

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
кафедра інжинірингу машинобудівних технологій
(повна назва кафедри)

на здобуття освітнього ступеня

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Удосконалення технології виготовлення гофрованих балок з технологічними особливостями**

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МПЗм-61
спеціальності 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис

(прізвище та ініціали)

(підпис

(прізвище та ініціали)

(підпис

(прізвище та ініціали)

(підпис

(прізвище та ініціали)

(підпис

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра на тему: "Удосконалення технології виготовлення гофрованих балок з технологічними особливостями" складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Об'єм розрахунково-пояснювальної записки складає 86 аркушів формату А4, графічна частина включає 6 аркушів формату А1. Робота охоплює аналітичну, дослідницьку, технологічну, конструкторську частини, а також розділи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

У роботі розглянуто ключові аспекти виробництва гофрованих балок, включаючи вибір матеріалів, процес формування гофрованих елементів, автоматизоване зварювання, обробку поверхонь та контроль якості. Особлива увага приділена інтеграції сучасних роботизованих систем, таких як ARC Mate 120 iC / 12L, та використанню високоефективних зварювальних установок, зокрема KempArc Pulse 350.

Запропоновані технічні рішення спрямовані на вдосконалення процесу виготовлення, зниження трудомісткості та підвищення продуктивності. Проведено моделювання навантажень балок у SolidWorks, результати якого підтвердили ефективність запропонованих технологій. Розроблена методика забезпечує високу точність виготовлення, зменшення кількості дефектів та підвищення експлуатаційних характеристик.

Ключові слова: автоматичне зварювання, зварюваність, технологічний процес, режими зварювання, напружено-деформований стан.

Ключові слова: АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ, ЗВАРЮВАНІСТЬ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, РЕЖИМИ ЗВАРЮВАННЯ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНИЙ СТАН.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	8
1.1. Опис конструкції виробу та умов його роботи.....	8
1.2 Технічні умови до конструкції виробу.....	13
1.3 Аналіз технологічного процесу	15
2 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА	17
3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	24
3.1 Технічне обґрунтування способу зварювання.....	24
3.2 Опис технологічного процесу	39
4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	49
4.1 Розрахунок сили притиску балки в кондукторі	49
4.2 Опис роботи запропонованих зварювальних пристосувань	51
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	54
5.1 Характеристика і аналіз потенційних небезпек і шкідливих чинників у цеху .	54
5.2 Шляхи збереження працездатності і підвищення продуктивності праці.....	56
5.3 Підвищення стійкості інженерно-технічного комплексу до ударної хвилі	57
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61
ДОДАТКИ.....	63

ВСТУП

Розвиток сучасного будівництва та машинобудування висуває високі вимоги до ефективності, надійності та економічності металевих конструкцій. Гофровані балки, які є одними з найсучасніших конструктивних рішень, знайшли широке застосування в багатоповерховому будівництві, мостобудуванні, а також у виробництві промислових і транспортних споруд. Їхня унікальна конструкція, що поєднує легкість і високу міцність, дозволяє досягти значної економії матеріалів та ресурсів при збереженні експлуатаційних характеристик.

Актуальність удосконалення технології виготовлення гофрованих балок полягає у необхідності адаптації виробничих процесів до сучасних вимог, які включають підвищення точності виготовлення, оптимізацію витрат матеріалів і енергії, а також забезпечення відповідності міжнародним стандартам якості. Особливості виготовлення таких балок передбачають використання сучасного обладнання, автоматизацію процесів, контроль якості на кожному етапі виробництва та застосування інноваційних рішень для забезпечення надійності і довговічності виробів.

Метою даної кваліфікаційної роботи є аналіз існуючих технологічних процесів виготовлення гофрованих балок, ідентифікація їхніх недоліків та розробка рекомендацій щодо вдосконалення технології з урахуванням сучасних технічних і технологічних вимог.

У роботі буде розглянуто ключові аспекти виробництва гофрованих балок, включаючи вибір матеріалів, процес формування гофрованих елементів, зварювання, обробку поверхонь та контроль якості. Особлива увага приділятиметься інтеграції інноваційних технологій, які дозволяють досягти

оптимізації виробничих процесів, зменшити кількість відходів і підвищити експлуатаційні характеристики балок.

Результати цього дослідження сприятимуть підвищенню конкурентоспроможності підприємств, які займаються виготовленням гофрованих балок, а також їхньому впровадженню в нові сфери застосування.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Опис конструкції виробу та умов його роботи

Сталеві балки з гофрованими стінками вперше були запропоновані для використання у глобальній практиці у 1930-х роках. Незважаючи на інноваційність цієї концепції, тодішній рівень розвитку зварювальних технологій та відсутність спеціалізованого обладнання в металургійній промисловості не дозволили їм стати широко розповсюдженими. Однак, починаючи з 1960-х років, в Європі ці балки стали ефективно використовуватися у складі сталевих каркасів, а з 1980-х років вони знайшли своє застосування у конструкціях автомобільних мостів як в Європі, так і в Японії. Сьогодні сталеві балки з гофрованими стінками широко використовуються для створення перекриттів у багатоповерхових житлових комплексах, промислових спорудах, а також у купольних конструкціях адміністративних будівель [1].

Науковці розробили та детально дослідили різні модифікації гофр, які відрізняються за своїми характеристиками (див. Рисунок 1). Кожна гофра має певні переваги і обмеження, як з технологічної точки зору (наприклад, легкість виробництва і складності у формуванні зварних з'єднань), так і з точки зору впливу на несучу спроможність конструкції. Науковці також наголосили на можливості зменшення ваги конструкції, що підвищує її стійкість до динамічних і сейсмічних навантажень, що робить гофровані балки ефективними в різних умовах експлуатації. Зниження ваги конструкції сприяє зменшенню витрат на виробництво, транспортування та монтаж, а також знижує навантаження на опорні елементи, що веде до економії витрат під час установки та подальшої експлуатації.

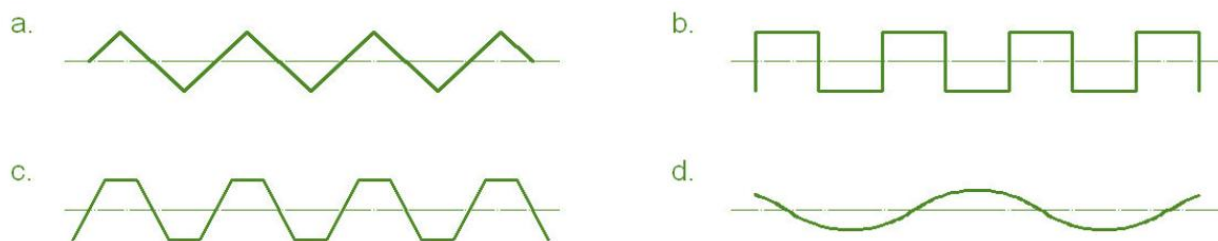


Рис. 1.1 - Форми гофрування стінок: а - трикутна; б - прямокутна; с - трапецієподібна; d - синусоїдальна.

Для виробництва пасів цих балок використовуються різні матеріали, такі як прокатна сталь з прямокутним перетином, електрозварні зігнуті труби, а також залізобетонні компоненти. Гофростінки ж можуть бути виготовлені з високоміцних сталей чи легких металевих сплавів.

Гофровані сталеві балки здобули значне розповсюдження у сфері будівництва завдяки своїм винятковим характеристикам. Вони широко застосовуються у конструкціях ригелів, колон, каркасів житлових та промислових об'єктів, а також у будівництві мостів з великими прогонами та кранових шляхів, де використовуються як основні елементи перекриттів та покрівель.

Гофробалка, відома також під назвою Sin-beam (від лат. "sinus" — крива), є ключовим елементом конструкцій з прогонами, маючи хвилеподібний профіль гребеня та широкі плоскі ребра. Цей тип балки представляє собою зварену двотаврову конструкцію. Верхні та нижні пояси балки виготовляються з гарячекатаної сталі товщиною від 6 до 30 мм і шириною від 120 до 450 мм. Стінка балки виконана у формі синусоїдальної гофри з холоднокатаної сталі, товщиною від 2,0 до 3,0 мм, з можливістю варіювання висоти конструкції.

Завдяки гофрованій стінці, конструкція балок ефективно протистоїть згинальним навантаженням, а її профільовані елементи мають підвищену стійкість до довготривалої статичної навантаженні. Полки балки розподіляють згинальні моменти та вертикальні навантаження, тоді як гофровані стінки ефективно сприймають поперечні сили. Синусоїдальний профіль ребер має перевагу у запобіганні місцевих деформацій, які часто виникають у плоских пластинах [1-4].

Згідно з діючими стандартами проектування сталевих конструкцій, для виробництва гофрованих балок зазвичай використовують гарячекатану сталь не нижче марки С255 для поясів та холоднокатану тонколистову сталь СтЗсп для стінок. Проте, в залежності від специфічних вимог замовника та нормативно-технічної документації, можливе застосування інших будівельних матеріалів для конкретних проектів.

На поточному етапі розвитку будівельної індустрії відбувається активний пошук інноваційних підходів до проектування житлових та громадських будівель. Мета полягає в зменшенні часу будівництва, спрощенні виробничих процесів, зниженні витрат на зведення споруд та підвищенні їхніх експлуатаційних властивостей. Стосовно легких металевих конструкцій, особливо важливим стає досвід використання двотаврових балок з тонкими стінками, що заслуговує на подальше обговорення та вдосконалення цієї прогресивної технології.

SIN-балки виявилися ефективними для використання у конструкціях з середніми та великими прольотами, зокрема завдяки можливості точного виготовлення за індивідуальними замовленнями із максимальною довжиною до 80 метрів.

Гофробалки ефективно використовуються в ролі прогонів, ригелів та колон для каркасних конструкцій. Властивості SIN-балок дозволяють їм досягати максимальної несучої здатності при оптимальних параметрах ваги та висоти. Профільовані стінки цих балок забезпечують підвищену жорсткість у порівнянні з плоскими стінками традиційних двотаврів, з тією ж товщиною. Це дозволяє знижувати необхідність у додаткових ребрах жорсткості та відповідно зменшувати кількість металу, необхідного для будівництва, що сприяє оптимізації витрат на матеріали.

Основні переваги використання балок з гофрованою стінкою включають наступні аспекти: • Ефективне сприйняття балкою згинальних моментів завдяки гофрованій стінці забезпечує високу міцність конструкції; • Гофро-балки мають від 10 до 30% меншу металомісткість порівняно зі стандартними звареними балками і на 40-60% менше у порівнянні з гарячекатаними балками; • Легкість

гофро-балок дозволяє охоплювати прольоти до 40 метрів без додаткових опор, використовувати легші фундаменти і уникати використання важкої підйомної техніки під час монтажу; • Відсутність потреби у поперечних ребрах жорсткості, окрім опорних точок і місць концентрації великих навантажень, спрощує конструкцію; • Гофровані балки стають ефективною альтернативою традиційним фермам: при однаковій висоті балки і ферми мають порівнянну металомісткість, але проектування та виробництво балок є менш трудомісткими.

Гофробалки демонструють численні переваги у великих прольотах (20 м і більше), зокрема їх висота становить лише до 1,5 м, на відміну від 2,4 м у традиційних ферм. Це дозволяє знизити загальну висоту будівлі, зекономити на матеріалах для конструкцій і опаленні, оскільки зменшується обігріваний обсяг приміщення без втрати корисного об'єму [1-4].

Крім того, через компактні розміри, гофро-балки легше транспортувати, що знижує витрати на транспортування. Швидкий монтаж цих балок забезпечується завдяки високій точності виготовлення та зручним болтовим з'єднанням. Їх високий антикорозійний захист, забезпечений оцинкованим покриттям, виключає потребу в додатковій обробці.

Оригінальний зовнішній вигляд гофро-балок може стати виразним елементом дизайну. Крім того, матеріал здатний витримати землетруси інтенсивністю до 9 балів, що є показником високої сейсмостійкості.



Рис. 1.2 – Гофробалки

Для виготовлення балок ми використовуємо сталі таких марок як ВСт3пс і 16Г2АФ, при цьому остання відома своєю високою якістю. Детальні характеристики цих матеріалів наведено в таблицях 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 Хімічний склад [5]

Сталь	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Cu	As
16Г2АФ	0.14 - 0.2	0.3 - 0.6	1.3 - 1.7	до 0.3	до 0.035	до 0.03	до 0.4	0.08 - 0.14	0.015 - 0.025	до 0.3	до 0.08
ВСт3пс	0.14 - 0.22	0.05 - 0.17	0.4 - 0.65		до 0.05	до 0.04	до 0.3	-	-		

Таблиця 1.2 – Механічні властивості [5]

Сталь	Сортамент -	Розмір	Напр.	σ_B	σ_T	δ_5	ψ	КСУ
		мм	-	МПа	МПа	%	%	
ВСт3пс	Прокат гарячекатаний.	до 20		370-480	245	26		
16Г2АФ	Лист	до 50		510	390	19		

Одним із вирішальних аспектів при роботі зі сталлю є її зварюваність. Зварюваність характеризує можливість матеріалу створювати міцне зварне з'єднання, яке відповідає всім технічним вимогам конструкції та умовам експлуатації з використанням конкретних методів зварювання. Важливим показником технологічної зварюваності є збереження властивостей зварного з'єднання на рівні властивостей основного металу.

Для оцінки зварюваності металів використовують розрахунок еквівалента вуглецю C_e , деталі якого приведені в джерелі [6].

$$C_e = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B + \frac{S}{600} + \frac{H}{60}; \quad (1.1)$$

ВСтЗпс:

$$C_e = 0,12 + \frac{0,17}{30} + \frac{0,65 + 0,3 + 0,3}{20} + \frac{0,3}{60} + \frac{2,5}{60} = 0,23$$

16Г2АФ:

$$C_e = 0,2 + \frac{0,6}{30} + \frac{1,7 + 0,3 + 0,4}{20} + \frac{0,3}{60} + \frac{0,035}{600} + \frac{2,5}{60} = 0,38$$

Еквівалент вуглецю у сталях не перевищує 0,45, що вказує на відмінну зварюваність цих матеріалів. Завдяки цьому, сталь можна ефективно зварювати застосовуючи будь-які наявні методи зварювання без потреби в додаткових технологічних заходах, таких як попередній або супровідний підігрів.

1.2 Технічні умови до конструкції виробу.

При виробництві поясних елементів гофрованих балок зазвичай використовують гарячекатану листову сталь універсального типу із класом міцності не нижче С255, відповідно до ДСТУ Б В.2.6-199:2014. Для стінок балок застосовується холоднокатана листова сталь марки СтЗсп, яка відповідає ДСТУ 2651:2005. Також можливе використання інших конструкційних матеріалів в залежності від особливостей замовлення, вимог замовника, наявності матеріалів та проектно-технічних рішень виробника.

У процесі виготовлення гофрованих балок важливо застосовувати спеціалізований метод зварювання, що дозволяє досягти якісного провару одностороннього шва, який з'єднує тонку стінку з поясним елементом. Важливо, щоб механічні властивості металу в зоні зварювання відповідали чи перевищували нормативні показники основного металу. Також критично важливо відсутність кристалізаційних тріщин у зварних з'єднаннях, оскільки їх присутність може значно знизити міцність конструкції [7].

При здійсненні дугового зварювання слід використовувати зварювальний дріт згідно з ДСТУ 3671-97, флюс відповідно до ДСТУ 3261.8-95, та електроди згідно з ДСТУ ISO 18275:2008. Зварні шви в з'єднаннях поясів, стінок та ребер жорсткості мають бути неперервними уздовж всієї довжини гофрованої балки. Для гофрованих балок допускається використання стикових зварних з'єднань, які забезпечують поперечні стики. Ці з'єднання мають бути виконані таким чином, щоб їхня міцність була рівною міцності елементів, які вони з'єднують. За технологічними вказівками компанії «Zeman Bauelemente», кількість поперечних стиків визначається виробничими стандартами [4].

При зварюванні гофрованих балок існують обмеження на кількість поперечних стиків, які залежать від загальної довжини балки:

- для балок довжиною менше ніж 10 метрів допускається не більше двох стиків;
- для балок довжиною 10 метрів і більше допускається не більше трьох стиків.

Між стиками повинна бути дистанція не менше 3 метрів, а мінімальна відстань від кінця балки до першого стику має бути не менше 1 метра. Розташування стиків у стінках балки повинно бути не ближче ніж на 100 мм від стиків поясів балки.

Після завершення процесу зварювання необхідно ретельно очистити всі шви від шлаку та металевих залишків. Підкладні планки слід видаляти акуратно, уникаючи ударних методів, щоб не пошкодити основний метал. Вимоги до кількості та типу допустимих дефектів у зварних швах мають відповідати ДСТУ 3491-96.

Залежно від призначення та умов експлуатації, гофровані балки вимагають належного захисту від корозії. За даними проектної документації та відповідно до стандартів ДСТУ Б В.2.6-193:2013, захист металевих конструкцій може забезпечуватися за допомогою лакофарбових чи полімерних покриттів, а також методом гарячого цинкування, яке виконується на виробничих майданчиках. Товщина такого захисного покриття, нанесеного на заводі, має бути не менше 40 мікрометрів.

Точність геометричних параметрів компонентів гофрованих балок є вирішальною для якості збірки та функціонування конструкцій, і має строго відповідати лімітам допустимих відхилень, вказаним у замовленні або технічних специфікаціях. Використання сучасних технологій і автоматизація на виробництві дозволяють досягти високої точності у виготовленні, забезпечуючи відповідність всім проектним стандартам (див. рисунок 2). Для гофрованих балок затверджені наступні параметри допустимих відхилень:

- Довжина гофрованої балки може варіюватися в межах від 0 до 5 мм;
- Висота гофрованої балки допускає відхилення в межах ± 3 мм;
- Зміщення осі гофрованої стінки відносно осі поясу не повинно перевищувати 5 мм;
- Ширина поясів балки має допустиме відхилення ± 5 мм.

1.3 Аналіз технологічного процесу

Аналіз технологічного процесу виробництва двотаврових гофрованих балок демонструє ряд визначальних етапів. Сучасне виробництво таких балок представляє собою автоматизований неперервний процес з продуктивністю до 20 тисяч тонн на рік. Починається процес з подачі рулонної сталі, яка спочатку проходить через розмотувач, а потім направляється в випрямляч для усунення внутрішніх напруг. Після цього сталь ріжеться на смуги заданих розмірів.

Далі, смуги сталі потрапляють в профілюючий прес, де відбувається формування гофрованої стінки. Торці цієї стінки притискуються до полиць за допомогою гідравлічного пристрою. Правильність геометрії гофрованої стінки перевіряється лазерним сканером, за що слідує зварювання з'єднань між стінкою і полицями за допомогою двох зварювальних пістолетів. Зварювання виконується лише з одного боку, оскільки стінка має невелику товщину. Елементи кріплення приварюються вручну на наступному етапі.

На завершальних етапах готова балка піддається зачищенню, фарбуванню та сушінню, щоб забезпечити її готовність до подальшого використання у будівельних проектах.

Враховуючи існуючі виклики в процесі автоматизованого зварювання, особливо перегрівання вертикальної стінки балки в зоні термічного впливу (ТВ), існує необхідність оптимізації технології. Рекомендується адаптувати процес таким чином, щоб зосередити більшу частину теплового впливу на поясах балок, де теплова енергія має менший ризик завдати шкоди. Це дозволить зменшити ризик перегрівання та підвищити якість зварних з'єднань, забезпечуючи кращу структурну стійкість та довговічність балок.

2 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

Як відомо [8-10], перетин балки вибирають, враховуючи значення найбільших моментів вздовж прольоту балки та величини найбільших поперечних сил. Максимальні значення цих зусиль діють на обмежених ділянках прольоту; максимальні моменти для шарнірно обпертих балок діють посередині прольоту, а максимальні значення поперечних сил – в при опорних зонах. На ділянках прогонів, де зусилля є меншим, міцність сталі використовується лише частково, що створює передумови для зменшення перерізу в цих зонах, відповідно, для економії сталі. [8-10]

На практиці широко застосовують тільки зміну перерізу полицок при опорних зонах шляхом зменшення їх ширини. Це зумовлено як простотою конструктивного вирішення, так і високою технологічністю. Економія сталі може досягати 10 % [8]. Такий спосіб є широко відомим і є аналітичні рішення розв'язку таких задач. Використання такого способу для балок з гофрованою стінкою має свої особливості, які найкраще розв'язувати за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм, зокрема SOLID WORKS.

Модель гофрованої балки зі змінною шириною стінки (рис.2.1) побудована в SOLID WORKS на основі конструктивної схеми.

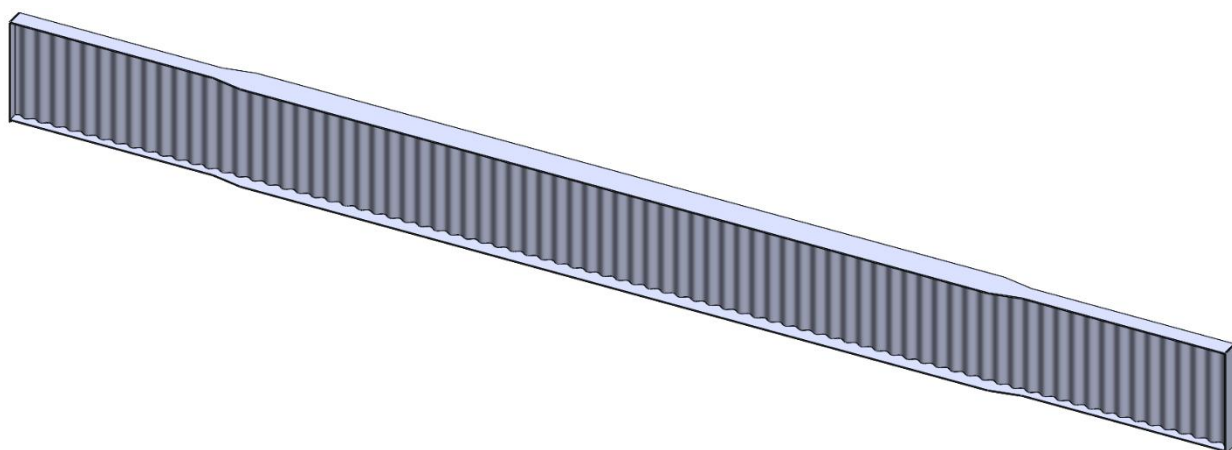


Рис. 2.1 Модель гофрованої балки з синусоїдною стінкою та змінним перерізом полиці

Балка є шарнірно обпертою (рис.2.2).

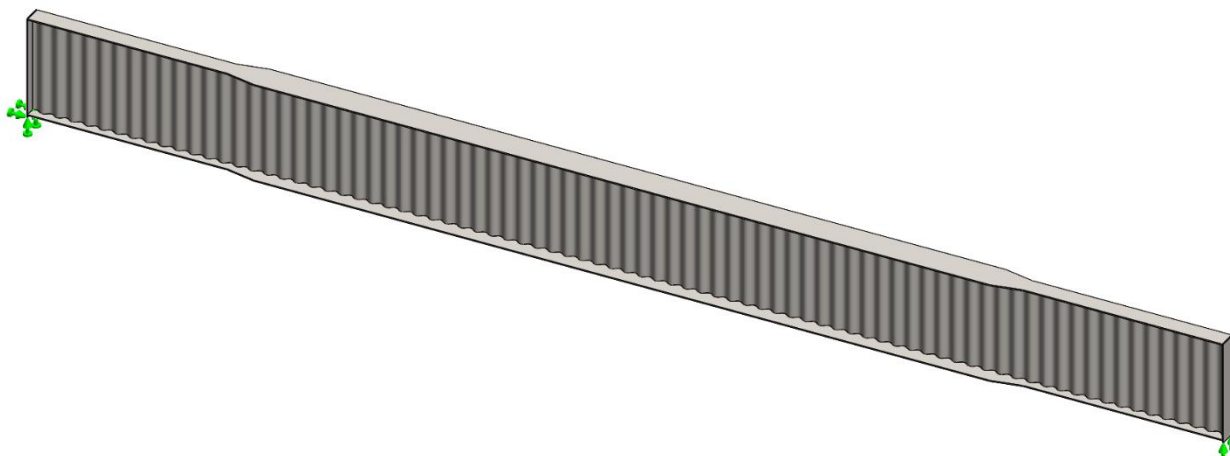


Рис.2. 2. Умови обпирання балки

Балка рівномірно навантажена зусиллям 30 кН/м.п. (рис.2.3 та 2.4).

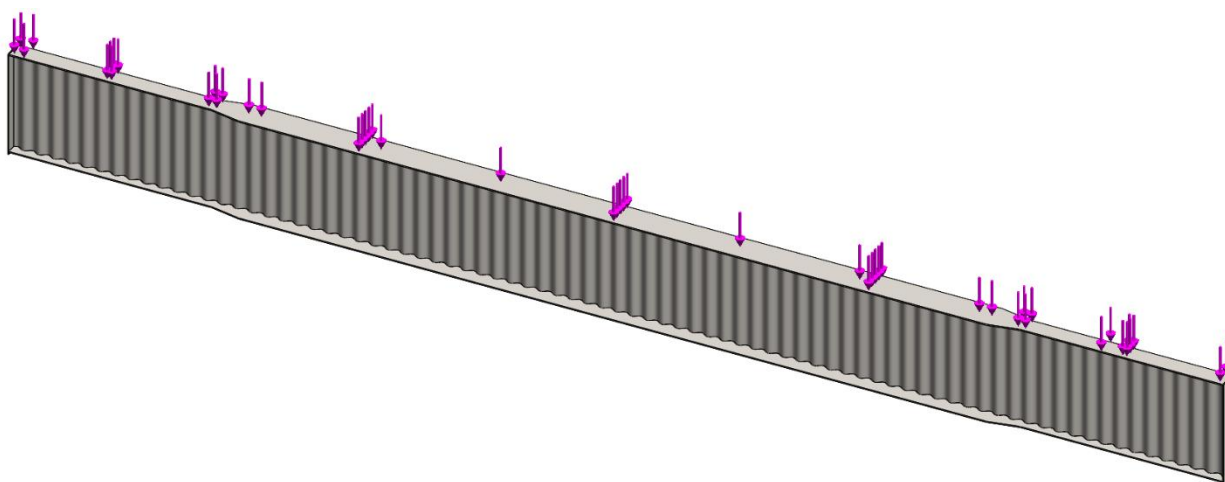


Рис.2.3. Схема завантаження балки зі змінною шириною полиць

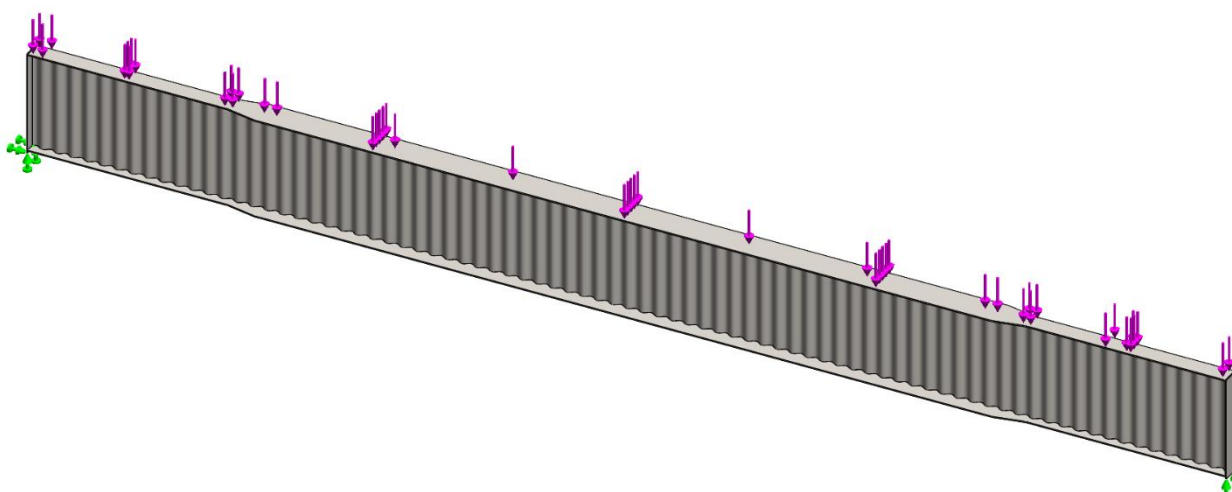
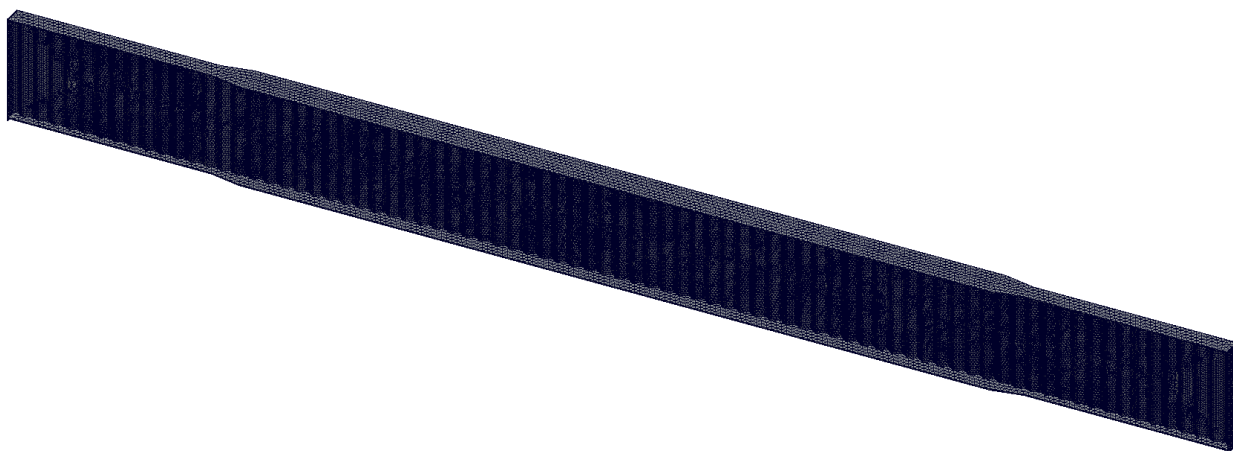
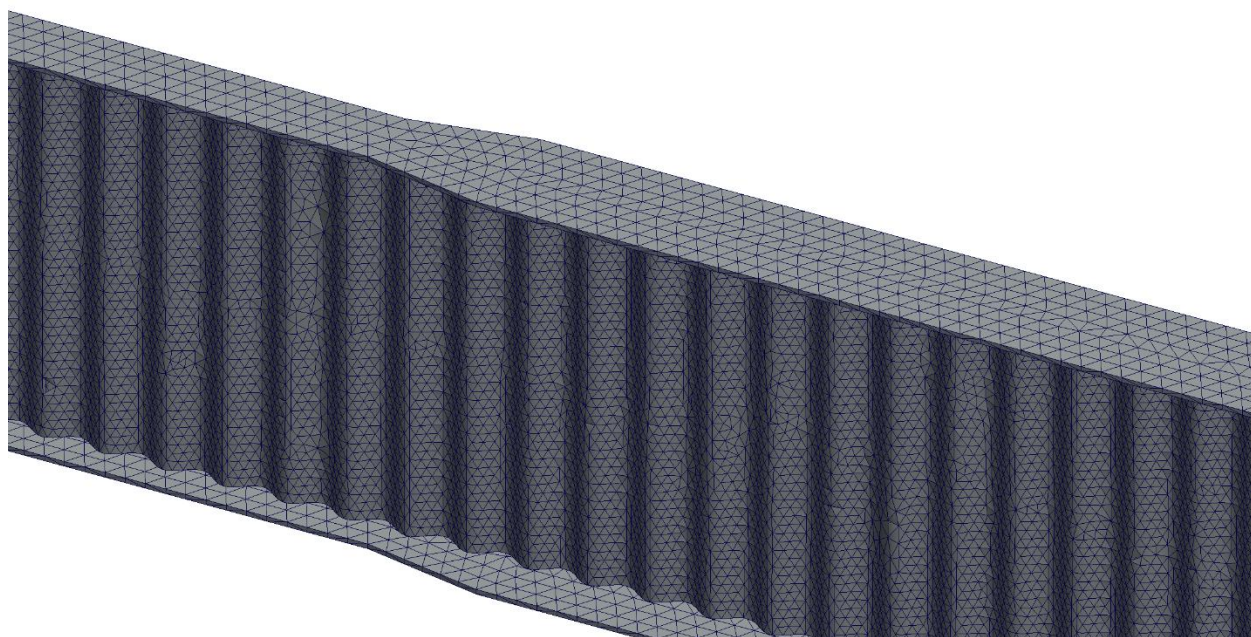


Рис. 2.4. Схема завантаження на обпирання гофрованої балки зі змінною шириною полиць

Скінчено-елементна модель балки зі змінною шириною полиць створена в програмі SOLID WORKS. Максимальний розмір елемента не перевищує 50 мм.



а)



б)

а) загальний вигляд балки з синусоїдною стінкою та змінною шириною полиць; б) збільшений фрагмент балки

Рис.2.5. Гофрована балка з сіткою скінчених елементів

У результаті розрахунку методом скінчених елементів в програмі SOLID WORKS отримали значення номінальних напружень (за Фон Мізесом)(рис.2.6 а) та прогинів (рис. 2.6 б,в) балки зі змінною шириною полиць.

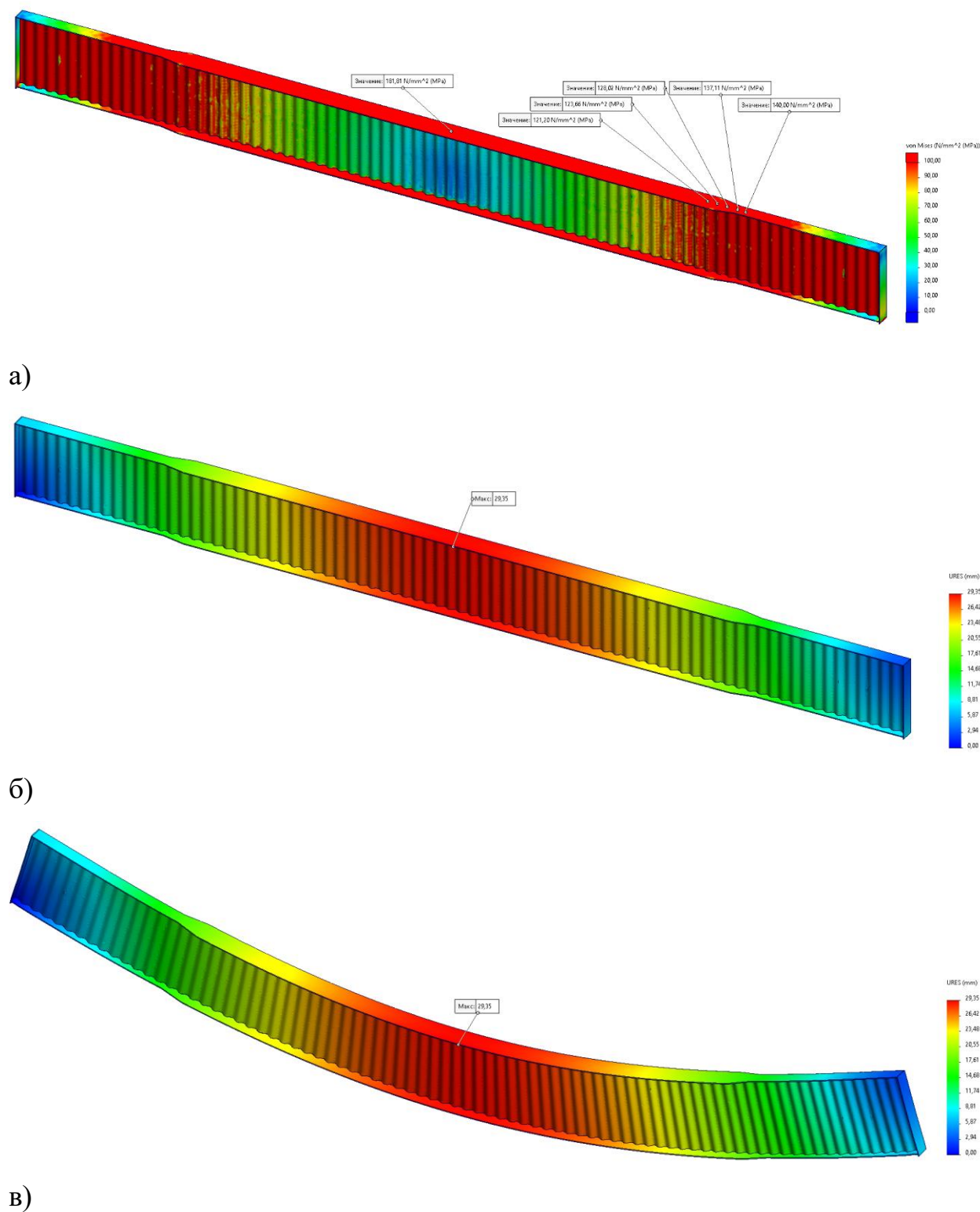


Рис. 2.6. Картина розподілу напружень (а) та переміщень (б, в) в балці з синусоїдною перфорованою стінкою та змінним перерізом полиць

Аналіз напружень у полиці балки змінного перетину (рис.б а) показує, що максимальні напруження 181,81 МПа реалізуються посередині балки, далі поступово зменшуються до 121,20 МПа. В зоні плавного переходу полиці з більшої

ширини на меншу напруження поступово зростають до значення 140 МПа. Зазначимо, що допустимі напруження складають 240 МПа (сталь Ст3сп). Максимальні прогини для такої балки теж не перевищують допустимих значень, але є на 16,9 % більшими, ніж для балки зі сталим розміром полиць.

Також побудована картина розподілу коефіцієнта запасу міцності балки за напруженнями.

Отримано мінімальні запаси міцності: 1,37 в приопорній області та 1,21 – посередині балки.

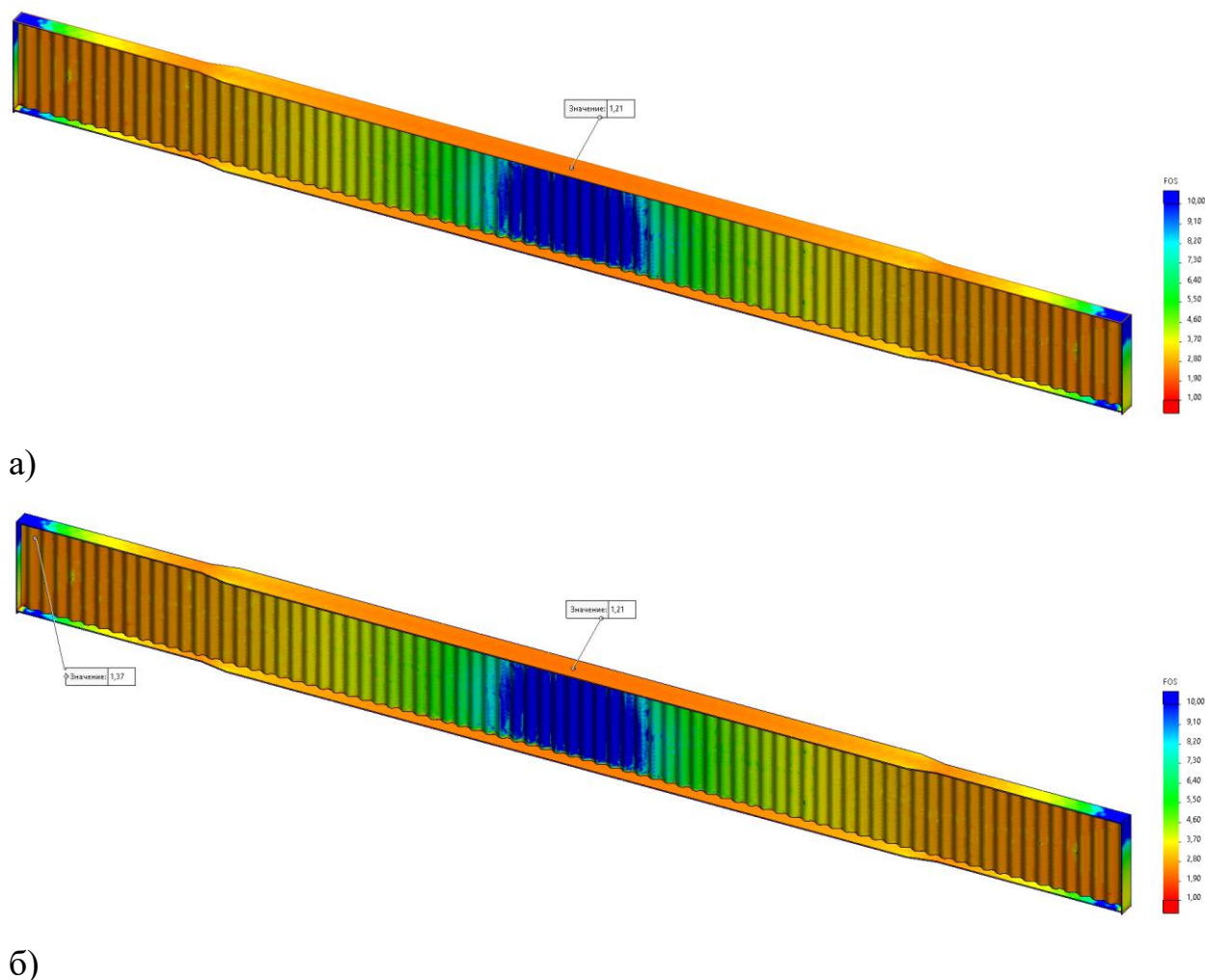


Рис.2.7. Картина запасів міцності балки з синусоїдною формою стінки та змінною шириною полиць в центральній частині балки (а) та приопорній зоні (б)

При заміні матеріалу полиць зі сталі Ст3сп на низьколеговану сталь 16Г2АФ ($\sigma_T=390$ МПа) отримали значення номінальних напружень (рис.2.8), прогинів

(рис.2.9), представлених у різному масштабі та коефіцієнтів запасу міцності посередині балки (рис.2.10а) та при опорній області (рис.2.10б).

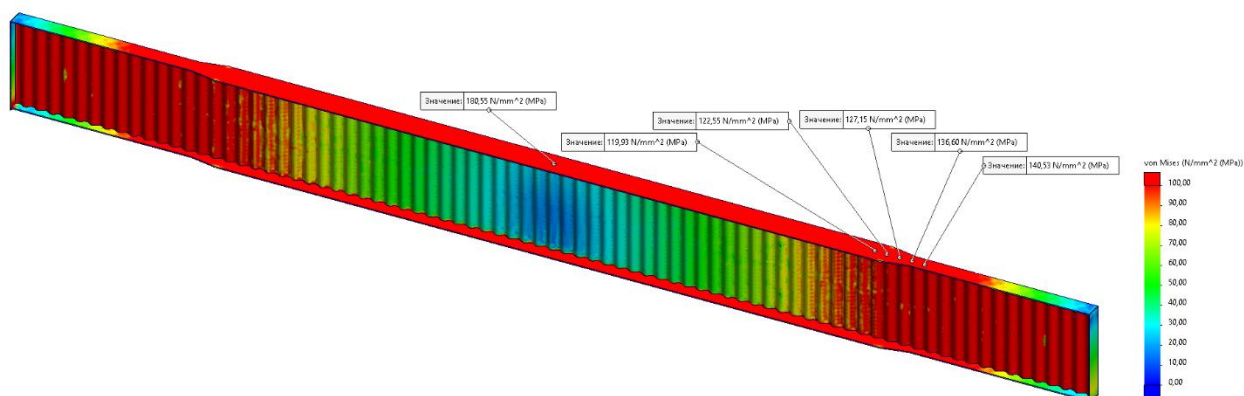
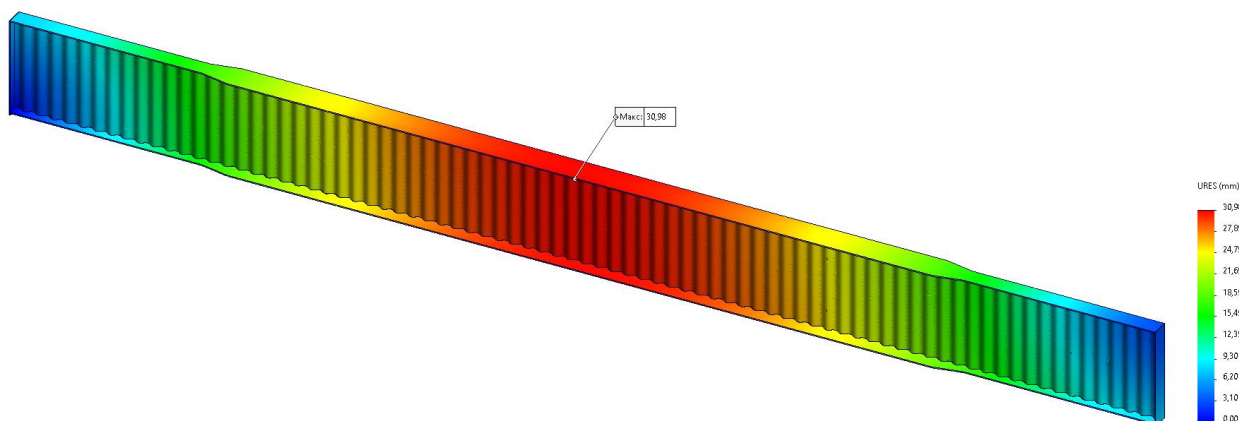
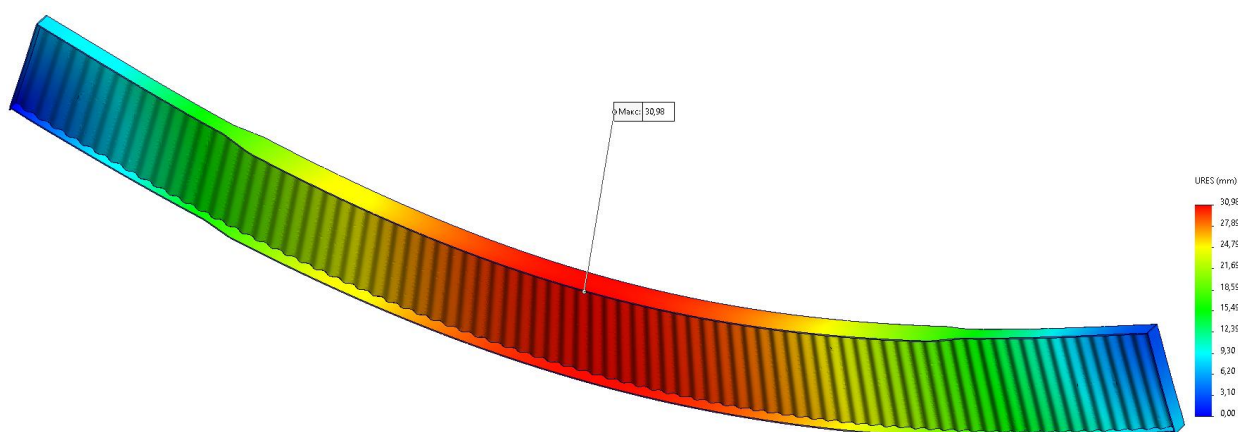


Рис.2.8. Картина розподілу напружень в балці з синусоїдною формою стінки (сталь СтЗсп) та полиці зі змінною шириною полиць (сталь 16Г2АФ)



а)



б)

Рис.2.9. Картина прогинів балки з синусоїдною формою стінки (сталь СтЗсп) та полиці зі змінною шириною полиць (сталь 16Г2АФ)

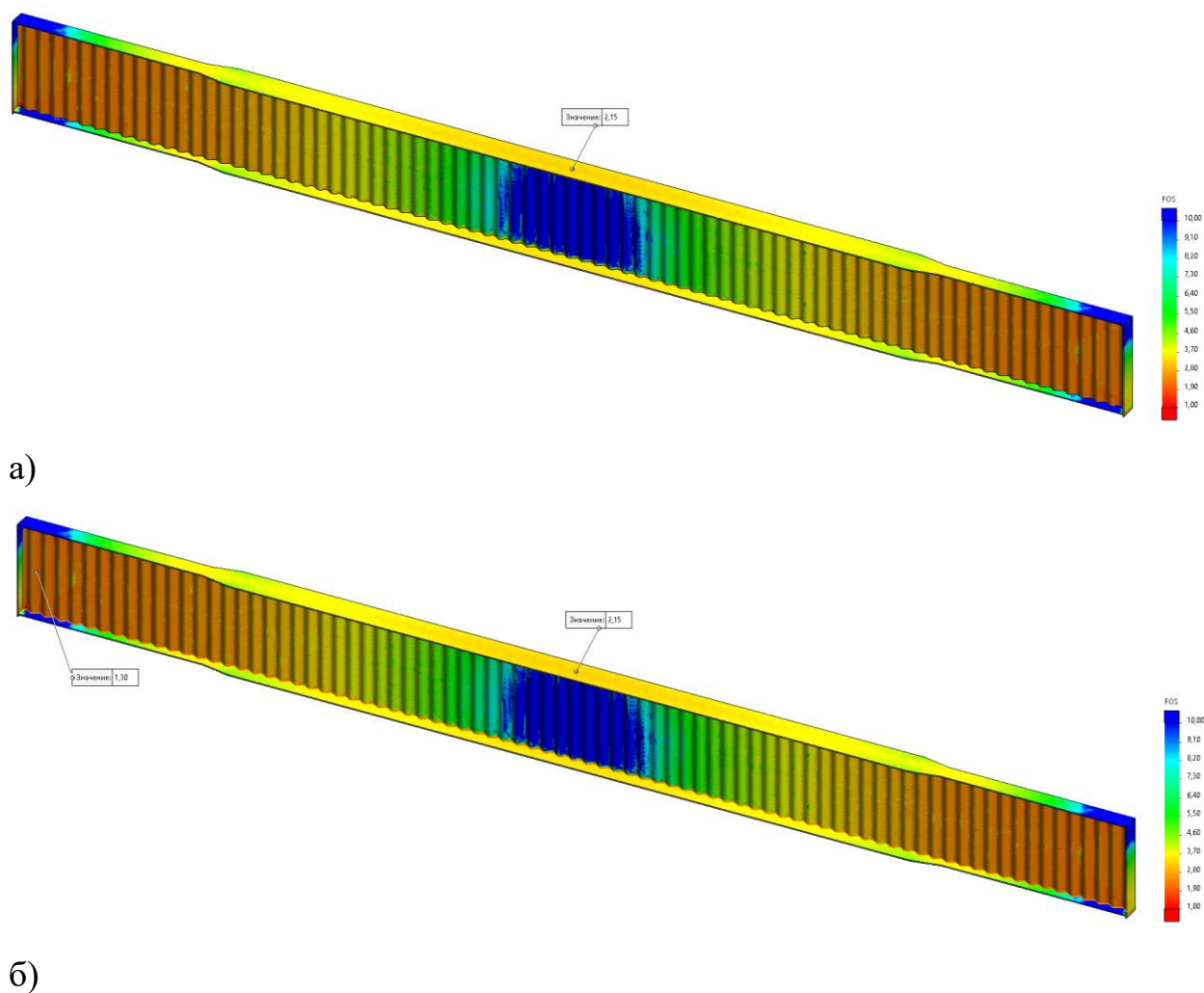


Рис.2.10. Картина зміни коефіцієнта запасу міцності в балці з синусоїдною формою стінки (сталі Ст3сп) та полиці зі змінною шириною полиць (сталі 16Г2АФ)

Зазначимо, що при застосуванні сталі підвищеної міцності (сталі 16Г2АФ, $\sigma_T=390$ МПа) суттєво зросли коефіцієнти запасу міцності. Це вказує на збільшення тримкої здатності таких балок. За умови розробки якісних технологій зварювання, зменшення ширини полиць в при опорній зоні дозволило зменшити вагу балки до 10%.

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Технічне обґрунтування способу зварювання.

З огляду на конструктивні особливості зварної балки та умови виробництва, найбільш доцільним є застосування механізованих та автоматизованих методів зварювання. Одним із підходящих методів є зварювання в захисних газах.

Напівавтоматичне та автоматичне зварювання у захисних газах (див. рис. 3.1) ефективно використовується для формування зварних швів у різних просторових положеннях. У процесі зварювання використовується електродний зварювальний дріт діаметром від 0,8 до 2 мм, вибір марки якого залежить від характеристик основного металу і вимагає відповідності за хімічним складом та механічними властивостями. Захист зварного шва від окислення забезпечується за допомогою аргону, гелію чи вуглекислого газу, при цьому вибір конкретного газу залежить від вимог до якості зварного з'єднання та економічної ефективності процесу [11].

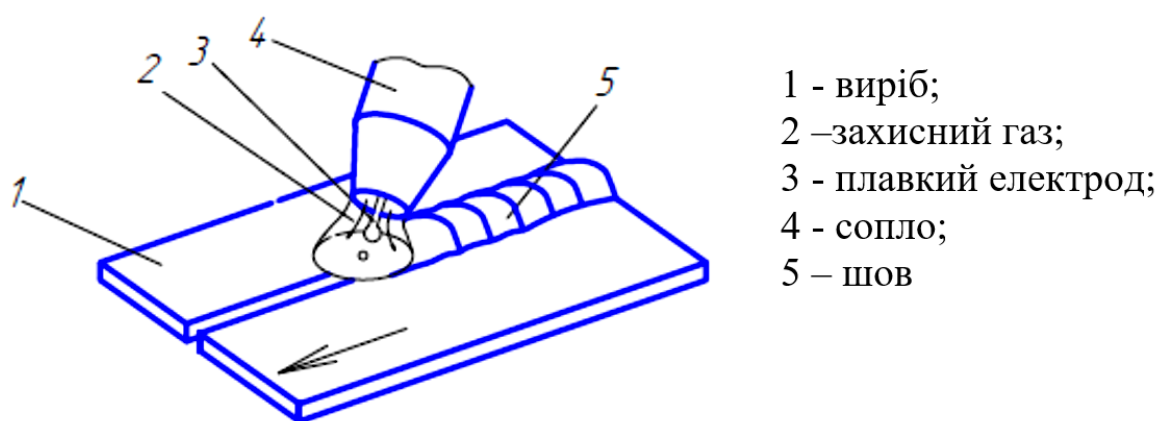


Рис. 3.1 - Зварювання в захисних газах

В сучасній промисловості зварювання в захисних газах набуває широкого поширення. Використання вуглекислого газу як захисного газу дозволяє

ефективно захищати нагрітий і рідкий метал від окислення повітрям. Однак, під час зварювання у вуглекислоті може відбуватися часткове окислення легуючих елементів, таких як хром, титан, кремній, марганець тощо. Окислення хрому та титану може призвести до зниження корозійної стійкості зварних швів, особливо проти міжкристалічної корозії. Для запобігання цим негативним наслідкам, використовується зварювальний дріт із підвищеним вмістом легуючих елементів.

Крім того, під час зварювання можуть окислюватися і шкідливі домішки, такі як сірка, фосфор та водень, що зменшує ризик утворення гарячих тріщин і пор в зварних швах. Навуглецювання зварного шва також сприяє підвищенню його стійкості до цих дефектів.

Навіть при мінімальному окисленні легуючих елементів та домішок на поверхні зварного шва утворюється окисна плівка, яка міцно адгезує до металу шва. Її видалення є складним завданням, особливо коли сталь містить значну кількість хрому. Зварювання в умовах вуглекислого газу стало популярним завдяки технологічним перевагам і економічності захисного газу, а також можливостям механізації та автоматизації процесу.

Автоматичне зварювання в захисних газах використовується на промислових лініях для серійного виробництва компонентів. Основною перевагою цього методу є висока продуктивність, особливо при здійсненні складних багатопрохідних зварювань. Використання газового захисту, на відміну від флюсового, зменшує часові витрати на очищення зварних швів від шлаку, сприяючи підвищенню ефективності робочого процесу.

Під час зварювання в захисних газах існують три основні режими переносу металу: струменевий, крупнокрапельний та короткими замиканнями. Ці режими відрізняються механізмом перенесення розплавленого металу електрода у зварювальну ванну. Струменевий режим характеризується високою тепловою потужністю у дуговому проміжку, забезпеченою високими значеннями струму і напруги на дузі. Цей процес ефективний лише в одноатомних газах, як-от аргон і гелій, оскільки вони дозволяють краплям розплавленого металу легко переходити через дуговий проміжок у ванну [11-13].

У багатоатомних газах, таких як вуглекислий газ або азот, струменевий режим не відбувається через необхідність великих теплових затрат на термічну дисоціацію газу та формування дуги конічної форми, необхідної для струменевого переносу. Виникнення струменевого процесу в багатоатомних газах можливе лише за дуже високих струмів, як у випадку з азотом.

З огляду на особливості технік зварювання та довжину зварних швів, найбільш оптимальним є використання методу зварювання в захисних газах. Цей спосіб забезпечує ефективність, точність і якість зварних з'єднань, а також дозволяє використовувати переваги різних газових середовищ в залежності від конкретних виробничих вимог.

Під час зварювання як захисний газ часто використовується суміш аргону та вуглекислого газу ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) у співвідношенні 75% до 25%. Це поєднання забезпечує ефективне крупнокрапельне перенесення металу, де вуглекислий газ посилює здатність аргону сприяти глибшому проплавленню, формуючи при цьому рівний та пологий шов [14].

Аргон відіграє ключову роль у стабілізації горіння дуги, мінімізації розбризкування металу і підвищенні якості формування шва. Однак, через особливості крупнокрапельного режиму перенесення металу, деяке розбризкування залишається неминучим, навіть за умови оптимального регулювання параметрів зварювання. Цей елемент технічного процесу є важливим для забезпечення високої якості та міцності зварних з'єднань.

Для зварювання легованих сталей часто використовують газову суміш Corgon 18, яка складається з 82% аргону та 18% вуглекислого газу. Впровадження таких зварювальних сумішей на основі аргону, на відміну від використання чистої вуглекислоти, значно покращило якість зварювання за допомогою існуючого обладнання, не вимагаючи змін у технологічних процесах. Застосування Corgon 18 сприяє зниженню розбризкування розплавленого металу завдяки збільшенню стабільності горіння дуги при низьких густинах струму та покращує струменеве перенесення розплавленого металу з електрода. Варто зазначити, що при вмісті у

газовій суміші понад 20% вуглекислого газу режим струменевого перенесення стає нестійким.

Для зварювання двотаврових балок із сталей марок ВСт3пс та 16Г2АФ рекомендується використання зварювального дроту Св08Г2С. Цей дріт ефективно працює в усіх просторових положеннях, забезпечуючи високу якість зварних швів завдяки його здатності до ефективного розкислення. Зварні шви, створені за допомогою цього дроту, відзначаються високою міцністю та пластичністю, що є критично важливим для забезпечення надійності конструкцій.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад дроту Св08Г2С [14]

Вміст елементів, %						
С	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
не більше						
0,05-0,11	0,70-0,95	1,8-2,1	0,20	0,25	0,025	0,03

Для забезпечення високої ефективності та якості автоматичного зварювання критично важливими є наступні параметри: сила зварювального струму, напруга дуги, швидкість зварювання, діаметр електродного дроту, а також швидкість його подачі до зони зварювання. Оптимізація цих параметрів відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності зварювального процесу та надійності зварних з'єднань.

Параметри режиму зварювання визначаються з урахуванням специфіки з'єднання (рис. 3.2). Схема виконання шва для виготовлення гофрованої балки розробляється відповідно до стандартів ДСТУ та реалізується за допомогою методу автоматичного зварювання у захисному газовому середовищі. Це дозволяє точно контролювати всі аспекти зварювання, від налаштування обладнання до кінцевих результатів, забезпечуючи високу якість готової продукції [6].

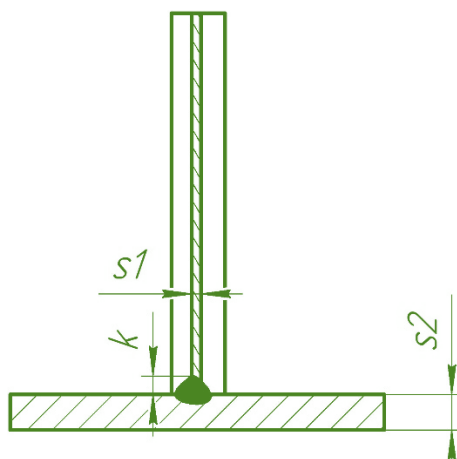


Рис. 3.2 – Схема таврового з'єднання

Враховуючи невелику товщину елементів гофрованої балки, розмір катета шва встановлюється на рівні 2 мм.

$$F_n = \frac{k^2}{2} \quad (3.1)$$

$$F_n = \frac{2^2}{2} = 2 \text{ мм}^2$$

Для формування швів гофрованої балки з катетом у 2 мм вибираємо електродний дріт діаметром 1,6 мм, відповідно до вимог ДСТУ.

Відповідно до даних літератури [6], для електродного дроту діаметром 1,6 мм густина струму становить 50 А/мм². Враховуючи цей показник, можна розрахувати відповідний зварювальний струм для забезпечення оптимального процесу зварювання.

$$I_{36} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot j \quad (3.2)$$

$$I_{36} = \frac{\pi \cdot 1.6^2}{4} \cdot 50 = 100.48 \text{ А}$$

Приймаємо $I_{36} = 100 \text{ А}$.

$$\alpha_n = A + B \frac{I_{36}}{d_{el}} \quad (3.3)$$

де $A = 7.0$; $B = 0.04$.

$$\alpha_n = 7 + 0.04 \frac{100}{1.6} = 9.5 \quad \text{с/A} \cdot \text{сод}$$

$$V_{36} = \alpha_n \cdot I_{36} \frac{1}{F_n \cdot \rho} \quad (3.4)$$

$$V_{36} = 9.5 \cdot 100 \frac{1}{2 \cdot 7800} = 6 \text{ мм/с} = 21 \text{ м/сод}$$

$$U_{\partial} = 20 + I_{36} \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_{el}}} \pm 1 \quad (3.5)$$

$$U_{\partial} = 20 + 100 \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{1.6}} \pm 1 = 24 \pm 1 \text{ В}$$

Приймаємо $U_{\partial} = 24 \text{ В}$.

$$\psi = k'(19 - 0.01 \cdot I_{36}) \frac{d_{el} \cdot U_{\partial}}{I_{36}} \quad (3.6)$$

де $k' = 1$.

$$\psi = 1(19 - 0.01 \cdot 100) \frac{1.6 \cdot 24}{100} = 7$$

$$h = 0.076 \sqrt{q_n \frac{1}{\psi \cdot V_{36}}} \quad (3.7)$$

$$q_n = I_{36} \cdot U_{\partial} \cdot \frac{\eta}{V_{36}}, \quad (3.8)$$

де $\eta = 0.85$.

$$q_n = 100 \cdot 24 \cdot \frac{0.85}{21} = 971.42 \frac{\text{Дж}}{\text{см}}$$

$$h = 0.076 \sqrt{\frac{971.42}{7 \cdot 21}} = 0.2 \text{ мм}$$

$$e = \psi \cdot h, \quad (3.9)$$

$$e = 7 \cdot 0.2 = 1.4 \text{ мм}$$

$$q = (1.35 \dots 1.4) \frac{F_n}{e} \quad (3.10)$$

$$q = 1.4 \cdot \frac{2}{1.4} = 2 \text{ мм}$$

$$H = h + q, \quad (3.11)$$

$$H = 2 + 0.2 = 2.2 \text{ мм}$$

$$h_n = \sqrt{F_n}, \quad (3.12)$$

$$h_n = \sqrt{2} = 1.41_{\text{мм}}$$

$$h_0 = H - h_n, \quad (3.13)$$

$$h_0 = 2.2 - 1.4 = 0.8_{\text{мм}}$$

$$V_{n.д.} = \frac{4 \cdot \alpha_n \cdot I_{зв}}{\pi \cdot d_{ел}^2 \cdot \gamma} \quad (3.14)$$

де $\gamma = 7800 \text{ кг/м}^3$

$$V_{n.д.} = \frac{4 \cdot 9.5 \cdot 100}{3.14 \cdot 1.6^2 \cdot 7800} \approx 60 \frac{\text{м}}{\text{год}}$$

Усі результати розрахунків зварювальних параметрів для гофрованої балки представлено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Режими автоматичного зварювання гофрованої балки

Діаметр електродного дроту, мм	Сила зварювального струму, А	Напруга на дузі, В	Швидкість зварювання, м/год	Швидкість подачі дроту, м/год
1.6	100	24	21	60

Враховуючи обраний метод та режими зварювання, для підвищення якості та ефективності виробництва гофрованих балок вирішили використовувати роботизовані зварювальні комплекси. Такий підхід дозволяє гарантувати високі стандарти якості, зменшити потребу в ручній праці та автоматизувати виробничий процес.

Для здійснення зварювання використовуємо робота ARC Mate 120 iC / 12L (див. рис. 3.3, таблиця 3.3) та систему живлення і керування A7 MIG Welder 450 (див. рис. 3.4, таблиці 3.4-3.6). Ці технологічні рішення забезпечують точне і

ефективне управління зварювальними процесами, сприяючи підвищенню продуктивності та зниженню витрат.



Рис. 3.3 – Робот ARC Mate 120 iC / 12L [15]

Зварювальний робот ARC Mate 120 iC / 12L представляє собою високоточне, продуктивне і адаптивне рішення, розроблене спеціально для потреб дугового зварювання та інших суміжних виробничих операцій. Оснащений інноваційною конструкцією та передовими технологіями, цей робот є оптимальним вибором для інтеграції в сучасні автоматизовані виробничі лінії, забезпечуючи високу ефективність роботи та гнучкість у різних зварювальних та виробничих задачах.

Табл. 3.3 – Технічні дані робота [15]

Виробник	FANUC
Назва	ARC Mate 120 iC/12L
Максимальне навантаження на кисть	12 кг
Досяжність	2009 мм
Керованих осей	6
Повторюваність	±0,03 мм
Вага	250 кг
Середнє споживання енергії	1 кВт

Компактний та ергономічний дизайн робота ARC Mate 120 iC / 12L дозволяє легко інтегрувати його у виробничі лінії, де місце є обмеженим. Робот має клас захисту IP67, що робить його стійким до пилу, вологи та агресивних середовищ, дозволяючи йому працювати в складних промислових умовах без втрати продуктивності.

Однією з найважливіших переваг ARC Mate 120 iC / 12L є його висока гнучкість і можливості інтеграції. Робот легко адаптується до різних зварювальних систем і програмних рішень, що дозволяє виконувати широкий спектр завдань. Висока швидкість руху осей та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс програмування спрощують налаштування робота і навчання нових операцій, не потребуючи від персоналу спеціальних навичок. Це забезпечує високу ефективність і знижує час на підготовку та впровадження робота у виробничий процес.

Програмне забезпечення, яке використовується з роботом ARC Mate 120 iC / 12L, забезпечує ефективне управління всіма параметрами зварювання, сприяючи оптимізації енергоспоживання та мінімізації витрат матеріалів. Це веде до значного зниження виробничих витрат та підвищення якості кінцевого продукту.

Застосування ARC Mate 120 iC / 12L сприяє високій продуктивності виробництва завдяки швидкості виконання робочих операцій і зниженню рівня браку. Довговічність конструкції робота зменшує частоту потреби в технічному

обслуговуванні, тоді як його універсальність і гнучкість у налаштуваннях дозволяють швидко адаптуватися до нових виробничих вимог.

Для живлення та керування згаданим роботом застосовуємо систему KempArc Pulse (рис. 3.4-3.6, табл. 3.4-3.6). Дана система є інноваційно-модульною, яка оптимізована для виконання автоматизованого імпульсного MIG/MAG-зварювання. Її застосування дозволяє значно підвищити адаптивність виробничих процесів, забезпечуючи низку ключових переваг. Висока надійність, бездоганна якість автоматизованих зварювальних робіт, чудова стабільність зварювальної дуги та надшвидка передача сигналів — усе це поєднується в системі KempArc Pulse. Ця технологія дає змогу суттєво покращити показники продуктивності, відкриваючи нові горизонти у зварювальній галузі.

Додатково система забезпечує максимальну ефективність використання зварювальних процесів Kemppi, які спеціалізуються на автоматизації. Завдяки цим функціям можна досягти значного підвищення продуктивності як під час роботи з тонкими металевими листами, так і за складних виробничих умов. Система доступна у цифровій і аналоговій конфігураціях, що дозволяє інтегрувати її у широкий спектр систем управління автоматизованими процесами. Ця система являє собою передове рішення для автоматизованого дугового зварювання, яке ефективно інтегрується з роботизованими системами різних виробників. Це багатофункціональний, добре збалансований комплекс, що включає в себе зварювальний пальник, механізм подачі дроту, джерело живлення та систему охолодження. Кожен компонент цієї системи розроблено з дотриманням строгих стандартів компанії Kemppi, забезпечуючи надійне функціонування навіть в найскладніших виробничих умовах.



Рис. 3.4 – Система живлення KempArc Pulse 350 [15]



Рис. 3.5 - Подаючий механізм KEMPARC DT400 [15]



Рис. 3.6 – Охолоджуюча система KempCool 10 [15]

Система складається:

- Джерела живлення KempArc Pulse 350 — це стабілізовані пристрої постійного струму (CC)/постійної напруги (CV), оптимізовані для професійного використання навіть у складних умовах. Вони підходять для синергетичного MIG/MAG-зварювання, зварювання 1-MIG та базових зварювальних процесів MIG/MAG.
- Механізм подачі дроту KEMPARC DT400 (рис. 3.5). Ці механізми розроблені для автоматизованих зварювальних процесів і оснащені надійною чотирьохроlikовою конструкцією з міцними металевими роliками. Модель DT400 може бути встановлена на маніпулятор робота або інтегрована в будь-яку автоматизовану систему зварювання.
- Блок KempCool 10 (рис. 3.6) для охолодження зварювальних компонентів забезпечує потужність у 1 кВт. Він оснащений резервуаром ємністю 3 літри, куди додається суміш води та етанолу (20–40%) або інший підходящий антифриз.

Однією з ключових переваг вказаного обладнання є:

- Інтеграція інтерфейсу управління автоматизованою системою безпосередньо у джерело живлення;
- Сумісність із передовими функціями і процесами Kemppi Wise;
- Швидкісний обмін сигналами через шину Fieldbus для інтеграції з провідними автоматизованими платформами;
- Варіанти виконання (цифрові й аналогові) для адаптації до різних виробничих систем;
- Компактна конструкція і легкий механізм подачі зварювального дроту;
- Наявність дистанційного управління для розширення можливостей.

Таблиця 3.4 – Технічні дані KempArc Pulse 350 [15]

Модель	KempArc Pulse 350
Напруга живильної мережі, В	300 (-15...+20%)
Номинальна потужність, кВА	22,1
З'єднальний кабель	H07RN-F 4G6 (5 м)
Запобіжник, А	35
Потужність холостого ходу, Вт	25
ККД, %	88
Коефіцієнт потужності	0.9
Допустиме навантаження, А	80%, 60%
	100%
Напруга холостого ходу, В	50
Клас захисту	IP23C
Габаритні розміри (Д × Ш × В), мм	590×230×430
Маса, кг	37

Таблиця 3.5 – Технічні дані подаючого механізму KEMPARC DT400 [15]

Номинальна потужність	100 W
Присадний дріт	0,8...1,6 мм
Швидкість подачі дроту	0...25 m/min
Робоча напруга	50 VDC
Діапазон робочих температур	-20...+40°C
Клас захисту	n IP23S
Габаритні розміри	269 x 175 x 169 mm
Клас електромагнітної сумісності	A
Маса	4.5 kg
Максимальне навантаження	40°C 100%ED 500 A
Роз'єм зварювального пальника	Euro

Таблиця 3.6 – Технічні дані пристрою охолодження KempCool 10 [15]

Напруга трифазної мережі, 50/60 Гц	400 В -15...+20 %
Номинальна потужність	250 Вт (100 %)
Номинальна потужність при ПІВ 100%	250 Вт
Охолоджуюча рідина	20-40% монопропіленгліколь - вода
Макс. тиск на виході	0,4 МПа
Діапазон робочих температур	-20...+40 °C
Габаритні розміри, ДхШхВ	570 × 230 × 280 мм
Маса (без додаткового обладнання)	11 кг
Клас захисту	IP23S
Клас електромагнітної сумісності	A
Обсяг резервуара охолоджувача	3 л
Потужність охолодження	1 кВт
Діапазон температури зберігання	-40...+60 °C

Для доопрацювання та корекції дефектів з використанням атмосфери вуглекислого газу та аргону вживається зварювальний напівавтомат моделі TAVR MIG-350 (рис. 3.7, табл. 3.7). Цей апарат має переносну конструкцію відкритого типу та функціонує за принципом штовхання. Установка ефективна для виконання стикових і кутових швів на матеріалах з товщиною до 4 міліметрів, забезпечуючи високу якість зварювання.



Рис. 3.7 – Напівавтомату TAVR MIG – 350

Таблиця 3.7 – Технічні дані TAVR MIG – 350 [14].

Параметри	Величина
Напруга мереж живлення, В	3 x 380
Номінальна робоча напруга, В	36
Споживана потужність, кВт	14
Кількість роликів	4
Клас захисту	IP23
Період навантаження при 350А, %	60
Діаметр електродного дроту, мм	0,8-1,6
Напруга холостого ходу, В	60
Межі регулювання зварювального струму, А	50-350
Межі регулювання робочої напруги, В	15-36
Механізм подачі	відкритий
Габаритні розміри	570x285x470
Маса, кг	37+16

3.2 Опис технологічного процесу

Технологічний процес виготовлення балок включає ряд кроків, на кожному з яких проводиться контроль якості матеріалів та виробів.

Послідовність виконання операцій включає:

010. Перевірка вхідних матеріалів:

- I. Перевірка на відповідність сертифікації;
- II. Контроль за відхиленням від площинності, допустиме відхилення – 5 мм на метр;
- III. Перевірка товщини рулонної сталі 2,0 мм;
- IV. Перевірка товщини листової сталі 12,0 мм, яка постачається листами довжиною 12 метрів;
- V. Аналіз хімічного складу партії листового прокату у випадку відсутності сертифіката.

Інструменти, що використовуються для контролю:

- 1) Вимірювальна лінійка з межею виміру до 1000 мм та поділкою 1,0 мм;
- 2) Кутомір для точного вимірювання кутів;
- 3) Штангенциркуль з межею виміру до 1000 мм та точністю виміру 0,1 мм.

Ця послідовність дій дозволяє забезпечити високу якість готової продукції, відповідно до технічних вимог та стандартів.

020 Очищення прокату. Листовий метал, який поступає на виробництво, проходить процес дробоструминної обробки, що значно покращує якість та точність виготовлення заготовок для деталей. Ця технологія є найефективнішою для швидкого видалення окалини, іржі, задирок, нальоту чи залишків піску. Усі операції виконуються на дробоструминній установці (рис. 3.8).

030 Вирівнювання листового прокату. Для корекції форми металу товщиною 12 мм використовується спеціалізоване обладнання, зокрема правильні машини Bendmak BPSM 20/18 (рис. 3.9).



Рис. 3.8 - Установка SK – 2 ÇETİNGİL дробоструменевое очищения [17]



Рис. 3.9 - Машина Bendmak BPSM 20/18[17]

040 Різання металу. Процес різання заготовок для балок виконується відповідно до технічної документації:

- для стінки балки: довжина — 12 000 мм, ширина — 976 мм, товщина — 2 мм (1 шт.);
- для поясів балки: довжина — 12 000 мм, ширина — 300 мм, товщина — 12 мм (2 шт.).

Виконання даних операцій реалізується із застосуванням установок:

- лінія для повздовжнього різання рулонного металу (рис. 3.10);
- багаторізакова машина CNCMS – 4000 (рис. 3.11).

Це обладнання дозволяє досягти високої точності обробки та мінімізувати витрати матеріалу, що сприяє підвищенню ефективності виробничого процесу.



Рис. 3.10 – Лінія поздовжнього різу [18]



Рис. 3.11 – Машина CNCMS – 4000 [17]

050 Гофрування вертикальної стінки. Одним із ключових конструктивних елементів гофрованої балки є вертикальна стінка з хвилеподібним профілем, яка відіграє важливу роль у забезпеченні міцності та стійкості всієї конструкції. Для її виготовлення застосовується холоднокатана сталь у рулонах з товщиною в межах 2–4 мм. Такі параметри матеріалу дозволяють досягти необхідних характеристик міцності та довговічності, що робить

гофровану балку надійним елементом для використання у різноманітних будівельних і промислових конструкціях.

На першому етапі технологічного процесу здійснюється підготовка вихідного матеріалу. Рулон холоднокатаної сталі встановлюють у блок розмотувача, який забезпечує рівномірну подачу листового металу для подальшої обробки. Заготовка проходить через спеціальні формувальні ролики, що надають стінці характерну хвилеподібну форму (рис. 3.12). Цей процес є фундаментальним для забезпечення виробу необхідних механічних та експлуатаційних властивостей.

Після формування хвилеподібна стінка транспортується до наступного етапу обробки на конвеєрі. На цьому етапі відбувається збирання всіх компонентів у цілісну конструкцію гофробалки. За потреби можуть виконуватись додаткові операції обробки, передбачені технологічним регламентом.



Рис. 3.12 – Формування гофри вертикальної стінки [18]

060 Складання балки. Процес складання балки виконується із використанням спеціалізованої складальної установки (див. рис. 3.11). Етапи складання здійснюються у такій послідовності:

- 1) Верхній пояс балки встановлюється у стенд-установку.
- 2) На роликовий стенд укладається вертикальний гофрований лист.

- 3) Після цього встановлюється нижній пояс гофрованої балки.
- 4) Для забезпечення точності положення всі складальні елементи фіксуються за допомогою притискних пристроїв.



Рис. 3.11 – Стенд-установка для складання гофрбалки

070 Зварювання. Процес зварювання гофрованої балки реалізується в складальному кондукторі із застосуванням чотирьох роботів ARC Mate 120 iC / 12L. Процес зварювання реалізується наступним чином: зварювальні роботи розпочинають із середини балки роботами. Балка в цей час і до закінчення процесу знаходиться в стенд-установці у зафіксованому стані. Зварювання ведеться одночасно двох кутових швів, які розташовуються між поясами балки та вертикальною гофрованою стінкою.

080 Опоряджувальні операції. Основні етапи фінальної обробки:

- I. Транспортування до підгонки розмірів гофробалок. Зварені балки автоматично подаються на транспортер, який доставляє їх до пилки з ЧПУ. На цьому етапі здійснюється високоточне обрізання балок до заданої

довжини відповідно до технічних характеристик. Використання ЧПУ гарантує точність процесу, автоматизацію операцій, мінімізацію ризику помилок і підвищення продуктивності виробництва.

II. Свердління отворів. Після обрізання балки надходять на етап свердління, де з високою точністю виконуються отвори для подальшого монтажу. Ці роботи проводяться відповідно до проектної документації, що дозволяє забезпечити зручність та надійність з'єднання балок з іншими елементами конструкції.

III. Нанесення маркування. На завершальному етапі на готові балки наноситься маркування, яке може містити серійний номер, технічні характеристики виробу або інші ідентифікаційні дані. Процес маркування автоматизовано, що забезпечує високу чіткість і стійкість нанесених позначень. Це дозволяє легко ідентифікувати вироби під час монтажу на будівельному майданчику або в інших сферах використання.

085 Очищення. Для забезпечення високої якості продукції всі готові вироби проходять дробоструминну обробку на установці прохідного типу (рис. 3.12).



Рис. 3.12 – Процес очищення гофробалок [18]

090 Фарбування. Процес фарбування здійснюється із застосуванням алкідного ґрунту, спеціально розробленого для обробки металевих поверхонь.

Контроль якості. В процесі виготовлення зварної перфорованої двотаврової балки, відповідно до встановлених технічних вимог, обов'язковим є проведення контролю якості вихідних матеріалів. Перевірці підлягають основний метал, зварювальний дріт та захисні гази. У першу чергу встановлюється відповідність сертифікатних даних матеріалів вимогам, визначеним у технологічному процесі зварювання. Додатково здійснюється візуальний огляд та перевірка якості матеріалів згідно з чинною нормативною документацією [11].

Перед прийняттям рішення про використання конкретних матеріалів у зварній конструкції обов'язково перевіряється їх зварюваність. Цей етап дозволяє забезпечити відповідність матеріалів експлуатаційним та технологічним вимогам, гарантуючи надійність і довговічність кінцевого виробу.

Другий етап перевірки зосереджується на виявленні можливих відхилень розмірів основного металу та зварювального дроту від сертифікованих показників. Такі відхилення можуть суттєво вплинути на якість зварювання, значно погіршуючи зварюваність матеріалів. Забезпечення необхідних властивостей вихідних матеріалів та високої якості готової продукції значною мірою залежить від надійності та технічного рівня зварювального обладнання.

Для підтримання обладнання у належному стані необхідно дотримуватися графіка технічного обслуговування та вимог відповідної експлуатаційної документації. У зварювальних машинах і апаратах перевіряють справність регулювальних механізмів, наявність необхідних приладів, якість та довжину струмопідвідних проводів, а також стан електричних контактів і струмопідвідних мундштуків.

При зварюванні в середовищі захисних газів додатково перевіряють справність газових редукторів, витратомірів, шлангів, сопел зварювальних пальників та інших газозахисних пристроїв. Такий підхід гарантує стабільність зварювального процесу і відповідність якості готових з'єднань технологічним вимогам.

Контроль технології охоплює всі стадії виготовлення зварних виробів, починаючи від підготовки матеріалів і завершуючи перевіркою якості готових

з'єднань. Одним із ключових аспектів є моніторинг режимів зварювання. Контроль параметрів процесу здійснюється за допомогою візуального спостереження за показаннями приладів та зовнішнім виглядом зварного шва. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти відхилення та запобігати появі дефектів. Візуальний контроль охоплює перевірку режимів зварювання, газового захисту дуги, правильності формування валиків тощо.

Для забезпечення високої якості виробів особливу увагу слід приділяти кваліфікації персоналу. Перевірка компетенцій операторів має проводитися на всіх етапах технологічного процесу. Це досягається через регулярну атестацію та паспортизацію спеціалістів, зокрема збирачів, зварювальників і дефектоскопістів. Такий підхід гарантує професійну підготовку персоналу та відповідність їхніх навичок вимогам сучасного виробництва.

Візуальний огляд використовується для перевірки якості зварювання на різних етапах: підготовки і складання заготовок, виконання зварювальних швів у процесі роботи, а також оцінки готових з'єднань. Цей метод застосовується до всіх зварних виробів, незалежно від того, чи були до них застосовані інші види контролю. Завдяки своїй простоті, швидкості та економічності, візуальний огляд є одним із найбільш ефективних способів контролю.

Під час огляду визначають наявність тріщин, подрізів, пропалів, напливів, непроварів кореня шва та кромок, а також оцінюють форму швів, рівномірність лускатості, розподіл металу в підсиленні шва та ступінь проплавлення. Враховують, що зовнішній вигляд шва залежить від способу зварювання, просторового положення, марки металу та інших умов. Для об'єктивної оцінки часто порівнюють зварні шви із затвердженими еталонами.

Геометричні параметри зварних швів і заготовок вимірюють за допомогою шаблонів або спеціалізованих вимірювальних інструментів. Після завершення зовнішнього огляду виріб може підлягати додатковим методам контролю, спрямованим на виявлення внутрішніх дефектів. Для покращення контролю якості рекомендується використовувати шаблони, які представлені на рис. 3.



Рис. 3.13 Шаблон зварника WG-2 [19]

Для виявлення внутрішніх дефектів у зварних з'єднаннях широко застосовується ультразвукова дефектоскопія. Цей метод відзначається різноманітністю технік, використанням різних типів хвиль та широким діапазоном частот. Серед усіх доступних методів ультразвукового контролю найбільш поширеним є ехо-метод, який використовується для перевірки понад 80% металопродукції. Основною вимогою до схеми контролю є забезпечення можливості виявлення дефектів різної орієнтації, особливо тих, що суттєво впливають на безпеку експлуатації виробів [11].

Для проведення ручного ультразвукового контролю, окрім дефектоскопа і перетворювачів, необхідно мати наступне обладнання та матеріали:

- зразки для калібрування та перевірки апаратури;
- контактну рідину та пристосування для її нанесення;
- матеріали для очищення поверхні, такі як ганчір'я;
- масштабну лінійку для вимірювань;
- засоби для фіксації результатів, зокрема олівець та папір;
- маркувальні засоби, такі як крейда, швидковисихаюча фарба або керн для розмітки поверхні.

4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

4.1 Розрахунок сили притиску балки в кондукторі

Розрахунок виконуємо за літературою [21].

Вихідним даними є:

довжина балки $L = 12$ м;

межа текучості $\sigma_T = 590$ МПа,

модуль пружності $E = 2,1 \times 10^5$ МПа,

висота стінки $h_c = 976$ мм,

товщина стінки $\delta_c = 2$ мм,

ширина полиці $b_p = 300$ мм,

товщина полиці $\delta_p = 12$ мм,

залишкова кутова деформація $tg \alpha = 0,01$.

Визначаємо центр ваги :

Статичний момент перерізу балки

$$S_x = b_n \delta_n \frac{\delta_n}{2} + h_c \delta_c \left(\frac{h_c}{2} + \delta_n \right) \quad (4.1)$$

$$S_x = 1.2 \cdot 30 \cdot \frac{1.2}{2} + 97.6 \cdot 0.2 \left(\frac{97.6}{2} + 1.2 \right) = 997.6. \text{ см}^3.$$

площа перерізу балки

$$F = h_c \delta_c + b_n \delta_n \quad (4.2)$$

$$F = 97.6 \cdot 0.2 + 1.2 \cdot 30 = 55 \text{ см}^3$$

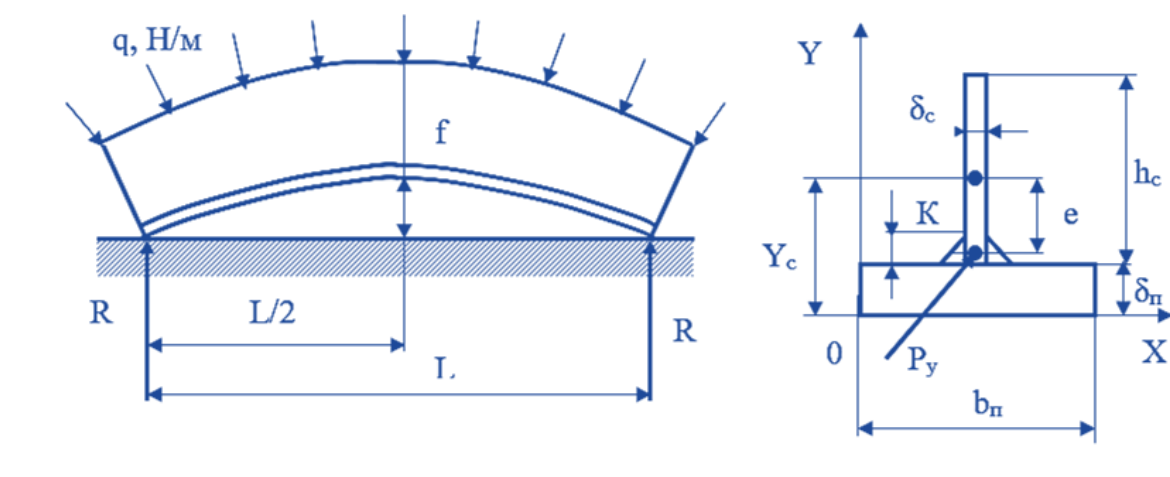


Рис.4.1. Розрахункова схема притиску балки [21]

центр ваги балки

$$Y_c = \frac{S_x}{F} = \frac{997.6}{55} = 18.14 \text{ см.} \quad (4.3)$$

Ексцентриситет прикладання усадочної сили

$$e = Y_c - \left(\frac{1}{3}K + \delta_n \right) = 18.14 - \left(\frac{1}{3}0.02 + 1.2 \right) = 16.93 \text{ см.} \quad (4.4)$$

Теплова потужність зварювання

$$q = IU_\phi \eta = 100 \cdot 24 \cdot 0.8 = 1920 \text{ Вт} \quad (4.5)$$

Величина усадочної сили

$$P_{y2} = 1.15 \cdot 17 \frac{q}{V_{36}} = 1.15 \cdot 17 \cdot \frac{1920}{21} = 1.7 \text{ кН.} \quad (4.6)$$

Розподілене навантаження

$$q = 9,6 \frac{P_{y2} \cdot e}{L^2} = 9,6 \frac{1,7 \cdot 0,16}{12^2} = 0,0181 \text{ кН/м} \quad (4.7)$$

Зосереджена сила, яка діє на балку

$$Q = q \cdot L = 0,0181 \cdot 12 = 0,2172 \text{ кН.} \quad (4.8)$$

Опорні реакції на кінцях балки, закріпленої в кондукторі

$$R = \frac{Q}{2} = \frac{0,2172}{2} = 0,108 \text{ кН.} \quad (4.9)$$

4.2 Опис роботи запропонованих зварювальних пристосувань

Згідно з розробленим технологічним процесом, складання гофробалки виконується у спеціальному складально-зварювальному кондукторі (рис. 4.1).

Кондуктор складається з фіксованих опорних упорів і рухомих притискачів, змонтованих на одній рамі (плиті). Рухомі притискачі приводяться в дію за допомогою пневмоциліндрів. Їх конструкція дозволяє регулювати відстань відносно постійного упора, розташованого навпроти, що дає змогу використовувати кондуктор для складання як лонжеронів змінного перерізу, так і зварних двотаврових або коробчастих балок.

Рухомі притискачі-упори переміщуються по напрямних, закріплених на фундаментній рамі, і фіксуються за допомогою вставних пальців. Постійні упори кріпляться до рами за допомогою кронштейнів. Кронштейни та супорти оснащені електромагнітами, на які укладається стінка гофробалки. Для налаштування стенду на потрібну ширину полиць використовуються змінні заставні сухарі, на які

укладаються полиці лонжерона. Притискачі-упори забезпечують точне вертикальне притискання полиць до стінки.

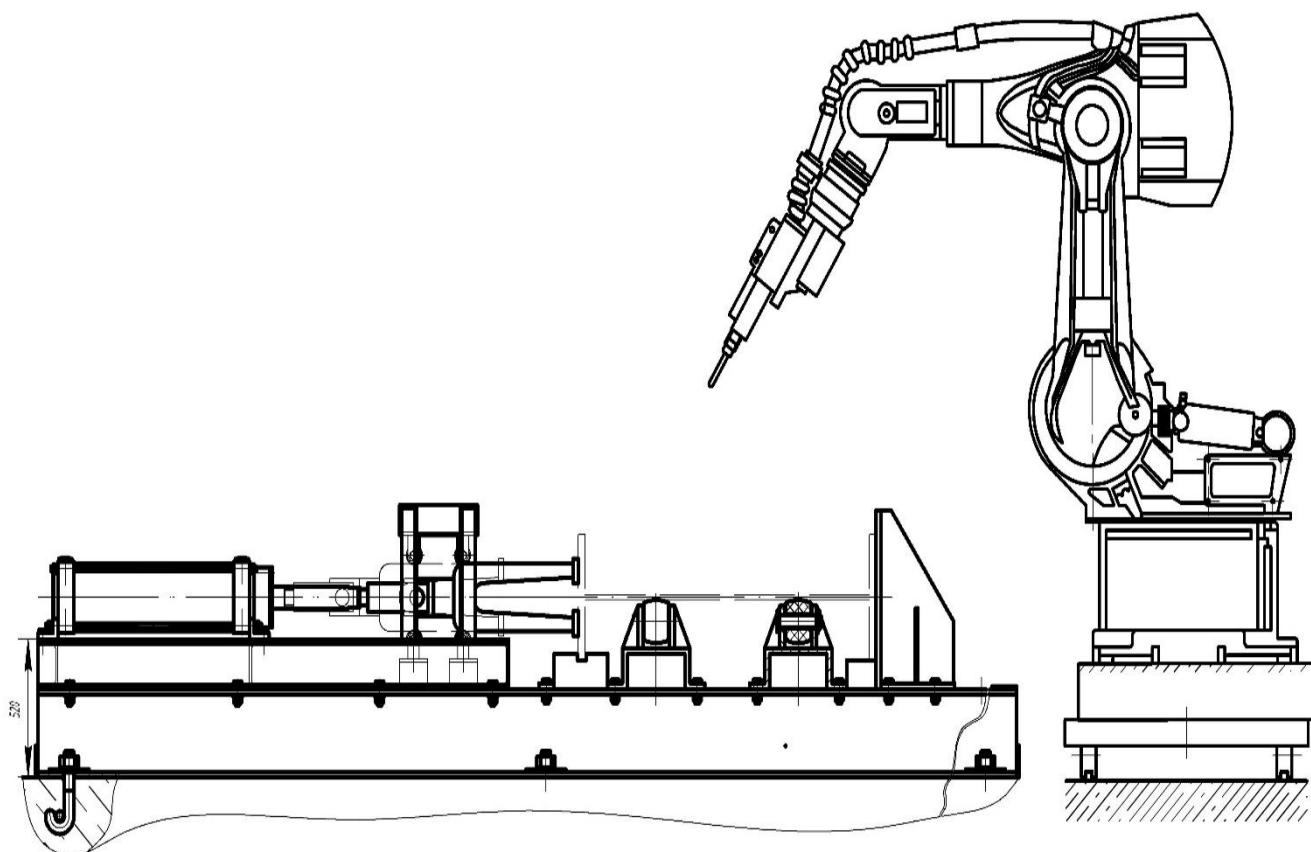


Рис. 4.1 - Стенд-установка виготовлення гофрбалки

Для дотримання допусків при складанні двотаврових балок розміри заставних сухарів виготовляються з високою точністю, щоб зміщення осі симетрії поясу відносно осі стінки не перевищувало 2...4 мм.

Пневмопритискачі-упори розташовані через кожні 750 мм і створюють притискне зусилля в 20 кН. Основою конструкції цього пристрою є принцип еластичного (клавійного) притиснення гнучких елементів до жорсткого елемента, що забезпечує рівномірне з'єднання полиць із кромками стінки по всій довжині, незалежно від кривизни кромки або перерізу лонжерона. Клавійне притиснення

дозволяє копіювати форму жорсткого елемента та уникати небажаних зазорів у стиках.

Після встановлення та фіксації поясів і полиць гофрбалки виконують зварювання двох кутових швів одночасно. Ця операція здійснюється за допомогою зварювальних роботів, що забезпечує високу точність і якість.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Характеристика і аналіз потенційних небезпек і шкідливих чинників у цеху

При експлуатації виробничого обладнання в результаті дії шкідливих факторів створюється можливість травматизму. Простір, в якому постійно або періодично діють ці фактори, називається небезпечною зоною [22].

При зварюванні металів в CO_2 повітряне середовище виробничих приміщень може забруднюватися зварювальним аерозолем, що містить пил, шкідливі гази та випаровування, наприклад, газоподібні фтористі сполуки, оксид вуглецю, оксиди азоту та інші.

Наявність рухомих частин, характер вантажів, технологічні умови виробництва вимагають особливої обережності в цеху. Основними причинами травм, тобто небезпечними зонами є захоплення працюючих рухомими частинами, падіння вантажів, які переміщаються, виділення пилу та інші. Порухення правил техніки безпеки призводить до важких травм у вигляді опіків різних ступенів, ураження струмом, часткова втрата зору.

Потужне ультрафіолетове чи світлове випромінювання зварювальної дуги при дії на очі працюючого може викликати електрофтальмію, а при тривалій дії інфрачервоного випромінювання може розвинути помутніння кришталика – катаракта.

При проектуванні та експлуатації підприємств із зварювальним виробництвом мають бути проведені заходи профілактики виробничого травматизму та професійних захворювань, в першу чергу по зниженню шкідливих та небезпечних виробничих факторів.

Для захисту від дії небезпечних факторів застосовують колективні та індивідуальні засоби захисту. Можна виділити чотири групи засобів захисту: огорожуючі, запобігаючі, сигналізаційні засоби і дистанційне управління.

Площадки, сходи, переходи обладнують перилами висотою не менше 1 метра. Нижню частину перил (висота 0,2 м) роблять суцільною. Канали для трубопроводів, збірники, заглиблення в підлозі та інші нерівності перекривають трапами.

Обладнання, яке має підвищений рівень шуму і вібрації встановлюють на окремих, добре ізольованих фундаментах, застосовуючи віброізолюючі та шумопонижуючі матеріали.

При роботі ручними механізованими електричними чи пневматичними інструментами слід застосовувати індивідуальні засоби захисту у вигляді віброізолюючих рукавиць, віброзахисних рукояток інструментів або прокладок. Для працюючих з вібруючим обладнанням рекомендується організовувати 10-15 хвилинні перерви після кожної години роботи.

Боротьбу з вібраціями бажано проводити в джерелі виникнення при конструюванні та виготовленні машин і проектуванні технологічних процесів. Зниження рівня вібрації може бути досягнуте віброгасінням, яке частіше реалізується шляхом встановлення вібруючих агрегатів на самостійні віброгасячі основи (фундаменти).

В небезпечних місцях вивішують запобіжні написи і плакати.

Електричне обладнання, що встановлене на виробничих підприємствах, є потенційно небезпечним для працюючих, оскільки органи відчуття людини не можуть на віддалі виявити електричну напругу.

Для індивідуального захисту людей, обслуговуючих електроустановки, від ураження електричним струмом використовуються ізолюючі штанги та кліщі, ізольований електроінструмент, діелектричні рукавиці, діелектричні боти та калоші, діелектричні коврики, мати та підставки. Всі перераховані вище засоби індивідуального захисту періодично випробовуються на пробій і маркуються у відповідності з діючими правилами.

5.2 Шляхи збереження працездатності і підвищення продуктивності праці

До заходів, спрямованих на поліпшення умов праці зварників належать: автоматизація, механізація і раціоналізація виробничого процесу; захист очей від променистої енергії; видалення пилу і газів з робочих приміщень за допомогою вентиляції; заходи безпеки від ураження електричним струмом [22].

Істотну роль у збереженні працездатності і підвищенні продуктивності праці зварника відіграють такі пристрої для удержування та переміщення зварюваних виробів, як кондуктори, кантувачі, маніпулятори, струбцини, затискачі.

Освітленість виробничих приміщень - важливий захід гігієни та охорони праці і підвищення її продуктивності. У виробничих приміщеннях застосовують два види освітлення: природне і штучне.

Електрична дуга випромінює велику кількість невидимих ультрафіолетових і інфрачервоних променів, які шкідливо впливають на зір і шкіру людини. Опіки променями електричної дуги можуть відбуватися тільки при зварюванні відкритою дугою (наприклад ручне дугове зварювання, зварювання в CO_2 і т.д.). Шкіра зварювальника захищається робочим одягом, а зір – захисними щитками або масками із спеціальним темно-синім скло-фільтром.

Щоб запобігти механічному пошкодженню очей при прибиранні флюсу і відбиванні шлаку зварювальник повинен користуватися захисними окулярами з простим склом. При опіках очей необхідно робити холодні примочки, промивати очі слабким содовим розчином або закапати очі очними цинковими каплями. При сильних опіках необхідно звернутися до лікаря.

В результаті високої температури зварювальної дуги відбувається випаровування металів. Пари металів з'єднуються з киснем повітря, утворюючи дрібний порошок в вигляді окислів. Особливо шкідливі пари окислів цинку, свинцю, кадмію, міді та інші, які утворюються при зварюванні міді,

латуні і бронз. В результаті плавлення деяких флюсів утворюються пари окислів марганцю, а також хлористий і фтористий водень.

При зварюванні в вуглекислому газі виділяється шкідливий для організму оксидами вуглецю (чадний газ). Оскільки вуглекислий газ в 1,5 рази важчий за повітря, то він може накопичуватися в тісних приміщеннях і закритих посудинах, що приводить до браку кисню для дихання.

Для відведення шкідливих газів та пилу, а також для подачі свіжого повітря застосовують загальну або місцеву вентиляцію. Загальна вентиляція повинна бути приточно-витяжною з підігрівом повітря в зимову пору. Її застосовують для обміну повітря в закритих приміщеннях (цехах, майстернях...). Місцеву вентиляцію застосовують для відсмоктування шкідливих газів безпосередньо з місць їх утворення. При роботі в закритих приміщеннях застосовують ізолюючі апарати (ШР-1, ША-40, ДПА-4) або маски із шлангами для подачі свіжого повітря.

При отруєннях, потерпілого необхідно винести на свіже повітря, звільнити від тісного одягу і дати спокій до приходу лікаря. При зупинці дихання слід застосувати штучне дихання.

5.3 Підвищення стійкості інженерно-технічного комплексу до ударної хвилі

Інженерно-технічний комплекс будь-якого підприємства включає в себе: будівлі споруди, технологічне обладнання і комунікації, електромережі, тепломережі, водопровід, каналізацію і газопровід [23].

Від стійкості будівель і споруд залежить в основному стійкість всього об'єкту. Підвищувати стійкість всіх будівель і споруд не потрібно, так як це пов'язано з великими матеріальними затратами, які не завжди будуть виправдані. Головним чином, потрібно підвищувати міцність найбільш важливих елементів виробництва, від яких залежить робота всього підприємства, але стійкість яких нижча загальної границі стійкості.

Підвищення стійкості будівель і споруд досягається встановленням додаткових зв'язків між несучими елементами, будовою каркасів, рам, підкосів, опор для зменшення прольоту несучих конструкцій, а також за рахунок застосування більш міцних матеріалів.

Низькі споруди, для підвищення їх міцності, частково обсипаються ґрунтом. Високі споруди (труби, башти, колони) закріплюються розтяжками, які розраховані на певні навантаження.

Захист ємкостей для зберігання легкозаймистих рідин може здійснюватися побудовою підземних сховищ, заглибленням їх в ґрунт, а збільшення механічної міцності ємкостей – встановленням ребр жорсткості.

Надійно захистити все технологічне обладнання від дії ударної хвилі практично неможливо. Захист обладнання необхідний, якщо воно здатне при руйнуванні частини підприємства випускати особливо цінну продукцію і його необхідно зберегти для подальшого використання. Захист обладнання входить в загальний комплекс інженерно-технічних заходів по підвищенню стійкості роботи підприємства. Потрібно створювати запаси деталей і вузлів технологічного устаткування, а також виготовляти захисні конструкції і застосовувати їх в період загрози нападу ворога для запобігання виходу з ладу устаткування при обвалі конструкцій будівель [23].

Для сучасних підприємств характерна велика кількість комунікацій для подачі води, електроенергії, пари, газу, які розміщені відкрито на високих естакадах або зовнішніх стінах будівель, що полегшує їх регулярний огляд і ремонт, але з другого боку значно знижує стійкість до дії ударної хвилі ядерного вибуху.

Для підвищення надійності комунікацій потрібно: заглиблювати основні комунікаційно-енергетичні мережі і технологічні комунікації або розміщувати їх на низьких естакадах та обвалькувати землею; збільшувати механічну міцність трубопроводів за рахунок встановлення ребр жорсткості, хомутів, які з'єднують два-три трубопроводи в один пучок.

Система електрозабезпечення займає значне місце на промисловому підприємстві, тому останнє повинно мати два джерела живлення – основне і аварійне. Для запобігання виходу з ладу електричних мереж потрібно встановлювати пристрої автоматичного відключення їх при утворенні перенапруг, які можуть бути створені електромагнітними полями, що виникають при ядерному вибуху.

При пошкодженні джерел газозабезпечення або газопроводів на великих підприємствах знаходяться підземні ємкості - газгольдери постійного об'єму. Газові мережі прокладають під землею і підводять до об'єкту з двох напрямків. Для запобігання руйнуванню газових мереж їх забезпечують пристроями для автоматичного відключення ділянок газопроводу.

Стійкість роботи промислових об'єктів визначається також стійкістю систем парозабезпечення і теплозабезпечення. Промислові об'єкти повинні мати два джерела пари і тепла - зовнішнє (ТЕЦ) і внутрішнє (місцеві котельні).

Важливе значення має створення стійкості системи водозабезпечення об'єкту. Промисловий об'єкт повинен забезпечуватись водою не менше ніж від двох джерел - основних і резервних. Одне із джерел повинно бути підземним. Мережі водозабезпечення прокладаються в землі і обладнуються засувками для відмикання окремих ділянок при аварії.

Щоб підвищити стійкість каналізації об'єкта потрібно створити роздільні системи каналізації – одну для дощових, другу для промислових і господарських вод, Система каналізації об'єкта повинна мати аварійні викиди в річку або в дощову мережу.

ВИСНОВКИ

Розроблена технологія виготовлення гофрованих балок забезпечує зниження матеріалоємності конструкцій до 30%, що сприяє економії ресурсів і зменшенню витрат.

Використання роботизованих систем, таких як ARC Mate 120 iC / 12L, дозволяє досягти високої точності зварювання та зменшити кількість дефектів у зварних швах.

Застосування дробоструминної обробки на установці SK-2 ÇETİNGİL гарантує 100% очищення поверхонь, що забезпечує оптимальну підготовку до фарбування та захисту від корозії.

Впровадження сучасних зварювальних систем KempArc Pulse 350 підвищує продуктивність виробничих процесів, особливо при роботі з тонкими сталями.

Моделювання в програмному середовищі SolidWorks підтвердило ефективність запропонованої конструкції балок, зокрема їх здатність витримувати навантаження без критичних деформацій.

Завдяки вдосконаленню технологічного процесу досягнуто скорочення часу виробництва, підвищення якості готової продукції та забезпечення її конкурентоспроможності на ринку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Нілов О. О. Балки з гофрованою стінкою // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. тр. Вып. 7/ Нілов О. О., Лазнюк М. В. — Симферополь: КАПСК, 2002. — С. 64 — 66.
2. <https://bfz.kiev.ua/produksiya/sin-balka/>
3. <https://ssmgroup.com.ua/virobnictvo/gofro-balka-sin-balka/>
4. https://viton.ua/ua/news/tekhnolohiya_sin_balka_pid_chas_zvedennya_bmz
5. http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=993
6. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Технологія та устаткування зварювання плавленням» / М.І. Підгурський, Б.П. Татарин, І.Б. Окіпний, В.С. Сенчишин. — Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. — 95 с.
7. Кривов, Г.О. Виробництво зварних конструкцій: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Кривов, Г.О., Зворикін, К.О. — К.:КВІЦ, 2012.-896 с.
8. Клименко Ф.Е., Барабаш В.М., Стороженко Л.І. Металеві конструкції. Львів: Світ, 2002. - 312с.
9. Особливості дослідження напружено-деформівного стану будівельних сталевих перфорованих балок методом скінчених елементів / М. Підгурський, І. Підгурський, М. Сташків, В. Ігнат'єва, С. Данильченко, Д. Биків, О. Підлужний // Вісник ТНТУ. — Т. : ТНТУ, 2023. — Том 111. — № 3. — С. 126–138.
10. Підгурський І.М. Аналіз напружено-деформівного стану сталевих балок з гофрованою стінкою / І.М. Підгурський, Віт.С. Сенчишин, А.М. Кос, Д.І. Дробощький, А.М., Ковбасовський, А.С. Ошурко // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ» —

- Тернопіль, 11-12 грудня 2024 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2023. — С.51.
11. Биковський О.Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій: підручник. – К.: Основа, 2021. – 400 с.
 12. Биковский, О.Г. Довідник зварника: довідник / О.Г. Биковський, І.В. Пінковський. - К.: Техніка, 2002. – 336 с.
 13. Спеціальні способи зварювання : підручник / І. В. Кривцун, В. В. Квасницький, С. Ю. Максимов, Г. В. Єрмолаєв, за загальною редакцією академіка НАН України, доктора технічних наук, професора Б. Є. Патона. – Миколаїв : НУК, 2017.– 346 с.
 14. Костін О.М. Зварювальні матеріали: навч. посібник / О.М. Костін – Миколаїв: НУК, 2004. –225 с.
 15. https://kemppi.in.ua/catalog/svarochniy_robot/279.htm
 16. <https://svarmaster.com/ua/p3064984-svarochnyj-poluavtomat-tavr.html>
 17. <https://svartech.com.ua/ua>
 18. <https://ssmgroup.com.ua/virobnictvo/gofro-balka-sin-balka/>
 19. <https://weldingdragon.ua/ua/p425877535-katetomer-wecut.html>
 20. <http://proflab.com.ua/produkt/product-details/370-defektoskop-a1214-expert.html>
 21. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві / 2-ге видання, переробл. та доповн.: Навч. посібник.- К.: Арістей, 2006. - 272 с.
 22. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві Навчальний посібник / О.Г. Левченко – К.: Основа, 2010. – 240 с.
 23. Стеблюк М.І. Цивільна оборона. Підручник. – К.: Знання, 2006 – 487с.

ДОДАТКИ