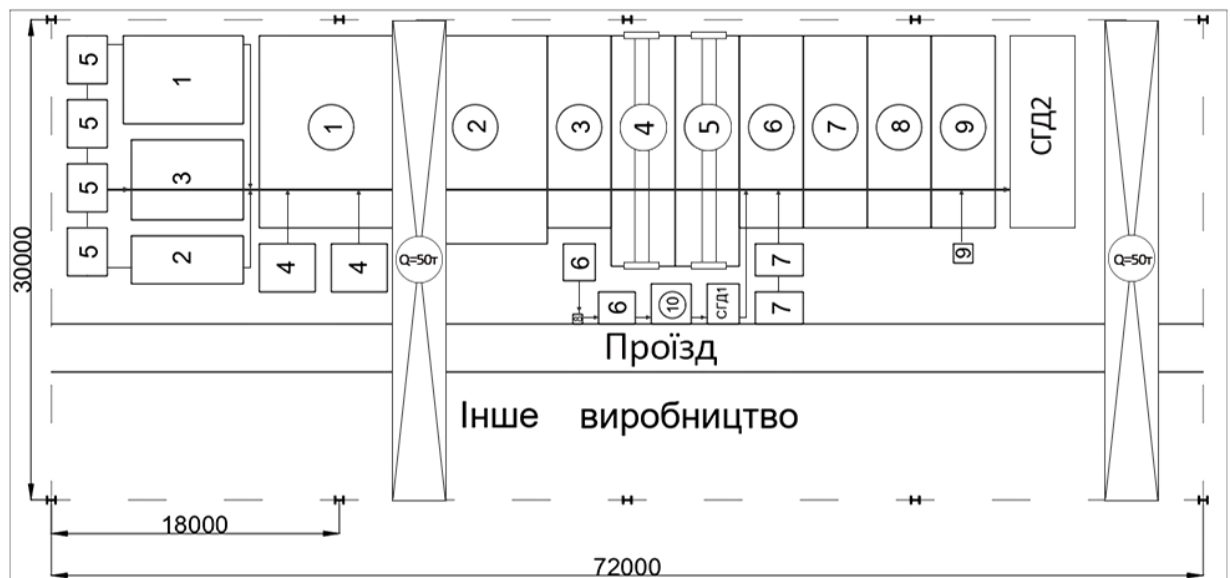
Аналогічно розраховуємо інші деталі.

Результати розрахунів запасу деталей та параметрів контейнерів для їх зберігання наведені в табл. 4.4.

Таблиця. 4.4. Результати розрахунів запасу деталей та параметрів контейнерів для їх зберігання

Деталь	Кількість деталей	Розміри контейнера	Кількість контейнерів
Стінка велика	8	7,5 × 5,5 × 0,7	1
Полиця велика верхня	8	7,0 × 3,0 × 0,3	1
Полиця велика нижня	8	7,0 × 5,0 × 0,3	1
Стінка мала	16	3,0 × 3,5 × 0,3	2
Полиця мала	32	3,0 × 2,5 × 0,3	4
Ребра жорсткості з кутиками	48	2,3 × 2,0 × 0,2	2
Ребра жорсткості без кутиків	64	3,0 × 2,0 × 0,2	2
Кутики	48	0,6 × 0,6 × 0,5	1
Анкери	2200	1,2 × 1,2 × 0,5	1

План розміщення в прольоті цеху складу та механізованої лінії виготовлення балки наведений на рис. 4.5.



Умовні позначення: ①— складання полотен, ②— зварювання полотен, ③— складання двотавра, ④— зварювання двох поясних швів, ⑤— зварювання двох поясних швів, ⑥— складання двотавра з ребрами жорсткості, ⑦— зварювання ребер жорсткості з одного боку, ⑧— зварювання ребер жорсткості з іншого боку, ⑨— зварювання анкерів та контроль якості, ⑩— складання та зварювання кутиків, 1 – стінка велика, 2 – полиця велика верхня, 3 – полиця велика нижня, 4 – стінка мала, 5 – полиці малі, 6 – ребра жорсткості під кутики, 7 – ребра жорсткості без кутиків, 8 – кутики, 9 – анкери, СГД1 – склад ребер жорсткості з кутиками, СГД2 – склад готових балок.

Висновки

1. Розроблено два альтернативні варіанти технологічного процесу складання та зварювання балки та схему технологічного процесу виготовлення балок.
2. Виконано порівняльний аналіз всіх варіантів та обґрунтовано вибір оптимального варіанту III, який забезпечує найвищий середній коефіцієнт завантаження $K_{з.ср} = 0,9$, технічну продуктивність $Q_T = 0,5$ шт./год., мінімальний час виготовлення 16,33 год, 9 позицій та 27 основних робітників.
3. Побудовано циклову діаграму послідовно-паралельного виконання операцій для варіанту III.
4. Розроблено компоувальну схему МПЛ, виконано розрахунок запасу деталей і параметрів контейнерів, підтверджено відповідність навантаження на підлогу цеху допустимим нормам.

Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата

КР.131.6121м.03.04.06.ПЗ

Арк.

81

5. Розроблено технологічний план прольоту цеху з урахуванням двозмінного режиму роботи, такту лінії 2,1 год та раціонального розміщення складу, робочих позицій і транспортних шляхів.

					КР.131.6121м.03.04.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		82

					КР.131.6121м.03.05.06.ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент	Гунченко О.В.				Розробка заходів щодо охорони праці та техніки безпеки		Аркуш	Аркушів
Керівник	Драган С.В.						83	
Консульт.	.						НУК ім. адм. Макарова	
Зав. Кафед.	Драган С.В.							

5. Розробка заходів щодо охорони праці та техніки безпеки

Під час виконання робіт із зварювання двутаврових балок на механізованих потокових лініях виникає низка потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів, пов'язаних із дією електричного струму, високих температур, інтенсивного ультрафіолетового й інфрачервоного випромінювання, зварювального диму, шуму та рухомих частин обладнання. Для забезпечення безпечних умов праці та збереження здоров'я працівників необхідно суворо дотримуватися вимог охорони праці, правил техніки безпеки та виробничої санітарії, визначених чинними нормативними документами — ДСТУ-Н Б А.3.1-16:2013 [57], НПАОП 28.52-1.31-13 [58], НПАОП 0.00-1.16-96 [59], НПАОП 0.00-3.07-09 [60], а також відповідними положеннями ДБН і ДСТУ. Правильна організація робочого місця, застосування засобів індивідуального захисту, справність обладнання та наявність ефективної вентиляції є обов'язковими умовами безпечного виконання зварювальних робіт [57 – 60].

У процесі зварювання на механізованих потокових лініях зварювальні операції виконуються автоматизовано, з мінімальним втручанням людини. Керування технологічним циклом здійснюється оператором-зварювальником з центрального пульта, який контролює параметри струму, напруги, швидкість подачі дроту та переміщення балки. Такий підхід знижує безпосередній контакт працівника із зонами теплового випромінювання та шкідливими викидами, що є важливим чинником охорони праці [34, 61]. Основні небезпечні та шкідливі фактори, характерні для процесів дугового зварювання, наведено в табл. 5.1 [61].

Таблиця 5.1. Основні небезпечні та шкідливі фактори, характерні для процесів дугового зварювання

№	Небезпечний або шкідливий фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки
1	Інтенсивне ультрафіолетове (УФ) та інфрачервоне (ІЧ) випромінювання	Зварювальна дуга	Опіки очей та шкіри, фотоофтальмія
2	Висока температура металу та шва	Зона зварювання, флюс, газ	Опіки, перегрівання, пожежонебезпека
3	Шум і вібрація (до 85 дБА)	Приводи роликів, вентилятори, флюсоподавач, газоподавач	Втома, зниження слуху
4	Рухомі частини механізмів подачі балки	Роликові стенди, портали, конвеєри	Травмування при защемленні

Продовження таблиці 5.1. Основні небезпечні та шкідливі фактори, характерні для процесів дугового зварювання

5	Електричний струм	Зварювальне обладнання	Електротравми при пошкодженні ізоляції
6	Зварювальний дим і гази	Зона дуги	Подразнення органів дихання
7	Недостатнє освітлення або засліплення від дуги	Робоча зона	Перевтома зору, нещасні випадки при орієнтації

Для запобігання впливу виявлених небезпечних і шкідливих факторів необхідно впроваджувати комплекс технічних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки працівників та стабільність технологічного процесу. Раціональне планування робочих місць, використання засобів колективного та індивідуального захисту, а також належне технічне обслуговування обладнання є ключовими умовами безпечної експлуатації потокової зварювальної лінії [34, 61]. Працівники, зайняті на зварювальних операціях, повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту відповідно до НПАОП 0.00-3.07-09 [60].

Пожежна безпека під час експлуатації механізованої зварювальної лінії має особливе значення, оскільки процес зварювання супроводжується виділенням іскор, бризок розплавленого металу, високими температурами та використанням електричного обладнання. Недотримання вимог пожежної безпеки створює ризик займання флюсу, електрокабелів, мастильних матеріалів або розташованого поруч технологічного обладнання. Тому для запобігання аварійним ситуаціям необхідно підтримувати належний протипожежний стан зварювальної дільниці, дотримуватися чинних норм і своєчасно обслуговувати наявні засоби пожежогасіння [61].

Для забезпечення безпечних умов праці зварювальників, а також для підтримання нормативних параметрів мікроклімату у виробничому приміщенні необхідно передбачити систему вентиляції, здатну ефективно видаляти шкідливі гази, пари флюсів і аерозолі, що утворюються під час зварювання. Вибір типу вентиляції та її продуктивності слід виконати на основі розрахунку необхідного повітрообміну [62].

З урахуванням специфіки зварювального виробництва, що супроводжується постійним і нерівномірним виділенням газів, парів та пилу, доцільним є застосування штучної (механічної) вентиляції, яка забезпечує стабільний розрахунковий повітрообмін незалежно від метеорологічних умов, спрямований рух повітряних потоків у зонах виділення шкідливих речовин, а також очищення й підготовку припливного повітря. Повітрообмін при механічній вентиляції здійснюється за рахунок різниці тисків,

створюваної вентилятором. Механічна вентиляція застосовується у випадках недостатніх тепловиділень для аерації або за наявності шкідливих речовин підвищеної токсичності. Вона може бути робочою або аварійною; остання передбачається для приміщень із ризиком раптового надходження небезпечних виділень та, як правило, забезпечує 8–12-кратний повітрообмін за годину. Робоча вентиляція буває загальнообмінною, місцевою або комбінованою.

Загальнообмінна вентиляція забезпечує створення необхідного мікроклімату та чистоти повітряного середовища у всьому об'ємі робочої зони приміщення. Вона застосовується для видалення надлишкового тепла при відсутності токсичних виділень, а також у випадках, коли характер технологічного процесу та особливості виробничого устаткування виключають можливість використання місцевої витяжної вентиляції [62].

Розрізняють чотири основні схеми організації повітрообміну при загальнообмінній вентиляції: зверху вниз, зверху вверх, знизу вверх, знизу вниз (рис. 5.1).

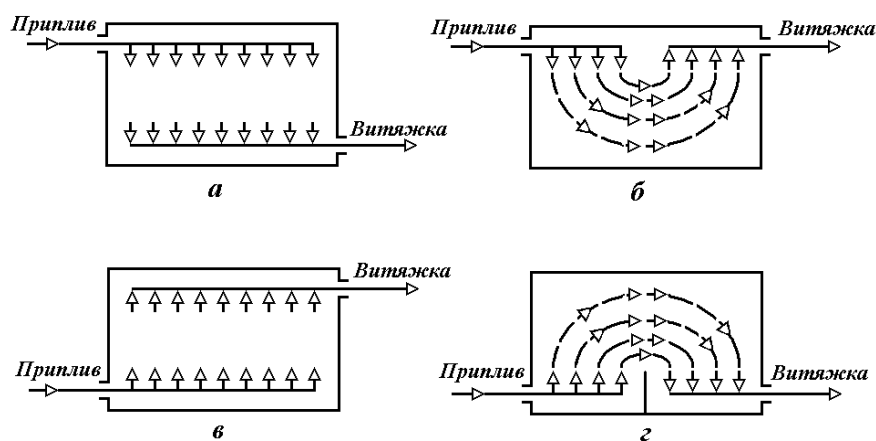


Рис. 5.1. Схема організації повітрообміну при загальнообмінній вентиляції

Схеми зверху вниз (рис. 5.1, а) та зверху вверх (рис. 5.1, б) доцільно застосовувати у випадку, коли припливне повітря в холодний період року має температуру нижчу температури приміщення. Припливне повітря, перш ніж досягти робочої зони, нагрівається за рахунок повітря приміщення. Інші дві схеми (рис. 5.1, в та 5.1, г) рекомендується використовувати тоді, коли припливне повітря в холодний період року підігрівається і його температура вища температури внутрішнього повітря [62].

Якщо у виробничих приміщеннях виділяються гази та пари з густиною, що перевищує густину повітря (наприклад, пари кислот, бензину, газу), то загальнообмінна вентиляція повинна забезпечити видалення 60% повітря з

нижньої зони приміщення та 40% — з верхньої. Якщо густина газів менша за густину повітря, то видалення забрудненого повітря здійснюється у верхній зоні [62].

З огляду на характер технологічного процесу — автоматизоване дводугове зварювання Tandem SAW та механізоване МАГ-зварювання — у приміщенні відбувається інтенсивне виділення зварювального диму та пилу. Тому механізовану потокову лінію доцільно обладнати системою загальнообмінної штучної вентиляції зі схемою організації повітрообміну зверху вниз (рис. 5.1, а).

Методи розрахунку систем штучної вентиляції [63].

Основне завдання розрахунку загальнообміну — визначити необхідну кількість повітря L (м³/год), що подається або вилучається з приміщення. Для приміщень, у яких виділяються шкідливі речовини, повітрообмін визначають за кількістю газів, парів чи пилу, що надходять у робочу зону, шляхом розбавлення їх припливним повітрям до гранично допустимих концентрацій.

Кількість повітря визначається за формулою:

$$L = \frac{\sum G}{C_{гдк} - C_0}, \quad (5.1)$$

де $\sum G$ — надлишкова кількість шкідливих речовин (випарів, газів, пилу), які виділяються в приміщенні, мг/год (приймається відповідно до питомого аерозолеутворення під час зварювання Tandem SAW та МАГ);

$C_{гдк}$ — гранично допустима концентрація шкідливих речовин у повітрі, мг/м³ (приймається виходячи з положень наказу МОЗ України № 1596 [64]); C_0 — концентрація цих речовин у припливному повітрі (приймається 0); L — кількість припливного повітря, м³/год.

Площа поперечного перерізу повітропроводу розраховується за формулою:

$$f = \frac{L}{3600 \times V_p}, \quad (5.2)$$

де L — об'єм транспортованого повітря; V_p — швидкість повітря, м/с (обирається з діапазону 6–12 м/с).

Втрати тиску на тертя розраховують за формулою:

$$R = \frac{\lambda \times V_\phi^2 \times \gamma}{d \times 2 \times g}, \quad (5.3)$$

де λ — коефіцієнт опору тертя, що залежить від шорсткості стінок повітропроводу (для сталевих повітропроводів приймається $\lambda = 0,02$); V_ϕ^2 — фактична швидкість повітря, м/с; d — діаметр повітропроводу (для круглого

перерізу обирається за площею поперечного перерізу повітропроводу), м; γ — питома вага повітря, Н/м³; g — прискорення сили тяжіння, м/с².

Втрати тиску в місцевих опорах розраховуються за формулою:

$$Z = \sum \xi \frac{V_{\phi}^2 \times \gamma}{2 \times g}, \quad (5.4)$$

де Z — місцеві втрати тиску в пристроях, Па, ξ — коефіцієнти місцевих опорів, які приймаються за табличними даними [63].

Загальні втрати тиску в мережі визначаються як сума втрат на тертя та місцевих втрат:

$$H = R \times l + Z, \quad (5.5)$$

де l — довжина повітропроводу, м.

Необхідна потужність електродвигуна вентилятора, кВт, визначається за формулою (13):

$$N_{\text{вент}} = \frac{K \times H \times L}{3600 \times 102 \times \eta}, \quad (5.6)$$

де $N_{\text{вент}}$ — потужність електродвигуна вентилятора, кВт; L — продуктивність вентилятора, м³/год.; H — тиск, створюваний вентилятором, Па; K — коефіцієнт запасу ($K = 1,1-1,5$); η — коефіцієнт корисної дії вентилятора (0,5–0,8). Відповідний $N_{\text{вент}}$ тип електродвигуна обирається за каталогом [63].

Розрахуємо необхідні параметри системи вентиляції за вищевказаними формулами.

Вихідні дані:

Приміщення — механічний цех

Розмір приміщення — $18 \times 58 \times 10$ м

$\Sigma G = 306400$ мг/год (розраховано за ДСТУ EN ISO 15011-1:2021 [65] з урахуванням режимів Tandem-SAW під флюсом та MAG в суміші 80 % Ar + 20 % CO₂ і коефіцієнта використання дуги 50%).

Об'єм повітря, який необхідно замінити, м³/год

Для зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей приймаємо $\Gamma_{\text{ДКзвар.аср.}} = 4$ мг/м³.

$$L = \frac{306400}{4 - 0} = 76600 \text{ м}^3/\text{год}$$

Площа поперечного перерізу повітропроводу, м²

Приймаємо $V_p = 8$ м/с

$$f = \frac{76600}{3600 \times 8} = 0,266 \text{ м}^2$$

Питомі втрати тиску на тертя, Па/м

Діаметр круглого повітропроводу обчислюємо виходячи з площі

поперечного перерізу: $d = \sqrt{\frac{4f}{\pi}}$

$d = 0,57$ м.

Приймаємо стандартний діаметр вентиляційного отвору $d = 0,5$ м.

γ Приймаємо 12 Н/м^3

$$R = \frac{0,02 \times 8^2 \times 12}{0,5 \times 2 \times 9,81} = 1,56 \text{ Па/м}$$

Втрати тиску в місцевих опорах

Приймаємо $\sum \xi = 3,8$ [63].

$$Z = 3,8 \times \frac{8^2 \times 12}{2 \times 9,81} = 148,8$$

Рекомендована довжина повітряпроводу $l = 4$ м [66].

Загальні втрати тиску:

$$H = 1,56 \times 4 + 148,8 = 155,04$$

Необхідна потужність електродвигуна вентилятора:

$$N = \frac{76600 \times 155,04 \times 1,1}{3600 \times 102 \times 0,5} = 0,7 \text{ кВт}$$

На основі отриманих результатів та умов проекту обираємо центробіжний вентилятор низького тиску ВЦ 4-75-4,0 із закритим обдувним електродвигуном типорозміру АИР71В4.

Висновки

Оцінено ризики, пов'язані з умовами праці на зварювальній ділянці, та визначено заходи щодо їх зниження. За результатами розрахунків встановлено параметри вентиляційної системи, відповідно до яких обрано електродвигун закритого обдувного виконання (АИР71В4).

					КР.131.6121м.03.06.06.ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент	Гунченко О.В.				Економічне обґрунтування розробок проекту МПЛ		Аркуш	Аркушів
Керівник	Драган С.В.							
Консульт.	.						90	
Зав. Кафед.	Драган С.В.						НУК ім. адм. Макарова	

6. Економічне обґрунтування розробок проєкту МПЛ

Економічне обґрунтування є важливою складовою проєкту, оскільки дозволяє оцінити раціональність вибору устаткування, режимів зварювання, витратних матеріалів та організації виробництва. У даній роботі ефективність запропонованих технологічних рішень визначається шляхом розрахунку технологічної собівартості складання та зварювання мостової балки за удосконаленою схемою, при цьому вартість основного металу не враховується, оскільки конструкція не змінюється. Для встановлення економічного ефекту розраховуємо витрати на зварювальні матеріали, електроенергію, оплату праці та використання обладнання [41].

Вихідні дані для розрахунків технологічної собівартості складання і зварювання балки наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Вихідні дані для розрахунків технологічної собівартості складання і зварювання балки

Найменування показника	Розмірність	Величина
Річний обсяг продукції	шт.	1890
Ціна 1 кг електродного дроту марки ОК AristoRod 12.50 ESAB (d = 4мм)	грн	247
Ціна 1 кг флюсу марки ОК Flux 10.71	грн	140
Ціна 1 м³ газової суміші 20% CO ₂ + 80% Ar	грн	307
Ціна 1 кг електродного дроту марки ОК AristoRod 12.50 ESAB (d = 1,4мм)	грн	159
Ціна 1 кВт·год електроенергії	грн	9,56
Тарифна ставка оплати праці складальника, Г _{ст}	грн./н-год	138
Тарифна ставка оплати праці зварювальника, Г _{ст}	грн./н-год	120
Тарифна ставка оплати праці контролера, Г _{ст}	грн./н-год	93
Ціна зварювального зварювального комплексу Jasіc MZ-1250 (M310)	грн	250000
Ціна зварювального комплексу Тандем АДФ-2500+ВДУ-1250	грн	290000
Ціна зварювального напівавтомата КП 010-3	грн	80000
Ціна кантувача типу D-8000	грн	100000
Ціна зварювального випрямляча ВДМ-6304М	грн	89000
Ціна зварювального пістолета Bolte GD 25	грн	36000
Ціна джерела живлення ВДУ-1250	грн	130000
Довжина стикових швів	см	320
		320
		560
Довжина кутових швів у тавровому з'єднанні (флюс)	см	3661
Довжина кутових швів у тавровому з'єднанні (газ)	см	5460
Площа наплавки стикових швів	см²	2,0
		2,0
		4,0

Продовження таблиці 6.1. Вихідні дані для розрахунків технологічної собівартості складання і зварювання балки

1	2	3
Площа наплавки кутових швів у тавровому з'єднанні (флюс)	см ²	2,65
Площа наплавки кутових швів у тавровому з'єднанні (газ)	см ²	0,846
Щільність металу	г/см ³	7,9
Коефіцієнт переходу від маси наплавленого металу до витрати матеріалів для зварювання (механізованого в газовій суміші)	—	1,02
Коефіцієнт переходу від маси наплавленого металу до витрати матеріалів для зварювання (автоматичного під флюсом)	—	1,1
Потужність холостого ходу джерела струму	кВт	2,5
ККД зварювального посту (лінії)	—	0,5–0,8
Коефіцієнт, що враховує допоміжний час, К _д	—	1,2
Коефіцієнт, що враховує підготовчо-заклучний час, К _{п-з}	—	1,04
Коефіцієнт обслуговування робочого місця, К	—	1,13
Коефіцієнт використання зварювального посту, К _п	—	0,6

Технологічна собівартість C_T складається з затрат на зварювальні матеріали C_M , на електроенергію C_e , на оплату праці $C_{пр}$, амортизаційні відрахування C_a та відрахування на поточний ремонт обладнання C_p , тобто:

$$C_T = C_M + C_e + C_{пр} + C_a + C_p \quad (6.1)$$

Затрати на кожний з матеріалів C_{mi} визначаються за формулою:

$$C_{mi} = \Pi_{mi} \times \Pi_{mi} \quad (6.2)$$

де Π_{mi} — витрати і-го матеріалу; Π_{mi} — ціна 1 кг даного матеріалу.

Витрати на дрід та флюс, кг, розраховуються за формулою:

$$G_{mi} = G_H \times k, \quad (6.3)$$

де k — коефіцієнт переходу від маси наплавленого металу до витрати матеріалів для зварювання. Для дроту $k = 1,02$, для флюсу $k = 1,1$.

Витрати газу, м³, розраховуються за формулою:

$$H_{г.заг} = 0,8 \times G_{др} \quad (6.4)$$

Вага наплавленого металу, кг розраховується за формулою:

$$G_H = \gamma \times F_H \times l_{шв} \quad (6.5)$$

Необхідна кількість кожного з матеріалів Π_{mi} визначається згідно з ДСТУ 3159-95 «Ресурсозбереження. Нормування витрат зварювальних матеріалів» [67].

Загальні затрати на матеріали розраховується за формулою:

$$C_M = \Sigma C_{mi}. \quad (6.6)$$

Вартість електроенергії розраховується за формулою:

$$C_e = W \times C_e, \quad (6.7)$$

де W — повні витрати електроенергії одним зварювальним постом, кВт×год; C_e — ціна 1 кВт×год електроенергії.

$$W = \frac{U_d \times I_{зв}}{\eta \times 1000} \times \tau + \omega_0(\tau_1 - \tau), \quad (6.8)$$

де U_d – напруга дуги; η – ККД джерела живлення ($\eta = 0,6 \dots 0,8$ – для зварювання постійним струмом); ω_0 – потужність, що витрачається джерелом живлення під час холостого ходу ($\omega_0 = 2 \dots 3$ кВт для постійного струму); τ – час горіння дуги, год.; $\tau_1 = \frac{\tau}{K_n}$ – час зварювання з урахуванням коефіцієнту K_n використання зварювального поста (для зварювання у цехових умовах $K_n = 0,5 \dots 0,8$).

Повні затрати на основну заробітну плату виконання визначаються трудомісткістю виконання роботи, середньою годинною тарифною ставкою робітника відповідної професії з урахуванням доплатної зарплати та єдиного соціального внеску і розраховуються за формулою:

$$C_{зпi} = [(1,1 \dots 1,5) \times T_p \times \Gamma_{ст}] \times 1,22, \quad (6.9)$$

де T_p – трудомісткість виконання (складання, зварювання, зачищення тощо) зварного виробу, н-год; $\Gamma_{ст}$ – середня годинна тарифна ставка робітника відповідної професії, грн./год.

Трудомісткість складання для поздовжніх стикових швів розраховується за формулою:

$$T_{p,ск} = 0,0033 \times [s - 6] + 0,187, \quad (6.10)$$

де s – товщина металу, мм.

Для таврових з'єднань при виконанні поясних швів трудомісткість складання розраховується за формулою:

$$T_{p,ск} = (0,19H + 0,26) \times (0,0143s + 0,58) \times 1,5 \quad (6.11)$$

Для таврових з'єднань (ребра жорсткості) нормування часу розраховується за табличними даними [41].

Трудомісткість зварювання розраховується за формулою:

$$T_{p,зв} = l_{шв} \times T_o \times K_d \times K_{п-з} \times K, \quad (6.12)$$

де T_o – основний час – це час горіння дуги та наплавлення металу на 1м шва, год; K_d – коефіцієнт, що враховує додатковий час; $K_{п-з}$ – коефіцієнт, що враховує підготовчо-заклучний час; K – коефіцієнт обслуговування робочого місця; m – кількість проходів при зварюванні.

					КР.131.6121м.03.06.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		93

Для автоматичного зварювання:

$$T_o = \frac{m}{V_{зв}}, \quad (6.13)$$

де m – число проходів.

Для механізованого зварювання в газовій суміші:

$$T_o = \frac{F_1 \gamma}{I_{зв1} \times \alpha_n} + \frac{F_n \gamma}{I_{звn} \times \alpha_n}, \quad (6.14)$$

де γ – густина металу шва, г/см³ ($\gamma = 7,9$ г/см³); α_n – коефіцієнт наплавлення, г/(А × год); F_1 – площа поперечного перерізу зварного шва для першого проходу, см²; F_n – площа поперечного перерізу шва для наступних проходів, см².

Амортизаційні відрахування від кожного виду обладнання C_{ai} та відрахування на поточний ремонт C_{pi} визначаються за наступними формулами:

$$C_{ai} = \frac{\sum B_i \times H_{ai}}{100} \quad (6.15)$$

$$C_{pi} = \frac{\sum B_i \times H_p}{100}, \quad (6.16)$$

де B_i , H_{ai} , H_p – вартість, норма амортизаційних відрахувань та норма витрат на поточний ремонт обладнання [41].

Річна сума амортизаційних відрахувань $C_{p.ai}$ та річна сума відрахування на поточний ремонт $C_{p.pi}$ визначаються за наступними формулами:

$$C_{p.ai} = \frac{C_{ai}}{7 \text{ років}} \quad (6.17)$$

$$C_{p.pi} = \frac{C_{pi}}{7 \text{ років}} \quad (6.18)$$

Розрахуємо технологічну собівартість складання і зварювання балки за вищезазначеними формулами.

Стикові з'єднання (автоматичне зварювання під флюсом)

$l_{шв1} = 4,4$ м; $l_{шв2} = 1,6$ м

Вага наплавленого металу (6.5):

$G_{н1} = 7,9 \times 2,0 \times 100 = 1,58$ кг (на 1 м шва)

$G_{н2} = 7,9 \times 4,0 \times 100 = 3,16$ кг (на 1 м шва)

					КР.131.6121м.03.06.06.ПЗ	Арк.
						94
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		

$$G_{н.заг1} = 4,4 \times 1,58 = 6,95 \text{ кг}$$

$$G_{н.заг2} = 1,6 \times 3,16 = 5,06 \text{ кг}$$

Загальна вага наплавленого металу складає 12 кг.

Витрати матеріалів та ресурсів на стикові з'єднання розраховано за формулами 6.3, 6.5, 6.8. Результати розрахунків наведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2. Витрати матеріалів та ресурсів на стикові з'єднання

G_н, кг	G_{др}, кг	G_{фл}, кг	W, кВт×год
12	12,24	13,2	95,4

Собівартість виконання стикових з'єднань для одного виробу розраховано за формулами 6.2, 6.7, 6.9 – 6.13. Результати розрахунків наведено в табл. 6.3.

Таблиця 6.3. Собівартість виконання стикових з'єднань для одного виробу

C_{др}, грн	C_{фл}, грн	C_е, грн	C_{ск}, грн	C_{зв}, грн	C_к, грн
2999	1848	912	296,3	290	25

Таврові з'єднання (поясні шви; автоматичне зварювання під флюсом)

$$l_{шв} = 36,61 \text{ м}$$

Витрати матеріалів та ресурсів на таврові з'єднання (поясні шви) розраховано за формулами 6.3, 6.5, 6.8. Результати розрахунків наведено в табл. 6.4.

Таблиця 6.4. Витрати матеріалів та ресурсів на таврові з'єднання (поясні шви)

G_н, кг	G_{др}, кг	G_{фл}, кг	W, кВт×год
76,88	78,42	84,57	1561,4

Собівартість виконання таврових з'єднань (поясні шви) для одного виробу розраховано за формулами 6.2, 6.7, 6.9 – 6.13. Результати розрахунків наведено в табл. 6.5.

Таблиця 6.5. Собівартість виконання таврових з'єднань (поясні шви) для одного виробу

C_{др}, грн	C_{фл}, грн	C_е, грн	C_{ск}, грн	C_{зв}, грн	C_к, грн
19213	11840	18035	681,5	695,7	162,3

Таврові з'єднання (ребра жорсткості; механізоване зварювання в газовій суміші)

$$l_{шв} = 54,6 \text{ м}$$

Витрати матеріалів та ресурсів на таврові з'єднання (ребра жорсткості) та анкери розраховано за формулами 6.3, 6.4, 6.8. Результати розрахунків наведено в табл. 6.6.

Таблиця 6.6. Витрати матеріалів та ресурсів на таврові з'єднання (ребра жорсткості) та анкери

G_n , кг	$G_{др}$, кг	H_r , м ³	W , кВт×год
36,47	37,2	29,76	1536

Собівартість виконання таврових з'єднань (ребра жорсткості) та анкерів для одного виробу розраховано за формулами 6.2, 6.7, 6.9 – 6.12, 6.14. Результати розрахунків наведено в табл. 6.7.

Таблиця 6.7. Собівартість виконання таврових з'єднань (ребра жорсткості) та анкерів для одного виробу

$C_{др}$, грн	C_r , грн	C_e , грн	$C_{ск}$, грн	$C_{зв}$, грн	C_k , грн
5914,8	9136	14684	1370,4	2367,3	300

Загальні витрати матеріалів та ресурсів на один виріб наведені в табл. 6.8.

Таблиця 6.8. Загальні витрати матеріалів та ресурсів на один виріб

$G_{др}$, кг	$G_{фл}$, кг	H_r , м ³	W , кВт×год
127,86	97,77	29,76	3192,8

Для подальшого визначення технологічної собівартості необхідно врахувати витрати, пов'язані з експлуатацією обладнання. Як приклад виконано розрахунок амортизаційних відрахувань та витрат на поточний ремонт автомата механізованого зварювання КП-010-3 за формулами 6.15 – 6.18.

Витрати на амортизацію обладнання:

$$C_{акп} = \frac{80000 \times 14}{100} = 11200 \text{ грн}$$

Річна сума амортизації:

$$C_{р.акп} = \frac{11200}{7} = 1600 \text{ грн}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$C_{pKP} = \frac{80000 \times 15}{100} = 12000 \text{ грн}$$

Річна сума ремонту:

$$C_{p.pKP} = \frac{12000}{7} = 1714 \text{ грн}$$

Аналогічно виконано розрахунки для всього обладнання, задіяного у процесі зварювання балки. У результаті подальших розрахунків загальна річна сума амортизаційних відрахувань становить 18797 грн, а витрати на поточний ремонт обладнання — 19963 грн.

Річна програма = 1890 шт.

Амортизація на 1 виріб:

$$\frac{18793}{1890} = 9,95 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт на 1 виріб:

$$\frac{19963}{1890} = 10,56 \text{ грн.}$$

Технологічна собівартість 1 виробу (6.1):

$$C_T = 50950,8 + 33631 + 6188,5 + 9,95 + 10,56 = 90790,8 \text{ грн}$$

Технологічна собівартість виготовлення конструкцій за рік:

$$C_{p.T} = 90790,8 \times 1890 = 171594612 \text{ грн.}$$

Зведені затрати на технологічну собівартість складання та зварювання мостової балки наведено в табл. 6.9.

Таблиця 6.9. Зведені затрати на технологічну собівартість складання та зварювання мостової балки

Найменування статей затрат	Величина на 1 виріб, грн	Величина, грн
Зварювальні матеріали	50950	96297012
Електроенергія	33631	63562590
Заробітна плата	6188	11696265
Амортизаційні відрахування по обладнанню	10	18805
Витрати на поточний ремонт обладнання	11	19958
Технологічна собівартість	1 виробу — 90790	річного випуску виробів — 171594612

Висновок

За результатами проведених розрахунків технологічна собівартість виготовлення однієї конструкції мостової балки становить 90790 грн. При річному обсязі випуску 1890 виробів загальна технологічна собівартість продукції складає 171 594 612 грн. на рік.

					КР.131.6121м.03.06.06.ПЗ	Арк.
						98
Зм.	Арк.	№докум	Підпис	Дата		

Загальні висновки:

1. Розроблено удосконалену технологію виготовлення сталевих балок із використанням високопродуктивних способів зварювання, обладнання та оснастки, а також спроектовано механізовану потокову лінію.

2. Обрано автоматичне багатодугове зварювання під флюсом Tandem SAW для основних швів балки як найбільш продуктивний та технологічно стабільний процес.

3. Розраховано оптимальні режими зварювання. Для поясних швів параметри режиму зварювання становлять: $I_{зв} = 600$ А (при двох дугах — 1200 А), $U_d = 29$ В, $V_{зв} = 31$ м/год; для стикових з'єднань 2.5.5: $I_{зв} = 600$ А; $U_d = 35$ В; $V_{зв} = 30$ м/год; для таврових з'єднань ребер жорсткості: $I_{зв} = 200$ А; $U_d = 29$ В; $V_{зв} = 15,48$ м/год. Встановлено, що місцеві зварювальні деформації балки не перевищують допустимих значень. Експериментально підтверджено якість швів за розробленою WPS відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 15614-1:2019.

4. Підібрано сучасні зварювальні матеріали: для автоматичного зварювання під флюсом стикових і поясних швів — зварювальний дріт ОК Autrod 12.32 у поєднанні з агломерованим основним флюсом ОК Flux 10.71; для механізованого зварювання в захисних газах (кутові шви ребер жорсткості, кутики, прихоплення) — зварювальний дріт ОК AristoRod 12.50 ESAB (діаметр 1,4 мм) із захисною газовою сумішшю 80% Ar + 20% CO₂.

5. Розроблено удосконалений технологічний процес, який забезпечує середній коефіцієнт завантаження $K_{з.ср} = 0,9$, технічну продуктивність $QT = 0,5$ шт./год. та мінімальний час виготовлення 16,33 год.

6. Розроблено циклограму роботи спроектованої МПЛ, яка демонструє значне скорочення циклу тривалості операцій, компоувальну схему МПЛ та технологічний план прольоту цеху з тактом лінії 2,1 год.

7. Для роботи спроектованої МПЛ вибрано відповідне зварювальне устаткування: для стикових швів під флюсом — комплекс Jasic MZ-1250 (M310) з трактором АТ-1; для поясних швів — зварювальна головка Тандем АДФ-2500 з джерелом живлення ВДУ-1250; для ребер жорсткості, кутиків і прихоплень — апарат для механізованого зварювання КП-010-3 з джерелом ВДМ-6304М; для приварювання анкерних шпильок — пістолет Bolte GD 25 (Drawn Arc Stud Welding) з під'єднанням до ВДУ-1250. Розроблено конструкцію кантувача балок яка забезпечує механізацію складально-зварювальних операцій.

8. Розраховано технологічну собівартість складально-зварювальних операцій при виготовленні балки, яка становить 90 790 грн. на одну балку, а

					КР.131.6121м.03.00.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		99

річний обсяг витрат — 171 594 612 грн., що підтверджує економічну доцільність упровадження розробленої технології.

9. У роботі розглянуто питання техніки безпеки та виконано розрахунок системи вентиляції. Обрано центробіжний вентилятор низького тиску ВЦ 4-75-4,0 із закритим обдувним електродвигуном типорозміру АИР71В4.

					КР.131.6121м.03.00.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		100

Список використаних джерел інформації

1. ДБН В.2.3-26:2024. Мости та труби. Проектування сталевих конструкцій [Текст].
2. Годован, Д. Сталі в мостобудуванні: новий виток розвитку [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://metinvest-smc.com/ua/articles/stali-v-mostostroenii-novuj-vitok-razvitiya>
3. Драган, С. В. Проектування зварних конструкцій [Текст] : метод. вказівки до виконання курсового проекту / С. В. Драган, С. А. Лой. – Миколаїв : НУК, 2018. – 119 с.
4. ДСТУ EN 1993-1-1:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для будівель [Текст].
5. ДСТУ EN 1993-1-8:2011. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-8. Проектування вузлів [Текст].
6. ДСТУ 9054:2020. Металеві конструкції. Зварні з'єднання. Загальні технічні вимоги [Текст].
7. Будівельні конструкції [Текст] : навч. посібник / За заг. ред. Клименка Є. В. – Київ : Центр учбової літератури, 2012. – 426 с. – ISBN 978-617-673-068-2.
8. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Електронний ресурс] : підр. для студ. спец. 161 «Хімічні технології» / М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С. Васильєв. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 318 с.
9. Лінія зварювання балок типу HBWL [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://stanko-arena.ru/catalogue/corimpex/liniya-svarki-balok-tipa-hbwl.html>
10. Лінія зварювання балок типу BWM [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://stanko-arena.ru/catalogue/corimpex/liniya-svarki-balok-tipa-bwm.html>
11. Дослідження процесу виробництва двотаврових балок: від сталевих балок до майстерності виробництва двотаврових балок [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://zhouxianggroup.com/uk/blog/h-beam-manufacturing-process/>
12. Мельник, І. В., Бачкай, О. С. Принципові конструктивні вирішення монолітних плоских залізобетонних прогонових будов мостів з полегшувальними вставками [Текст] // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – 2015. – № 823. – С. 229–235.

13. Павліков, А. М. Залізобетонні конструкції: будівлі, споруди та їх частини : підручник [Текст] / А. М. Павліков. – Полтава : ПолтНТУ, 2017. – 284 с. – ISBN 978-966-182-471-2.
14. Капустян, О. Є. Конспект лекцій з дисципліни «Виробництво зварних конструкцій» [Текст]. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 78 с.
15. Sehwal, M. M. Load carrying capacity of hot-rolled hybrid cellular steel beams: experimental investigations [Текст] / M. M. Sehwal, M. Celikag // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2022. – Т. 47, № 10. – С. 12633–12648.
16. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проєктування [Текст].
17. Чорнолоз, В. С. Методичні вказівки до виконання курсової роботи “Робоча площадка виробничої будівлі” [Текст] / В. С. Чорнолоз. – Рівне : НУВГП, 2009. – 36 с.
18. ДСТУ ISO 5817:2016. Зварювання. Зварні з’єднання. Рівні якості недосконалостей [Текст].
19. Хоменко, О. Г. Сталеві конструкції у будівництві [Текст] : підручник. – Глухів, 2018. – 347 с.
20. Сталь S420NL – 1.8912 [Електронний ресурс] // АРМА-ПРОФ. – Режим доступу:
<https://arma-prof.com.ua/products/stal-s420nl-1-8912/>
21. S355 | Високоміцна конструкційна сталь [Електронний ресурс] // Steelprogroup. – Режим доступу: <https://steelprogroup.com/ru/high-strength-structural-steel/s355/>
22. Сталь C245 [Електронний ресурс] // Metinvest. – Режим доступу:
<https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/s245>
23. Підгурський, М. І. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Технологія та устаткування зварювання плавленням» [Текст] / М. І. Підгурський, Б. П. Татарин, І. Б. Окіпний, В. С. Сенчишин. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. – 95 с.
24. Сливінський, О. А. Здатність до зварювання конструкційних матеріалів [Електронний ресурс] : розрахунково-графічна робота / О. А. Сливінський. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.
25. Сталь S420NL [Електронний ресурс]. – Arma-Prof. – Режим доступу: <https://arma-prof.com.ua/products/stal-s420nl-1-8912/>
26. Bublik, O. V. Advantages and shortcomings of ceramic (agglomerated) fluxes in comparison with fused fluxes used for the same

					КР.131.6121м.03.00.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		102

applications / O. V. Bublik, S. V. Chamov // Welding International. – 2010. – Vol. 24, № 9. – P. 730–733.

27. Гетманець, С. М. Ремонтне зварювання [Текст] : конспект лекцій / С. М. Гетманець, Д. В. Степанов. – Київ : НТУУ «КПІ», 2012. – 60 с.

28. Попередній підігрів у зварюванні і що не варто забувати [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://blog.svarcom.net/materials/predvaritelnyj-nagrev-v-svarke.html>

29. Гринь, О. Г. Проектування функціональних зварних конструкцій [Текст] : посібник / О. Г. Гринь, Г. М. Куцій, Д. А. Волков. – Краматорськ : ДДМА, 2023. – 168 с.

30. Бугаєнко, Б. В. Технологічні процеси зварювального виробництва [Текст] : методичні вказівки до виконання курсового проєкту / Б. В. Бугаєнко, В. Я. Сагань. – Миколаїв : НУК, 2010. – 53 с.

31. Перемітько, В. В. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Технологія та устаткування зварювання плавленням» [Текст] / В. В. Перемітько. – Дніпродзержинськ, 2013.

32. Гетманець, С. М. Реноваційні технології зварювання і споріднених процесів [Текст] / С. М. Гетманець, Д. В. Степанов. – 2013.

33. Муляр, Ю. І. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина II : навчальний посібник [Текст] / Ю. І. Муляр, С. В. Репінський. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 123 с.

34. SENLISWELD – H Beam Production Line Supplier [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.senlisweld.com/h-beam-production-line/>

35. Singh, A. A review of effect of welding parameters on the mechanical properties of weld in submerged arc welding process / A. Singh, R. P. Singh // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 26. – P. 1714–1717.

36. Автоматичне зварювання під флюсом [Електронний ресурс] //. – Режим доступу: <https://studref.com/author/3346/sokolov-vladimir-sergeevich>

37. Єльцов, В. В. Технологія зварювання плавленням : електронний навчальний посібник / В. В. Єльцов. – Тольятті : Вид-во ТГУ, 2019. – 1 опт. диск. – 181 с.

38. Improving productivity with submerged arc welding [Електронний ресурс] // TheFabricator. – Режим доступу: <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/arcwelding/improving-productivity-with-submerged-arc-welding>

39. Коновалов, А. В. Теорія зварювальних процесів [Текст] / А. В. Коновалов, А. С. Кюркін, Е. Л. Макаров [та ін.]. – Москва : МДТУ ім. Н. Е. Баумана, 2007. – 752 с.

					КР.131.6121м.03.00.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		103

40. Shi, Y. Numerical simulation for shaping feature of molten pool in twin-arc submerged arc welding / Y. Shi, X. Liu, Y. Zhang // Open Journal of Applied Sciences. – 2012. – № 2. – Р. 47–53.

41. Драган, С. В. Технологія зварювання суднових корпусних конструкцій (проектування і організація) [Текст] : навч. посіб. / С. В. Драган, Ж. Г. Голобородько, І. В. Сімутенков ; Нац. ун-т кораблебудув. ім. адмірала Макарова ; під заг. ред. С. В. Драгана. – Миколаїв : НУК, 2017. – 323, [1] с. : іл., табл.

42. ДСТУ EN ISO 15614-1:2019. Специфікація та кваліфікація процедур зварювання металів. Загальні правила. [Текст].

43. Дріт зварювальний ОК AristoRod 12.32 ESAB [Електронний ресурс] // Nisa-svarka. – Режим доступу: <https://nisa-svarka.com.ua/ua/p39684267-provoloka-svarochneya-autrod.html>

44. ОК Flux 10.71 [Електронний ресурс] // Nisa-svarka. – Режим доступу: <https://nisa-svarka.com.ua/ua/p39566024-svarochnyj-flyus-flux.html>

45. Зварювальний дріт ОК AristoRod 12.50 ESAB [Електронний ресурс] // Nisa-svarka. – Режим доступу: <https://nisa-svarka.com.ua/ua/p1636501007-svarochneya-provoloka-aristorod.html>

46. Інженерія поверхні і реновація виробів [Текст] : матеріали 15-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 01–05 черв. 2015 р., Затока, Одес. обл. – Київ : АТМ України, 2015. – 228 с.

47. Зварювальний апарат інверторного типу Jasic MZ-1250 (M310) [Електронний ресурс] // Jasic. – Режим доступу: <https://jasic.ua/ua/product/mz-1250-m310-367>

48. Зварювальний випрямляч ВДУ-1250 [Електронний ресурс] // Welderbest. – Режим доступу: https://welderbest.com.ua/equipment/electro/vdu_1250_selma

49. Зварювальна головка типу АДФ-2500 (Тандем) [Електронний ресурс] // Mashagroprom. – Режим доступу: [https://mashagroprom.by/сварочная-головка-типа-адф-2500-\(тандем\).html](https://mashagroprom.by/сварочная-головка-типа-адф-2500-(тандем).html)

50. КП 010-3 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://kzes.com/wp-content/uploads/2017/02/kp-010-3.pdf>

51. Зварювальний випрямляч ВДМ-6304М (500А) [Електронний ресурс] // Kievsvarka. – Режим доступу: <https://kievsvarka.com.ua/ua/p553310798-svarochnyj-vypriyarnitel-vdm.html>

52. Костін, О. М. Зварювальні матеріали [Текст] : навч. посібник. – Миколаїв : НУК, 2004. – 225 с.

53. Drawn Arc Stud Welding Gun GD 25 [Електронний ресурс] // Iprocure. – Режим доступу: <https://iprocare.ai/product/bolte-drawn-arc-stud-welding-gun-gd-25-o3-25-mm-heavy-duty-drawn-arc-stud-welding>
54. Кантувач D-8000 [Електронний ресурс] // Tweko. – Режим доступу: <https://tweko.com.ua/ru/product/kantovatel-d-8000/>
55. Драган, С. В. Розрахунки вузлів і механізмів складально-зварювальної оснастки [Текст] : навч. посібник. – Миколаїв : НУК, 2020. – 108 с.
56. Ультразвуковий контроль [Електронний ресурс] // Ukrintech. – Режим доступу: <https://ukrintech.com.ua/ultrazvukovij-kontrol>
57. ДСТУ-Н Б А.3.1-16:2013. Настанова щодо виконання зварювальних робіт при монтажі будівельних конструкцій. [Текст].
58. НПАОП 28.52-1.31-13. Правила охорони праці під час зварювання металів. [Текст].
59. НПАОП 0.00-1.16-96. Правила атестації зварників. [Текст].
60. НПАОП 0.00-3.07-09. Норми безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту працівникам загальних професій різних галузей промисловості. [Текст].
61. Биковський, О. Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій [Текст] : підручник. – Київ : Основа, 2021.
62. Жидецький, В. Ц., Джигирей, В. С., Мельников, О. В. Основи охорони праці [Текст]. – Львів : Афіша, 2000. – 348 с.
63. Облаштування і розрахунок системи загальнообмінної вентиляції виробничих приміщень [Текст] : метод. вказівки / С. С. Левуш, В. П. Скачко. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2012. – 25 с.
64. МОЗ України № 1596. Наказ Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони. [Текст].
65. ДСТУ EN ISO 15011-1:2021. Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання проб аерозолів і газів, утворюваних під час дугового зварювання. Частина 1. [Текст].
66. Левченко, О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві : навчальний посібник для практичних робіт з охорони праці для студентів зварювальних спеціальностей / уклад. О. Г. Левченко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – Електронне навчальне видання. – 181 с.

67. ДСТУ 3159-95. Ресурсозбереження. Нормування витрат зварювальних матеріалів. Загальні вимоги, методи визначення нормативів ручного і механізованого електрозварювання

					КР.131.6121м.03.00.06.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		106