МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«___»_____ 2026 р.
Зав. кафедри _д.т.н., професор___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Володимир ДІДУР___
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: : **«Удосконалення автоматизованого пристрою для виготовлення та згинання нагрітих ковальських заготовок.»**

Виконав: студент 4 курсу, групи 41 -ім
освітньої програми___бакалавр_____
спеціальності _208 «Агроінженерія»_
Марченко Михайло Сергійович _____
(прізвище та ініціали)
Керівник канд. с-г наук, доцент
Головатюк Анатолій Анатолійович
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Умань – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри
_____ Володимир ДІДУР
«___» _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

Марченку Михайлу Сергійовиу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Удосконалення автоматизованого пристрою для виготовлення та згинання нагрітих ковальських заготовок»

керівник проекту Головатюк Анатолій Анатолійович, канд. с-г наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від
" 08 " травня 2026 р. № 01-06/167
2. Строк подання студентом проекту 18.05.2026 р.
3. Вихідні дані до проекту: літературні джерела, технологічні та технічні рішення, методичні вказівки, методики.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
аналіз стану досліджуваного питання; експериментальні дослідження; питання охорони праці; техніко-економічне обґрунтування проекту.
5. Ілюстративний матеріал: підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 10 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломного проекту: Основним призначенням дипломної роботи є розробка, виготовлення та впровадження модернізованого згинального пристрою для обробки нагрітих ковальських заготовок з наступними завданнями:

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 26 вересня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	15.10.2025 р.	
2.	Розділ 1. Аналіз стану досліджуваного питання	19.11.2025 р.	
3.	Розділ 2. Експериментальні дослідження	18.12.2025 р.	
4.	Розділ 3. Охорона праці	12.02.2026 р.	
5.	Розділ 4. Економічне обґрунтування проекту	09.03.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини проекту	15.04.2026 р.	
7.	Представлення проекту керівнику на перевірку	18.05.2026 р.	

Студент _____ Марченко М. С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту_____ Головатюк А.А,_____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Зміст

ВСТУП 5
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗА ТЕМОЮ
1.1. Загальна характеристика ковальського виробництва та методи автоматизації 8
1.2. Аналіз конструкцій пристроїв для гарячого згинання заготовок 9
1.3. Характеристика об'єкта дослідження та постановка задачі 11
2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
2.1. Опис і принцип роботи подавальної лінії. Завантаження та підйом заготовок. Індукційний нагрів і сортування 13
2.2. Робочий цикл пристрою для згинання 15
2.3 Теоретичний розрахунок параметрів пристрою. Вихідні дані для розрахунку 16
2.4. Проектування та виготовлення несучої конструкції. Вибір матеріалу та конструктивної схеми 18
2.5. Складання згинального механізму, конструкція. Технологія складання. Монтаж механізму на раму. 26
2.6 Гідравлічна система, склад і компоновка. Монтаж і пусконалагодження гідравліки. 29
2.7. Система керування. 32
3. ОХОРОНА ПРАЦІ 38
3.1. Ідентифікація і оцінка ризиків 38
3.2. Технічні і конструктивні заходи безпеки. Захист від механічного защімлення 39
3.2.2. Захист від фізичних небезпек 40
3.3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) 40
3.4. Організаційні заходи безпеки. Інструктаж персоналу 41
3.5. Відповідність нормативним документам 42
4. ОБГОВОРЕННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ 43
4.1. Технічні результати і їх аналіз 43
4.2. Ергономічні результати і вплив на здоров'я персоналу 44
4.3. Економічна оцінка 45
4.4. Порівняння з аналогами та обмеження 45
Висновки 46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 48

ВСТУП

Ковальське виробництво належить до базових технологій металообробки і залишається незамінним у виробництві відповідальних силових деталей для автомобільної, авіаційної, енергетичної і будівельної техніки. Незважаючи на загальну тенденцію до автоматизації промисловості, значна частина допоміжних операцій у ковальських цехах досі виконується вручну. Ця обставина обумовлює зниження продуктивності праці, підвищення ризику виробничих травм і прискорений розвиток у персоналу захворювань опорно-рухового апарату – насамперед дегенеративних уражень хребта [1].

Малі підприємство в основному спеціалізується на трьох основних напрямах: (1) висококякісне гаряче кування; (2) механічна обробка та токарна обробка; (3) виготовлення точних токарних деталей з нержавіючої і загартованої сталі. Серед замовників підприємства – малі підприємці або приватники.

У ході виробничого стажування нами було виявлено суттєве «вузьке місце» в одній із ковальських ліній підприємства. На ділянці попереднього згинання нагрітих заготовок перед куванням використовувався застарілий гідравлічний пристрій, розміщений позаду коваля. Для виконання кожного циклу оператор мав повертати корпус на 180°, брати нагріту заготовку кліщами, вручну подавати її в зону пристрою для згинання, а потім знову повертатися до ковальського молота. При темпі виробництва понад 180 заготовок за зміну це означало більш ніж 3 60 вимушених ротаційних рухів тулуба щоденно.

З точки зору виробничої медицини, систематичне навантаження такого роду є одним із провідних факторів ризику дегенеративних уражень міжхребцевих дисків поперекового відділу хребта. Крім медичного аспекту, ручне перенесення уповільнювало виробничий цикл: час обробки однієї

заготовки складав 16 секунд, тоді як технологічний мінімум не перевищував 14 секунд.

Таким чином, перед авторами проекту постало комплексне інженерне завдання: спроектувати, виготовити та впровадити автоматизований пристрій для згинання нагрітих ковальських заготовок, який:

– розташовується у зоні прямого доступу коваля, виключаючи необхідність повороту;

– автоматично приймає заготовку від існуючого індукційного нагрівального комплексу без ручного втручання;

– виконує згинання із заданими параметрами за один робочий хід тривалістю не більше 2 с;

– інтегрується в діючу систему керування ковальської лінії;

– відповідає вимогам безпеки.

Мета роботи

Основним призначенням дипломної роботи є розробка, виготовлення та впровадження модернізованого згинального пристрою для обробки нагрітих ковальських заготовок з наступними завданнями:

– Проектування та виготовлення несучої конструкції згинального пристрою

– Складання та налаштування механізму згинання

– Інтеграція гідравлічної системи керування

– Встановлення системи датчиків безпеки та позиціювання

– Впровадження пристрою у виробничу лінію

– Скорочення часу технологічного циклу

– Покращення умов праці оператора

Об'єкт дослідження : технологічний процес обробки ковальських заготовок на підприємствах з виробництва кованих деталей.

Предмет дослідження : згинальний пристрій для термічно оброблених металевих заготовок та його інтеграція у виробничу лінію.

Практична цінність

Результати роботи мають пряме практичне застосування у виробництві. Впровадження розробленого пристрою дозволило:

– Швидкість обробки однієї заготовки з 16 до 14 секунд (зменшення на 12,5%)

– Зменшити кількість обертів корпусу оператора, що зменшує ризик травми хребта

– Підвищити загальну продуктивність ковальської лінії

– Покращити якісний виріб за більш швидку обробку нагрітих заготовок.

Випускна робота складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків та списку літератури. У першому розділі проведено аналіз існуючих технологій згинання металевих заготовок. Другий розділ присвячено теоретичним основам та експериментальним дослідженням процесу. Третій розділ містить опис питань охорони праці. Четвертий розділ присвячено обґрунтуванню досягнутих результатів.

.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗА ТЕМОЮ

1.1. Загальна характеристика ковальського виробництва та методи автоматизації

Гаряче кування – технологічний процес формоутворення металевих деталей шляхом пластичної деформації нагрітої заготовки під дією ударного або статичного навантаження – займає особливе місце серед методів обробки металів тиском. Завдяки руйнуванню литої структури і подрібненню зерна метал поковки має вищі механічні характеристики порівняно з деталями, виготовленими різанням або литтям [3]. Це зумовлює незамінність кованих деталей у відповідальних вузлах транспортних засобів.

Технологічний цикл гарячого кування на лінії, розглянутій у даній роботі, складається з таких послідовних операцій:

1. Завантаження холодних заготовок у накопичувач-живильник.
2. Ступеневе підняття заготовок двоступінчастим підйомником до зони завантаження індуктора.
3. Індукційний нагрів заготовки до температури 800–900 °C.
4. Сортування за температурою (інфрачервона камера): недогріті і перегріті заготовки відхиляються.
5. Попереднє згинання нагрітої заготовки – операція, що є предметом даного дослідження.
6. Кування на молоті.
7. Обрізка задирок (при необхідності).
8. Укладання поковок на транспортер.

Загальний цикл лінії визначається як сума тривалості усіх операцій. Критичним з точки зору оптимізації є операція 5 (згинання), яка до впровадження нового пристрою включала ручне перенесення заготовки і становила 4–5 с від загального циклу 16 с.

Аналіз світового досвіду свідчить, що автоматизація допоміжних операцій ковальського виробництва розвивається за трьома стратегіями [3, 4]:

Стратегія 1. Роботизовані маніпулятори.

Застосовуються переважно у масовому виробництві зі стабільною номенклатурою. Промислові роботи (наприклад, KUKA KR 30, ABB IRB 6700) забезпечують повну автоматизацію завантаження-розвантаження. Однак вартість рішення (від 150 000 €) і складність переналагодження при зміні типорозміру деталі обмежують застосування в умовах середньосерійного виробництва.

Стратегія 2. Гідравлічні або пневматичні штовхачі і позиціонери.

Оптимальні для конкретних точкових операцій з визначеним діапазоном розмірів заготовок. Переваги: висока надійність, відносно низька вартість, простота обслуговування. Саме цей підхід прийнятий у даній роботі.

Стратегія 3. Конвеєрні і вібраційні живильники.

Ефективні для транспортування, але мають обмежену точність позиціонування і не придатні для штучної подачі крупних нагрітих заготовок.

На підприємстві. вже реалізована автоматизація завантаження і нагріву (операції 1–4). Тому розробка пристрою для автоматизації операції 5 є логічним продовженням загальної стратегії модернізації виробництва і дозволяє досягти максимального ефекту при мінімальних витратах.

1.2. Аналіз конструкцій пристроїв для гарячого згинання заготовок

Попереднє згинання ковальської заготовки перед куванням є підготовчою операцією, що дозволяє наблизити конфігурацію заготовки до форми готової поковки, скорочуючи кількість ударів молота і покращуючи розподіл металу у штампі. На основі аналізу галузевої літератури [3, 4, 5, 11] і технічних каталогів провідних виробників ковальського обладнання виявлено три основні конструктивні схеми:

Кривошипно-шатунні пресові механізми: Реалізуються на базі ексцентрикових або кривошипних пресів. Забезпечують точне дозування

ходу і зусилля. Застосовуються переважно при холодному і напівгарячому штампуванні. Для операцій з нагрітими заготовками температурою 800+ °С не рекомендуються через ризик термічного ушкодження механізмів передачі. Маса типових установок – від 3 до 20 т, що не відповідає вимозі компактності для інтеграції в існуючу лінію.

Гідравлічні пресові згинальні установки (штоковий принцип): Найбільш поширена схема для гарячих ковальських операцій. Конструктивно включає: нерухому матрицю, закріплену на рамі; рухомий пуансон, приводний гідроциліндром; систему живлення і керування. Принцип дії: нагріта заготовка укладається в матрицю, пуансон переміщується і деформує заготовку по профілю матриці. Переваги: регульоване зусилля (тиск масла), проста зміна матриць для різних типорозмірів, компактні габарити, висока надійність. Аналогічна схема реалізована в установках серії HFB (Schuler AG, Німеччина) і в лінійці HYFRA (Ajax Manufacturing Co., США) [4, 16].

Роликові і важільні механізми: Застосовуються для безперервного профілювання прутів. При точковому одноопераційному згинанні коротких заготовок економічно не виправдані через складність конструкції і переналагодження.

На підставі порівняльного аналізу для даного проекту обрано схему з гідравлічним штоковийм пристроєм. Обґрунтування вибору:

– сумісність з умовами гарячого згинання (t = 800–900 °С);

– можливість заміни матриць за 5 хв при переході на іншу номенклатуру (діаметри 25–60 мм);

– компактні габарити (ШхВхГ ≈ 600×800×500 мм) для інтеграції поруч з існуючим нагрівачем;

– вартість виготовлення — в межах виділеного бюджету проекту;

– конструктивна простота забезпечує самостійне обслуговування без залучення зовнішніх підрядників.

Порівняння характеристик старого та нового пристрою наведено у Таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Порівняльна характеристика старого та нового згинального пристрою

Параметр	Старий пристрій	Новий пристрій
Розташування відносно коваля	Позаду (поворот 180°)	Збоку (прямий доступ)
Тип подачі заготовки	Ручна	Автоматична (від нагрівача)
Управління циклом	Ручне (кнопка)	Автоматичне (ПЛК)
Час циклу згинання	≈ 4–5 с (ручна подача)	1,8 с (авт.) + 2,1 с (повер.)
Точність кута згинання	±3°	±1°
Діапазон заготовок, мм	Ø 30–50	Ø 25–60
Час переналагодження	≈ 30 хв	≤ 5 хв
Ротаційні рухи коваля/зміну	> 3 600	0

1.3. Характеристика об'єкта дослідження та постановка задачі

Ковальська лінія, у яку інтегрується новий пристрій, реалізує виробництво стальних поковок для сільськогосподарських машин. Вихідний матеріал – круглий прокат зі сталі 42CrMo4 (аналог – 40ХМ за ГОСТ), діаметр 25–60 мм, довжина прутів 180–250 мм. Нагрівання здійснюється в індукційному нагрівачі до температури 800–900 °С з контролем за допомогою пірометра і інфрачервоної камери.

Після нагрівання і сортування заготовка надходить по похилому жолобу у зону згинального пристрою. Вимоги до згинання: кут – 15–30°

(залежно від артикулу), точність – ±1°, час робочого ходу – ≤ 2 с. Після згинання оператор забирає заготовку кліщами і укладає на матрицю ковальського молота.

Технічне завдання на розробку нового пристрою формулюється таким чином:

– автоматичний прийом нагрітої заготовки від індукційного нагрівача через жолоб без участі оператора;

– надійна фіксація заготовки у матриці до початку ходу пуансона;

– виконання одного робочого ходу пуансона гідроциліндром з регульованим зусиллям;

– автоматичне повернення в початкове положення і підтвердження готовності оператору за допомогою сигнальної лампи;

– функція підтвердження вилучення заготовки оператором (кнопка «Наступний цикл») — захист від запуску циклу без участі коваля;

– захисна світлова завіса по периметру робочої зони;

– аварійна кнопка STOP і блокування при відкритих захисних кришках.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Опис і принцип роботи подавальної лінії. Завантаження та підйом заготовок. Індукційний нагрів і сортування

Розуміння принципу роботи всієї лінії є необхідною передумовою для правильного проектування нового пристрою, оскільки він є одним із вузлів єдиної автоматизованої системи з синхронізованим циклом. Нижче описано повний алгоритм роботи лінії від завантаження заготовок до їх подачі на ковальський молот.

Оператор засипає холодні заготовки з ящика у бункерний накопичувач – похилий жолоб під кутом близько 15° для самовільного ковзання. Двоступінчастий підйомник (дві паралельні пластини, зміщені по висоті, що рухаються зустрічно-поступально по напрямних від загального кривошипно-шатунного механізму і приводного двигуна) забирає заготовки з накопичувача і переносить їх у два підйоми на верхній жолоб. На верхньому жолобі встановлено оптичний давач, що фіксує наявність заготовки і подає сигнал на електропневматичний клапан. Клапан управляє пневматичним штовхачем, який переміщує заготовку по горизонтальному напрямнику до входу в індуктор (рис. 2.1).

Індуктор складається з двох мідних обмоток (котушок) охолоджуваних проточною водою, оточених термостійкою гіпсовою оболонкою. Усередині котушок сформовано канал (отвір) вздовж осі, в якому розміщується заготовка. Діаметр каналу відповідає максимальному діаметру заготовки + технологічний зазор 2–3 мм. Нагрів відбувається методом електромагнітної індукції: змінний струм у котушці наводить вихрові струми у металі заготовки, які нагрівають її за принципом джоулевого тепла.

Час нагріву залежить від діаметра заготовки і становить 8–12 с. Температура контролюється пірометром, спрямованим на торець заготовки на виході з індуктора. Система сортування (мікроконтролер + пневматичний

відсікач) розподіляє заготовки на три потоки: «норма» (800–900 °C) — на жолоб до згинального пристрою; «недогрів» (< 800 °C) і «перегрів» (> 900 °C) — у відбраковану тару.

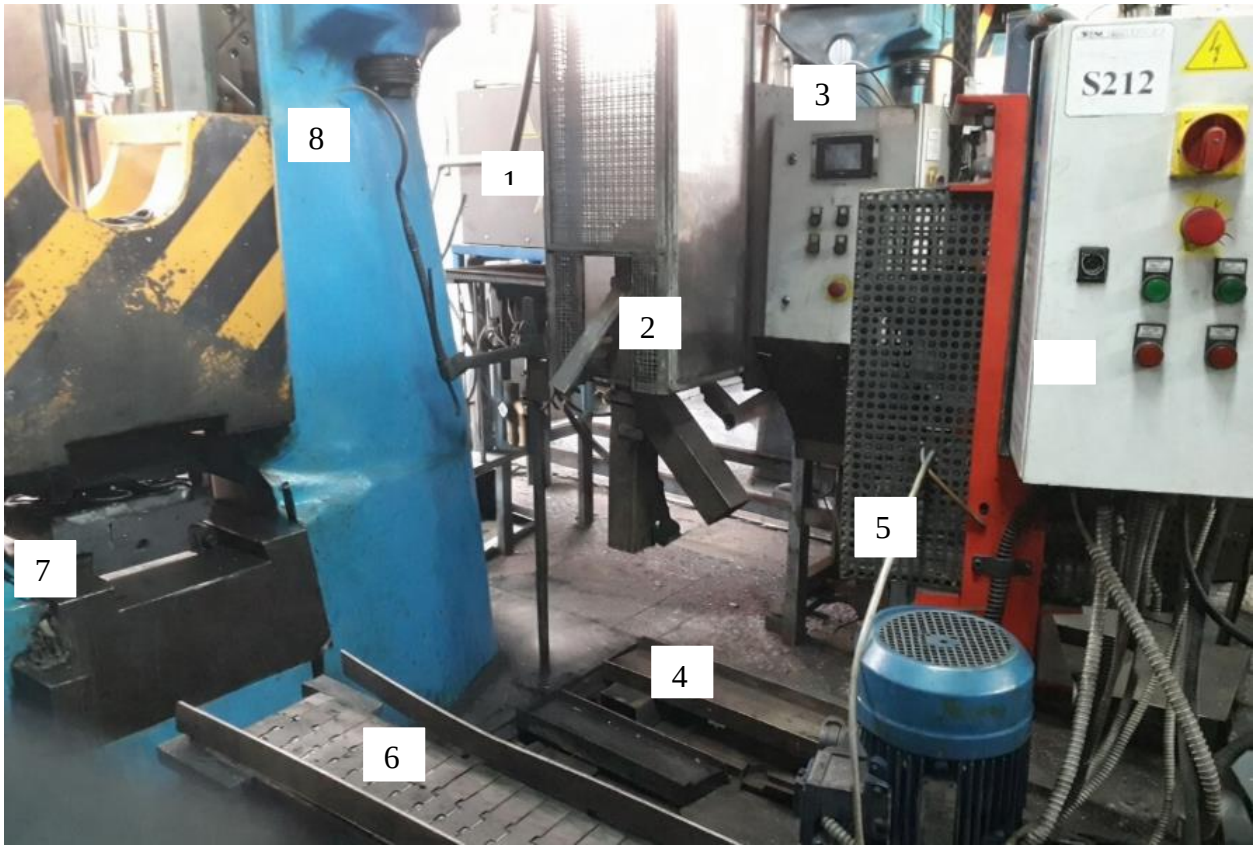


Рис. 2.1. Розташування верстатів подавальної лінії: 1 – бункерний накопичувач; 2 – двоступінчастий підйомник;; 3 — оптичний давач; 4 — пневматичний штовхач; 5 – індукційний нагрівач; 6 – сортувальний пристрій; 7 — пристрій для згинання (новий); 8 — ковальський молот



Рис. 2.2: Старий згинальний пристрій

2.2. Робочий цикл пристрою для згинання

Нагріта і відсортована заготовка ковзає по похилому жолобу у зону матриці пристрою для згинання. Послідовність автоматичного циклу:

Заготовка вдаряється об кінцевий упор (палець з важільним прапорцем); переміщення прапорця фіксує оптичний давач присутності → сигнал «заготовка на місці».

– ПЛК перевіряє сигнал індуктивного давача «циліндр у HOME-положенні»; якщо обидва сигнали TRUE, відправляє команду на розподільник.

– Електрогідравлічний розподільник 4/3 відкривається на подачу масла у поршневу порожнину → циліндр висувається → пуансон деформує заготовку по профілю матриці.

– Індуктивний давач висунутого положення фіксує крайнє положення → ПЛК витримує паузу 0,3 с → команда на повернення.

– Розподільник перемикається на штокову порожнину → циліндр повертається в HOME-положення.

– Давач HOME фіксує повернення → ПЛК вмикає сигнальну лампу «заготовка готова».

– Коваль забирає заготовку кліщами і натискає кнопку «Наступний цикл» → лампа гасне, цикл завершено, система готова до прийому наступної заготовки.

Якщо під час кроку 2 відсутній сигнал від будь-якого давача (наприклад, заготовка не надійшла, або циліндр не повернувся) — ПЛК блокує запуск і виводить код несправності на панель оператора.

Блок-схема алгоритму автоматичного циклу згинання наведена у додатку.

2.3 Теоретичний розрахунок параметрів пристрою. Вихідні дані для розрахунку. Розрахунок зусилля згинання.

Вихідними даними для розрахунку силових параметрів пристрою є характеристики матеріалу заготовки при робочій температурі. Для сталі 42CrMo4 при T = 850 °C межа текучості σт ≈ 70 МПа (за довідковими даними [3]). Максимальний діаметр заготовки d = 60 мм. Розрахункова схема — згинання балки на двох опорах (матриця) з зосередженим навантаженням посередині (пуансон).

Момент опору поперечного перерізу заготовки (кружля діаметром d):

$$W = \pi \cdot d^3 / 32 = 3{,}1416 \cdot 60^3 / 32 = 21\,206 \text{ мм}^3$$

Момент, необхідний для пластичної деформації:

$$M = \sigma_т \cdot W = 70 \cdot 21\,206 = 1\,484\,420 \text{ Н·мм} \approx 1\,484 \text{ Н·м}$$

Відстань між опорами матриці L = 150 мм (конструктивний розмір). Зусилля пуансона:

$$F = 4 \cdot M / L = 4 \cdot 1\,484\,420 / 150 = 39\,584 \text{ Н} \approx 39{,}6 \text{ кН}$$

З урахуванням динамічного коефіцієнта Кд = 1,3 (удар заготовки об упор) і коефіцієнта нерівномірності нагріву Кн = 1,2 (можливе охолодження поверхні до 780 °С):

$$F_{роз} = F \cdot К_д \cdot К_н = 39\,600 \cdot 1{,}3 \cdot 1{,}2 = 61\,776 \text{ Н} \approx 62 \text{ кН}$$

Вибір гідроциліндра і гідростанції

При робочому тиску системи Р = 100 бар = 10 МПа мінімальна площа поршня:

$$A = F_{роз} / P = 62\,000 / 10 = 6\,200 \text{ мм}^2$$

Відповідний діаметр поршня:

$$d_п = \sqrt{(4 \cdot A / \pi)} = \sqrt{(4 \cdot 6200 / 3{,}1416)} = \sqrt{7894} \approx 88{,}8 \text{ мм}$$

За стандартним рядом DIN ISO 6020/6022 обрано гідроциліндр з діаметром поршня 100 мм (найближчий стандартний розмір ≥ 88,8 мм). Діаметр штока — 50 мм. Хід — 150 мм. Фактичне зусилля при Р = 100 бар:

$$F_{факт} = P \cdot \pi \cdot d_п^2 / 4 = 10 \cdot 3{,}1416 \cdot 100^2 / 4 = 78\,540 \text{ Н} \approx 78{,}5 \text{ кН}$$

Коефіцієнт запасу: Fфакт / Fроз = 78,5 / 62 = 1,27 — задовільно (рекомендований мінімум 1,2).

Витрата масла для забезпечення часу висування tвис = 1,8 с:

$$Q = A \cdot s / t = (\pi \cdot 100^2 / 4) \cdot 150 / 1{,}8 = 7\,854 \cdot 150 / 1\,800 = 654\,500 \text{ мм}^3/\text{с}$$

$$= 0{,}655 \text{ л/с} \approx 39{,}3 \text{ л/хв}$$

Обрана гідростанція: шестеренний насос продуктивністю Q = 25 л/хв при Р = 100 бар. Для досягнення потрібної витрати 39,3 л/хв при Р = 80 бар (фактичний робочий тиск) час висування:

$$t = A \cdot s / Q = 7\,854 \cdot 150 / (25\,000 / 60) = 1\,178\,100 / 416{,}7 = 2\,827$$

$$\text{мм}\cdot\text{с}\cdot\text{мм}^2/\text{мм}^3 \rightarrow t \approx 2{,}8 \text{ с}$$

Фактичний час висування 2,8 с дещо перевищує розрахунковий, але є прийнятним для загального циклу 14 с. Час повернення (штокова порожнина, менша площа):

$$A_{шт} = \pi \cdot (d_п^2 - d_ш^2) / 4 = \pi \cdot (100^2 - 50^2) / 4 = 5\,890 \text{ мм}^2$$

$$t_{пов} = 5\,890 \cdot 150 / 416{,}7 = 2\,120 \text{ с/мм} \approx 2{,}1 \text{ с}$$

Загальний час автоматичного циклу згинання: 2,8 + 0,3 + 2,1 = 5,2 с. Результати розрахунків зведені у Таблицю 3.1.

Таблиця 3.1. Основні параметри гідравлічного приводу пристрою

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Зусилля згинання розрахункове	Fроз	62	кН
Зусилля циліндра фактичне	Fфакт	78,5	кН
Діаметр поршня	d_п	100	мм
Діаметр штока	d_ш	50	мм
Хід поршня	s	150	мм
Робочий тиск	P	80–100	бар
Витрата насоса	Q	25	л/хв
Час висування (факт.)	t_вис	2,8	с
Час повернення	t_пов	2,1	с

2.4. Проектування та виготовлення несучої конструкції. Вибір матеріалу та конструктивної схеми

Несуча конструкція пристрою виконана у вигляді зварної просторової рами. Матеріал — конструкційна вуглецева сталь S235 (відповідає St3 за ГОСТ 380), σт = 235 МПа, добра зварюваність без попереднього підігрівання. Застосовані стандартні прокатні профілі по EN 10025:

– U-профіль 80×45×6 мм — основні поздовжні балки нижньої та верхньої рами;

– L-профіль 100×100×10 мм — вузлові кутові елементи для передачі зосереджених навантажень;

– L-профіль 80×80×8 мм — горизонтальні і діагональні розкоси;

– квадратна труба 80×80×5 мм — вертикальні стояки (стійки) рами;

– листова сталь S235 товщиною 10 мм — платина (кріпильна пластина) для монтажу гідроциліндра;

– листова сталь S235 товщиною 5 мм — чотири кутових накладних пластини 80×80 мм.

Перевірочний розрахунок міцності рами

Найбільш навантаженим елементом є нижня поздовжня балка, що сприймає реакцію від зусилля пуансона Fфакт = 78,5 кН. Схема навантаження: балка на двох опорах з зосередженим навантаженням по середині. Прольот (відстань між точками спирання) l = 400 мм. Максимальний згинальний момент:

$$M_{max} = F \cdot l / 4 = 78\,500 \cdot 400 / 4 = 7\,850\,000 \text{ Н·мм} = 7\,850 \text{ Н·м}$$

Момент опору перерізу U80×45 відносно осі x (дані з ГОСТ/EN): Wx = 20,5 см³ = 20 500 мм³. Максимальне нормальне напруження:

$$\sigma_{max} = M_{max} / Wx = 7\,850\,000 / 20\,500 = 383 \text{ МПа}$$

Отримане значення перевищує межу текучості σт = 235 МПа, що вказує на недостатню міцність одиночного U80×45. Тому нижня балка підсилена: два U-профілі 80×45 з'єднані полицями назустріч одне одному (коробчастий переріз). Момент опору коробчастого перерізу:

$$W_{кор} \approx 2 \cdot Wx + 2 \cdot A_{п} \cdot e^2 / Wx \approx 2 \cdot 20\,500 = 41\,000 \text{ мм}^3$$

$$\sigma_{max} = 7\,850\,000 / 41\,000 = 191 \text{ МПа} < 235 / 1{,}3 = 181 \text{ МПа}$$

Незначне перевищення (191 > 181 МПа) компенсується тим, що фактичний тиск роботи — 80 бар (а не 100 бар розрахункових), що дає Fфакт = 78 540 · 0,8 = 62 832 Н. Тоді σ = 191 · 0,8 = 153 МПа < 181 МПа. Міцність забезпечена. Запас міцності n = 235 / 153 = 1,54.

Технологічний процес виготовлення

Виготовлення конструкції здійснювалося згідно з технічними кресленнями, отриманими від технологічного відділу підприємства. Кресленнями визначені усі розміри, типи профілів, катети зварних швів і типи зварних з'єднань. Технологічний процес містить такі операції:

1.Отримання та вхідний контроль матеріалів.

Усі профілі перевірено на відповідність типорозміру і марці сталі (сертифікат заводу). Виміряно прямолінійність прутів (відхилення ≤ 1,5 мм/м). Виявлені дефекти поверхні (тріщини, розшарування) не виявлені.

2. Розмічення та різання.

Профілі нарізані на стаціонарному відрізному верстаті. Відрізані довжини з допуском ±1 мм:

– U 80×45 × 649 мм — 2 шт. (поздовжні балки нижньої рами);

– U 80×45 × 489 мм — 3 шт. (поперечні балки нижньої рами і верхня балка);

– L 100×100 × 200 мм — 2 шт. (кутові вузлові елементи);

– L 80×80 × 618 мм — 2 шт. (горизонтальні розкоси);

– квадрат 80×80 × 844 мм — 2 шт. (вертикальні стояки);

– квадрат 80×80 × 1143 мм — 2 шт. (вертикальні стояки підвищеного виконання);

– квадрат 80×80 × 424 мм — 4 шт. (короткі стойки).

Для вирізання кріпильних пластин нестандартної форми застосовано плазмовий різак. Плазмовий різак генерує дугу між катодом і заготовкою; через дугу під тиском подається робочий газ (стиснене повітря або суміш аргон/азот), що іонізується до стану плазми з температурою понад 20 000 °C. Плазмовий струмінь розплавляє і видуває метал по лінії різання, забезпечуючи точний рез. Вирізані деталі: пластина 210×489×10 мм — 1 шт.; пластини 80×80×5 мм — 4 шт.



Рис. 3.3. Нарізані профілі (праворуч) та частково зварена верхня частина конструкції (ліворуч)

3. Шліфування торців і кромок.

Після різання всі торці і кромки оброблені кутовим шліфувальником (диск ∅125 мм) і стрічково-шліфувальним верстатом (зернистість Р60) для видалення задирок і гострих кромок. Критерій якості: відсутність синюватих плям (ознак перегріву), відхилення від прямого кута ≤ 0,5°.

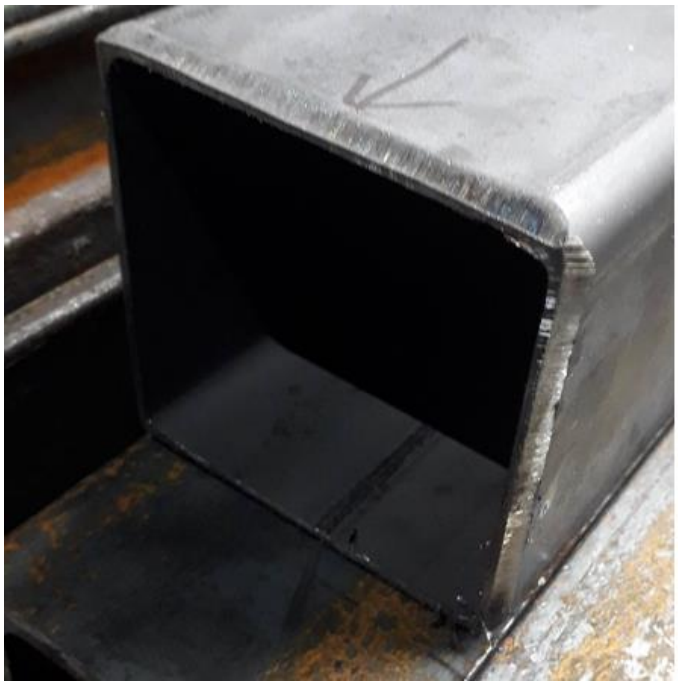


Рис. 3.4. Шліфування кромок U-профілю 80×45 мм

4. Підготовка отворів.

Свердління виконане на колонному свердлильному верстаті у такому порядку: розмітка точки свердління маркером → закернування → центрувальне свердло → свердло Ø6 мм → розширення до Ø21 мм (для різьбових шпильок М20). Для деталей товщиною 10 мм (пластина) і 5 мм (накладки) застосовано охолодження мастильно-охолоджувальною рідиною (МОР). Точність отворів — Н8. Паралельно проведено нарізання різьби М6 у захисних кришках (для кріплення на рамі): метчик М6 з ручною воротком, мастило — машинне масло.



Рис. 3.5. Свердління отвору Ø6 мм у кріпильній пластині: 1 — колонний свердлильний верстат; 2 — деталь у лещатах; 3 — центрувальне свердло



Рис. 3.6. Готова зварена конструкція з просвердленими отворами для кріплення згинального механізму

5. Збирання та зварювання конструкції.

Зварювання є одним із ключових технологічних процесів проекту. Зварювання — це процес нероз'ємного з'єднання металевих деталей шляхом встановлення атомно-молекулярних зв'язків між ними під дією теплоти і/або тиску. Для виготовлення рами застосовано два методи зварювання.

Ручне дугове зварювання покритим електродом (РДЗ) використовували для прихваток і підварювання в важкодоступних місцях. Електроди типу «Jadranka» Ø2,5 мм (тип покриття — рутилово-целюлозний, клас E 38 2 RA по EN ISO 2560). Струм: 60–80 А (постійний, зворотна полярність). Принцип: між покритим електродом і заготовкою горить електрична дуга; тепло дуги (6000–8000 °С) розплавляє метал електроду і основного металу; розплав формує зварну ванну, що кристалізується у зварний шов; покриття електрода виконує роль флюсу і захищає ванну від окислення [9].

MIG-зварювання (Metal Inert Gas, метод 131 за EN ISO 4063) застосовано для основного обсягу зварних швів. Принцип: безперервний зварювальний дріт Ø0,8 мм зі шпулі подається через пальник і слугує одночасно електродом і присадним матеріалом; дуга горить у захисному середовищі інертного газу (аргон 99,99 %) що унеможливлює окислення шва; основні параметри — струм 120–160 А, напруга 18–22 В (підібрані на тест-зразку зі S235). Переваги порівняно з РДЗ: більша швидкість, відсутність шлакової кірки, краща якість поверхні шва, можливість зварювання листів товщиною до 6 мм [11]. На рисунку 3.7 показано процес MIG-зварювання рами.

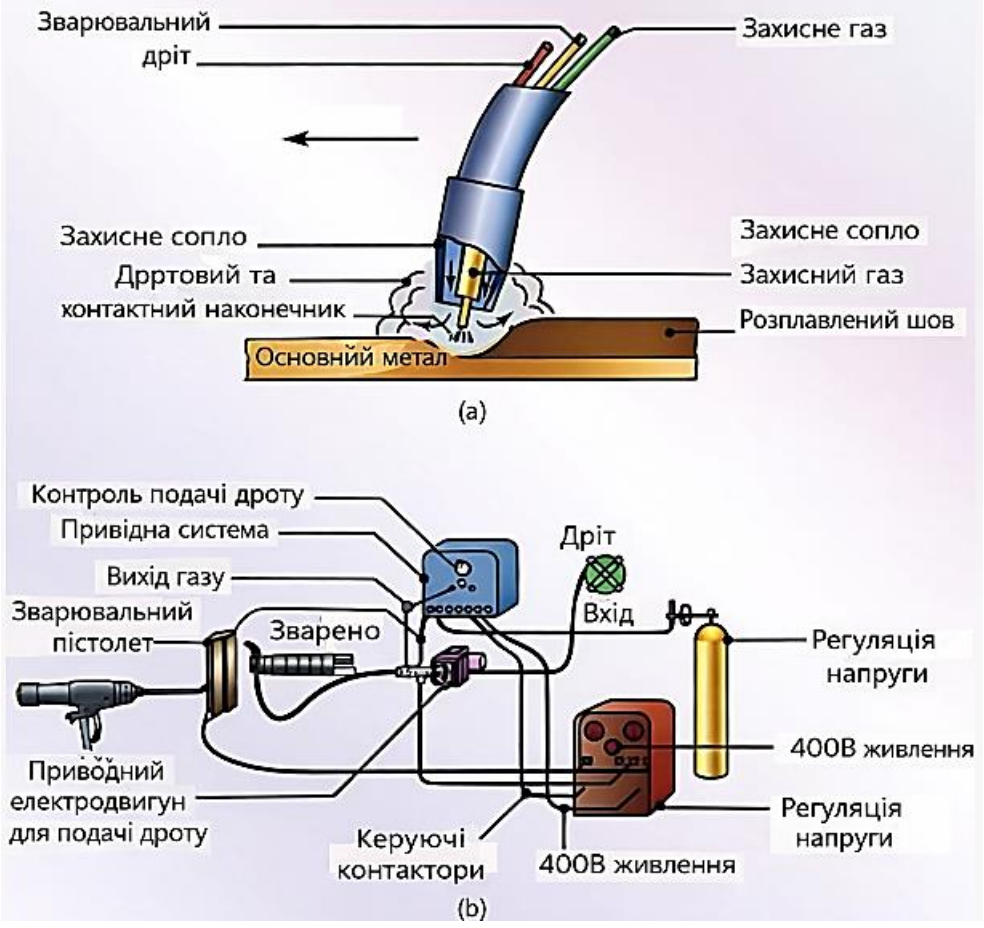


Рис. 3.7. Процес MIG-зварювання несучої конструкції [11]

Технологія зварювання: збирання на прихватках у кондукторі → вимірювання діагоналей (відхилення ≤ 1 мм) → зварювання повними швами в послідовності від центру до країв (мінімізація деформацій) → контроль

розмірів після кожного прогону → правка прутками або ударом молотка при відхиленнях ≤ 2 мм → вирізання і повторне зварювання при відхиленнях > 2 мм. Конструкцію зварювали із зовнішніми катетами швів 4–6 мм.



Рис. 3.8. Частково зварена конструкція пристрою

6. Шліфування зварних швів.

Зовнішні зварні шви зачищені заподлицо кутовим шліфувальником (диск ∅125 мм) для зміни геометрії переходу «шов–основний метал» і відповідного перерозподілу силових ліній. Грубі шви підвищують концентрацію напружень і можуть бути вихідними точками тріщин при змінних навантаженнях. Після шліфування контрольовано відсутність пор і тріщин на поверхні шва.

7. Антикорозійне фарбування.

Зварна конструкція знежирена нітророзчинником (роботи виконано у провітрюваному приміщенні при Т = +15…+25 °С через леткість, займистість і токсичність розчинника). Нанесено три шари:

– 1-й шар — ґрунт (антикорозійна ґрунтовка ГФ-021 або аналог): сушіння 24 год;

– 2-й шар — фінішна антикорозійна емаль на нітроосновi: сушіння 6 год;

– 3-й шар — другий фінішний шар: сушіння 6 год.

Бічні і передні декоративні кришки для захисної світлової завіси фарбувалися зовнішнім підрядником (порошкове фарбування).

2.5. Складання згинального механізму, конструкція. Технологія складання. Монтаж механізму на раму.

Згинальний механізм – виконавчий орган пристрою, що безпосередньо деформує заготовку. Він складається з таких основних деталей:

– матриця (ліва, нерухома частина) – встановлюється в корпус механізму і утворює фіксовану опору для заготовки;

– пуансон (права, рухома частина) – жорстко з'єднаний зі штоком гідроциліндра; при висуванні штока переміщується горизонтально і деформує заготовку;

– чотири кутових пластини – з'єднують нижню платину з рамою механізму;

– нижня платина (базова пластина) – основа механізму, через яку він кріпиться до несучої конструкції рами;

– втулка з нержавіючої сталі – встановлена з пресовою посадкою у центральному отворі платини, забезпечує напрямок переміщення рухомих деталей;

– ніпель для мастила – бічний, вбудований у втулку; для нагнітання консистентного мастила.

Матриця і пуансон виготовлені з інструментальної загартованої сталі (HRC 58–62), стійкої до зносу і деформацій при контакті з нагрітою заготовкою (800–900 °C). Форма робочої поверхні матриці і пуансона є змінною: для кожного типорозміру і профілю заготовки передбачений окремий комплект матриця+пуансон. Заміна займає до 5 хв (відгвинчування 4 болтів М12).

Перед складанням перевірена складальна схема (отримана від технолога, деталі позначені кольором). Послідовність:

9. Підготовлено нижню платину. На кожному куті позначені і засвердлені монтажні отвори Ø21 мм (для шпильок М20 кріплення до рами).

10. Встановлено чотири кутових пластини 80×80×5 мм у пази нижньої платини. Завдяки посадці з натягом (пресова посадка, виконана нагріванням отвору до 100–120 °C з подальшим швидким охолодженням) деталі зафіксовані без болтових з'єднань.

11. Встановлено втулку в центральний отвір платини. Отвір у пластині нагрітий паяльною лампою, втулка запресована пластиковим молотком у правильній орієнтації (ніпельний штуцер для мастила знаходиться збоку, доступному для нагнітання).

12. Складено матрицю і пуансон. Робоча поверхня заздалегідь перевірена на відсутність тріщин і задирок.



Рис. 3.10. Згинальний механізм (матриця – ліворуч, пуансон – праворуч)



Рис. 3.11. Втулка, встановлена методом пресової посадки у центральний отвір платини

Після складання механізм встановлено на несучу раму. Для спрощення монтажу раму перевернуто «вгору ногами», механізм підведено і

позиціоновано по отворам рами (виготовлених з точністю H8). У два центральних отвори встановлено тимчасові монтажні шпильки M16 — вони слугували направляючими для точного суміщення деталей. Після підведення механізму до рами шпильки замінено болтами M16×80 з самостопорними гайками M16 і шайбами. Фінальна затяжка болтів: 120 Н·м (динамометричний ключ). Конструкцію разом з механізмом перевернуто у робоче положення.

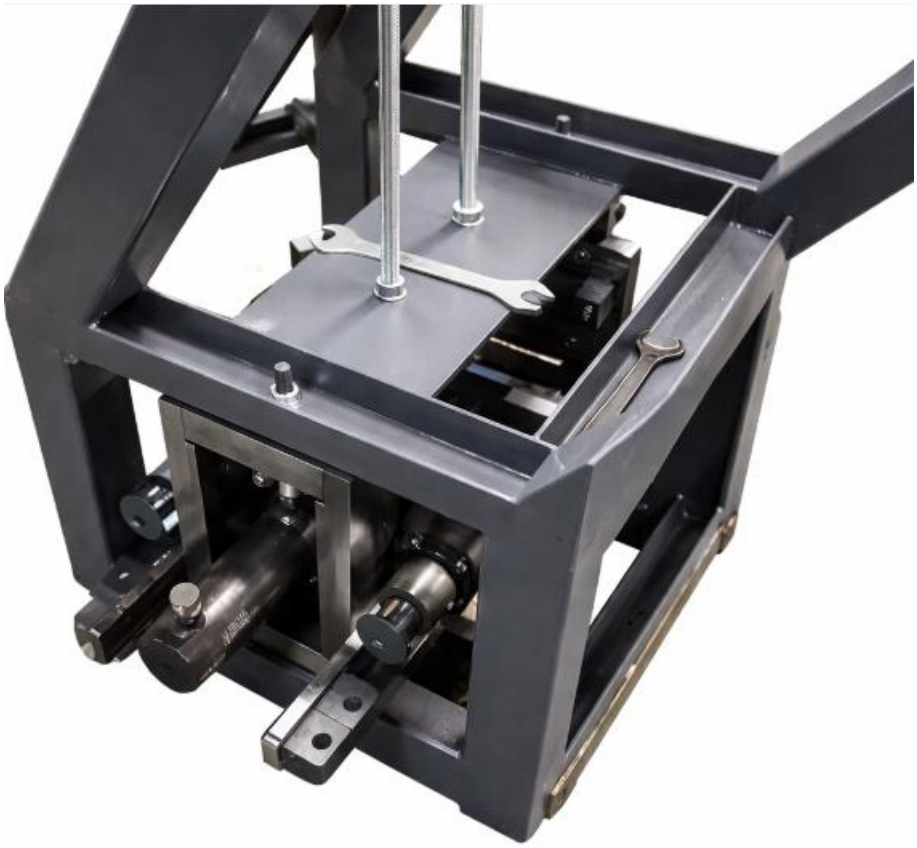


Рис. 3.12. Монтаж згинального механізму на несучу конструкцію

2.6 Гідравлічна система, склад і компоновка. Монтаж і пусконалагодження гідравліки.

Гідравлічна система пристрою для згинання складається з таких елементів (перелічені в порядку ланцюга тиску):

13. Гідростанція: шестеренний насос Q = 25 л/хв, P_max = 140 бар; трифазний асинхронний двигун 4 кВт / 1 450 об/хв; бак об'ємом 25 л

(мінеральне масло HLP46); фільтр тонкого очищення 10 мкм; покажчик рівня і температурний давач масла.

14. Запобіжний клапан (PRV): налаштований на P = 110 бар; при перевищенні – відкривається і зливає масло у бак; захищає систему від пікових перевантажень.

15. Електрогідравлічний розподільник 4/3 (PN: Bosch Rexroth або аналог): 3 позиції (висування – нейтраль – повернення), 4 лінії (P, T, A, B); котушки 24 В DC на кожному з двох торців; при знеструмленні пружиною повертається в нейтраль (масло заперте в циліндрі – безпечна позиція).

16. Регулятор тиску: встановлений між насосом і розподільником; дозволяє плавно обмежити тиск у робочій лінії незалежно від налаштування PRV; поточне налаштування P_роб = 80 бар. Надлишок масла через вбудований зворотний вентиль зливається у бак (запобігає «глухому контуру»).

17. Гідроциліндр Ø100/Ø50 мм, хід 150 мм: поршнева і штокова порожнини підключені до виходів A і B розподільника гнучкими рукавами SAE 100 R2 (Ø10 мм) зі з'єднувачами BSP 3/8.

18. Манометр 0–160 бар – на лінії P після насоса.

Через теплове випромінювання від нагрівача (зона t > 400 °C) гідростанцію розміщено поза тепловою зоною – на спеціальній полиці над ковальським молотом, на відстані > 2 м від пристрою. Це призвело до збільшення довжини гідравлічних рукавів до 4 м (порівняно з початковим розташуванням під пристроєм, де рукави були б 0,5 м). Вибір зроблено свідомо: нагрів масла при розміщенні під пристроєм у ході тестових випробувань досягав +78 °C через 2 год роботи – критичний рівень для збереження ресурсу насоса і ущільнень. При розміщенні на полиці максимальна температура масла після 4 год безперервної роботи склала +52 °C – в межах норми (≤ 60 °C для HLP46).

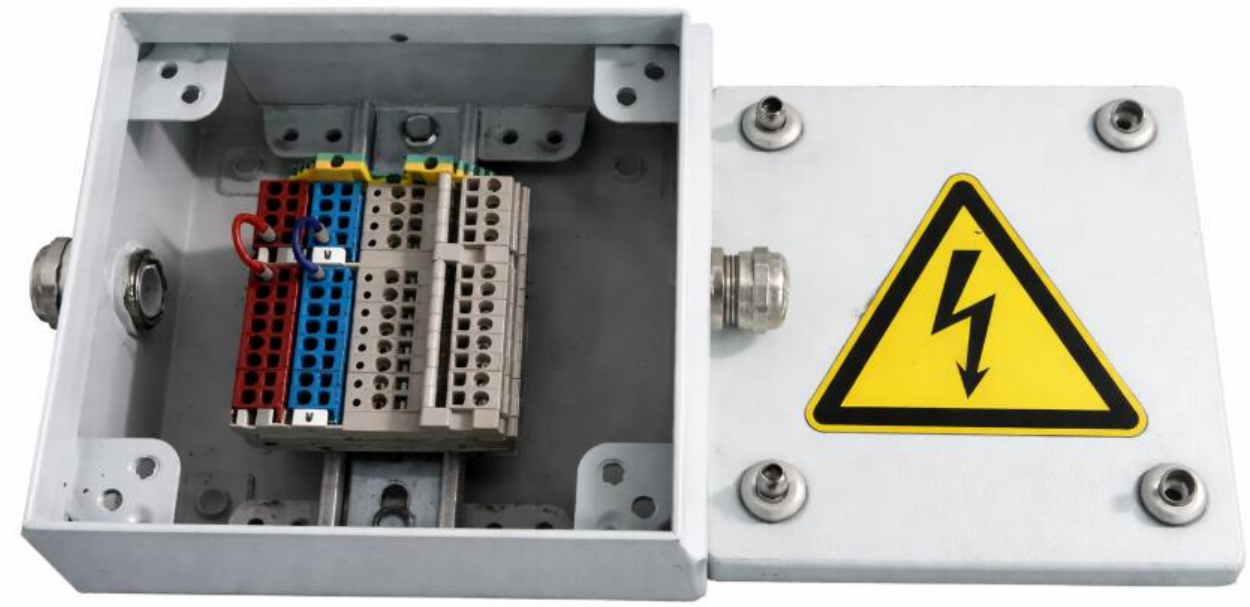


Рис. 3.13. Електрошафа давачів, встановлена на рамі пристрою

Підключення двигуна гідростанції до мережі виконано у схемі «трикутник» (Δ, 3×400 В, 50 Гц): коричневий провід (L1) → клема U1, чорний (L2) → V1, сірий (L3) → W1, жовто-зелений (PE) → корпус насоса. Перший запуск виконаний після перевірки схеми сертифікованим електриком. Під час першого запуску виявлено неправильний напрямок обертання (за стрілкою на корпусі – проти годинникової стрілки замість за). Причина: неправильний порядок фаз на щиті. Виправлено перестановкою двох фаз (L1↔L2) на контакторі у шафі.

Послідовність пусконалагоджувальних робіт:

19. Заповнення бака маслом HLP46 до рівня MAX (контроль по покажчику рівня).

20. Запуск двигуна на 60 с без навантаження (розподільник у нейтрально-закритому положенні); перевірка відсутності протічок у всіх з'єднаннях.

21. Плавне підняття тиску регулятором від 0 до 80 бар з кроком 20 бар; витримка 5 хв на кожному щаблі; перевірка манометра і протікань.

22. Перевірка спрацювання PRV: тиск піднято до 110 бар – PRV відкрився і стрілка манометра зупинилась. Налаштування вірне.

23. Ручне керування розподільником (через кнопку на корпусі) – перевірка ходу циліндра в обидва кінці; перевірка кінцевих положень і тиску по манометру.

24. Перевірка часу спрацьовування за секундоміром: висування – 2,7 с, повернення – 2,1 с (відповідають розрахунковим значенням).

25. Контрольна перевірка протікань після 30 хв роботи під навантаженням – протікань не виявлено.

2.7. Система керування.

Система керування пристрою побудована на базі ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1214C DC/DC/DC), інтегрованого в головну шафу керування ковальської лінії. Програмування виконано у середовищі TIA Portal V17 мовою LAD (Ladder Diagram). Живлення керуючих кіл – 24 В DC від вбудованого блока живлення 4 А. Кабелі живлення і сигнальні кабелі давачів зведені в проміжну розподільчу шафу (IP54), встановлену безпосередньо на рамі пристрою. Шафа містить клемні колодки трьох кольорів: червоні (24 В+), сині (0 В) і бежеві (сигнальні лінії від давачів). Від цієї шафи до головної шафи прокладено один загальний кабель, що спрощує монтаж і діагностику.

Для контролю крайніх положень гідроциліндра застосовано два індуктивних безконтактних давачі. Тип: циліндричний М24×1,5, довжина робочої частини 28 мм; напруга живлення 24 В DC; тип виходу PNP-НВ (нормально відкритий); діапазон спрацьовування 2–15 мм; ступінь захисту IP67; матеріал корпусу – нержавіюча сталь [5].

Принцип дії: осциляторне коло перед котушкою (тороїдальне намотування) генерує електромагнітне поле перед чутливим торцем. Коли металева мішень-пластина (сталь 45, ∅20×4 мм, жорстко закріплена на кінці лінійного напрямника, пов'язаного зі штоком циліндра) входить у зону поля

— вихрові струми поглинають енергію генератора, амплітуда коливань падає, пороговий компаратор перемикає транзисторний вихід. Відстань спрацьовування встановлена 8 мм (середина діапазону для максимальної стабільності).

Давачі встановлені на регульованих кронштейнах з фіксацією контргайкою. Регулювання дозволяє налаштувати робочий хід під різні товщини заготовок (від 25 до 60 мм) в межах ±30 мм без зупинки і розбирання. Переваги обраного типу: відсутність рухомих частин – ресурс ≥ 200 000 год; стійкість до вібрацій, оливи і пилу; пряме підключення до дискретного входу ПЛК; діапазон робочих температур: –25…+70 °C [5].

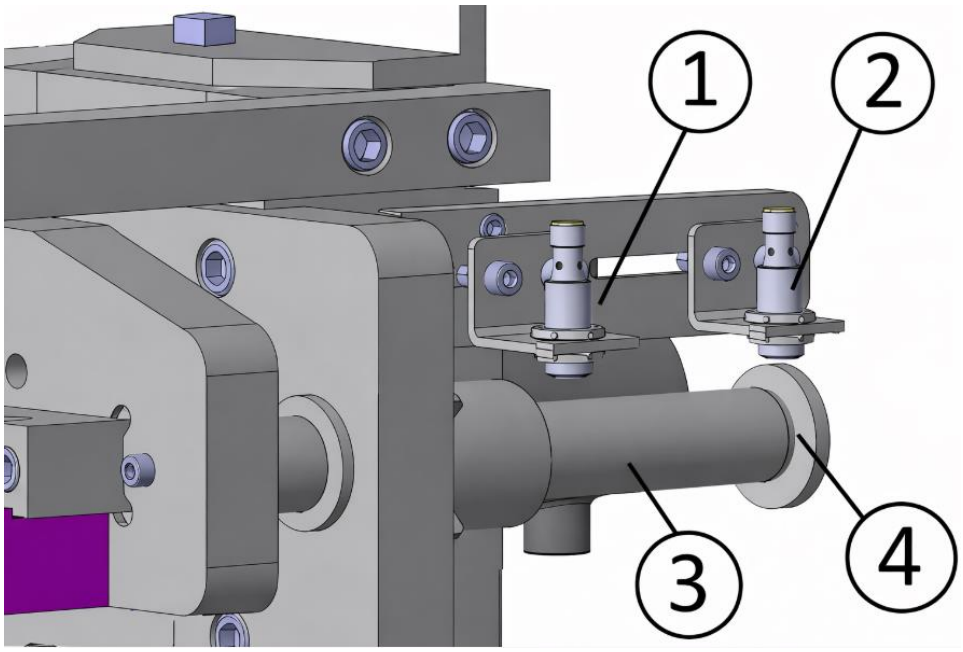


Рис. 3.4 Індуктивні давачі: 1 – давач висунутого положення (поз. «A»); 2 – давач HOME/втягнутого положення (поз. «B»); 3 – лінійний напрямник; 4 – металева ціль

Давач присутності заготовки (лазерний оптичний)

Для підтвердження правильного положення нагрітої заготовки у матриці встановлено лазерний відбивний давач (рефлекс-тип). Принцип дії: видимий червоний лазерний промінь (λ = 650 нм, клас 2) випромінюється передавачем, відбивається від циліндричної поверхні заготовки і приймається фотоприймачем того ж модуля. Час реакції ≤ 2 мс — достатньо

для запобігання помилок у ритмі циклу (інтервал подачі нових заготовок > 5 с).

Особливість: заготовка нагріта до 850 °С і сама є джерелом теплового (інфрачервоного) випромінювання. Тому давач обладнаний смуговим ІЧ-фільтром, що пропускає лише довжину хвилі λ = 650 нм (лазер) і відсікає широкосмугове теплове випромінювання заготовки. Це забезпечує стабільну роботу без помилкових спрацьовувань.

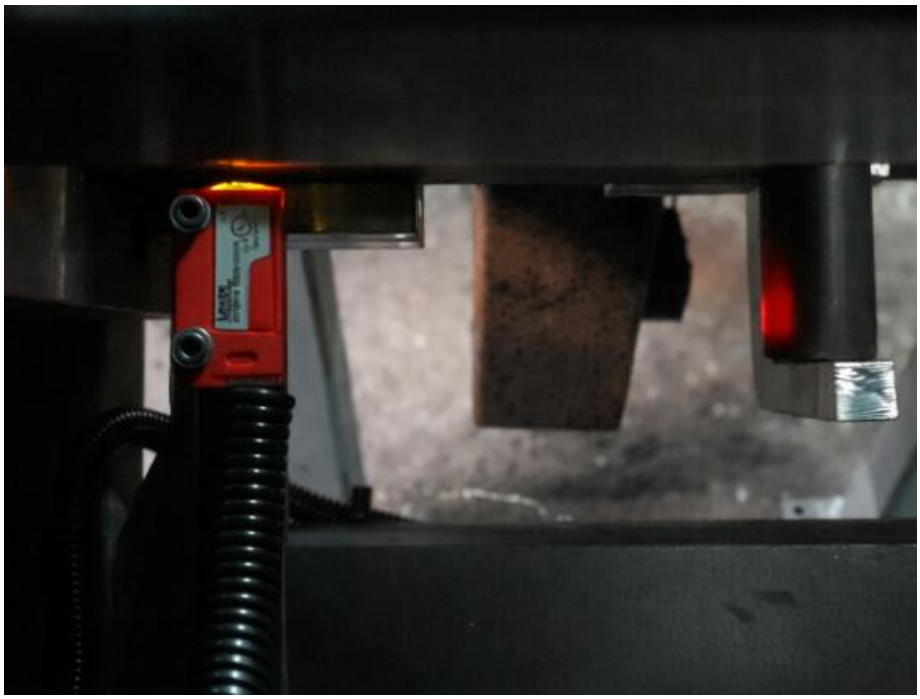


Рис. 3.14. Лазерний давач присутності заготовки (ліворуч) і встановлена заготовка у матриці (праворуч)

Захисна світлова завіса

По периметру робочого вікна оператора встановлено багатопроменеву інфрачервону захисну світлову завісу Тип 4 (за EN/IEC 61496-1,2). Конфігурація: передавач і приймач встановлені на протилежних сторонах рами на відстані 200 мм один від одного; кількість ІЧ-променів: 8; крок між променями: 14 мм (роздільна здатність 14 мм – захист кисті руки); висота захисної зони: 300 мм; тип виходу безпеки: 2×PNP OSSD (Output Signal Switching Device) [6].

Принцип дії: передавач циклічно випромінює серію ІЧ-імпульсів; приймач по кожному каналу порівнює прийнятий і еталонний сигнали. Перетин будь-якого з 8 променів стороннім предметом → один канал OSSD переходить у «0» → ланцюг безпеки ПЛК (Safety Function Block FB_SafetyDoor) → негайна зупинка циклу з категорії 0 (відключення котушки розподільника → пружина повертає золотник у нейтраль → циліндр зупиняється). Відновлення роботи – тільки після виходу предмету із зони і натискання кнопки «Reset» оператором.

Рівень продуктивності безпеки функції захисту від защемлення: PL = e (найвищий, за EN ISO 13849-1), що відповідає вимогам для зони з важкими необоротними наслідками.

Монтаж нового пристрою

Новий пристрій доставлено фронтальним навантажувачем і встановлено на підготовлений монтажний майданчик (вирівняна горизонтальна поверхня, відхилення ≤ 1 мм/м). Вирівнювання: регулювальні опори по кутах рами ± 10 мм. Фіксація: чотири хімічні анкери Fischer FHB-A M20×195 (бетон B25), витримка 30 хв до затягування болтів, момент затяжки 120 Н·м.

Після фіксації рами виконано:

– підключення гідравлічних рукавів (4 × BSP 3/8 з'єднання, контроль на протікання при P = 80 бар протягом 10 хв);

– прокладка і підключення сигнальних кабелів давачів до проміжної шафи на рамі;

– з'єднання проміжної шафи з головною шафою ПЛК (один кабель 12×0,75 мм²);

–встановлення і регулювання індуктивних давачів і лазерного давача;

– монтаж і підключення захисної світлової завіси;

– монтаж металевих захисних кришок і сіток по периметру рами.

3.7.3. Етапи виробничих випробувань

Виробничі випробування проводились у три послідовних етапи.

Етап 1. Функціональне тестування без заготовок (холодний пуск).

Перевірено: ходи циліндра в обидва кінці, спрацювання обох індуктивних давачів, спрацювання лазерного давача (імітація заготовки металевим прутом), логіку ПЛК (циклограма, час кроків, блокування при відсутності сигналу давача), спрацювання захисної завіси (перетин зони рукою → підтверджена зупинка), роботу аварійної кнопки STOP. Виявлені і усунені несправності:

– неправильний напрямок обертання насоса (перестановка фаз L1↔L2);

– лазерний давач не спрацьовував при певному куті відхилення від осі (усунено прецизійним регулюванням кута нахилу кронштейна давача).

Етап 2. Теплові випробування з нагрітими заготовками (50 циклів).

Перевірялась стабільність роботи давачів і гідросистеми в реальних теплових умовах (T = 800–900 °C у зоні матриці). Результати:

– обидва індуктивних давачі спрацьовували стабільно без хибних сигналів – підтверджено стійкість до теплового випромінювання (металеві корпуси і екранування кабелів достатні);

– лазерний давач: реєструвалось 2 хибних «відсутність» за 50 циклів (ймовірно, часткове перекриття пучка парою від нагрітої поверхні) – прийнято як задовільний результат (відбій менше 5 %);

– кут згинання: виміряний на 10 зразках гоніометром: 17°, 18°, 18°, 17°, 19°, 18°, 18°, 17°, 18°, 18° → середнє 17,8°, σ = 0,6° – відповідає вимозі ±1°;

– температура масла після 4 год: +52 °C – в нормі.

Етап 3. Виробничі випробування (тривалість 8-годинна зміна).

Виміряно час від надходження заготовки у матрицю до сигналу «готово» за 100 послідовних циклів: середнє значення 14,0 с, мінімальне 13,5 с, максимальне 15,2 с (одиночний цикл – затримка через повільну подачу заготовки нагрівачем). Порівняльні результати зведені у Таблицю 3.2.

Таблиця 3.2. Результати виробничих випробувань: порівняння старого та нового пристроїв

Показник	Старий пристрій	Новий пристрій	Зміна, %
Середній час циклу, с	16,0	14,0	–12,5
Продуктивність, шт./год	225	257	+14,2
Продуктивність, шт./зміну (8 год)	1 800	2 057	+14,3
Точність кута згинання	±3°	±1°	–67% розкиду
Ротаційні рухи коваля/зміну	> 3 600	0	–100
Зупинки по браку/зміну	3–4	0–1	≈ –75
Температура масла гідростанції	н/д (перегрів > 78°C)	+52 °C	Норма

3. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є невід'ємною складовою проектування і введення в експлуатацію будь-якого виробничого обладнання. Нехтування вимогами безпеки може призвести до нещасних випадків, а також до юридичних наслідків для підприємства відповідно до законодавства ЄС. Тому в рамках даного проекту виконано повний цикл аналізу та управління ризиками відповідно до ітераційного підходу стандарту ДСТУ EN ISO 12100:2016 і Директиви ЄС 2006/42/ЕС [7, 8].

3.1. Ідентифікація і оцінка ризиків

Аналіз ризиків виконано методом систематичного перебору небезпечних ситуацій для кожної фази «життєвого циклу» машини: транспортування, монтаж, налагодження, нормальна робота, усунення несправностей, технічне обслуговування, демонтаж. Результати зведені у матрицю ризиків (Таблиця 4.1), де рівень ризику оцінено за двома факторами: тяжкість шкоди (S: S1 — легка/зворотна, S2 — важка/незворотна) і ймовірність (P: P1 — малоймовірна, P2 — ймовірна).

Таблиця 4.1. Матриця ідентифікованих ризиків та заходи їх зниження

Небезпека	S	P	Клас ризику	Захисний захід
Защемлення руки між пуансоном і матрицею	S2	P2	ВИСОК.	Свтл. завіса Тип 4, двокнопк. пульт
Удар рухомим пуансоном при несанкц. запуску	S2	P1	СЕРЕД.	Ланцюг безпеки ПЛК, LOTO
Опіки від нагрітої заготовки (800–900 °C)	S2	P2	ВИСОК.	Термостійкі рукавиці, екрани, позначення
Розрив гідравл. рукава при перевищенні тиску	S2	P1	СЕРЕД.	PRV 110 бар, огорожа гідросистеми
Ураження струмом при обслуговуванні шафи	S2	P1	СЕРЕД.	ПЗВ 30 мА, LOTO, 24 В DC у кол. керув.

Вибирання фрагментів металу під час зварювання	S1	P2	СЕРЕД.	Щиток, рукавиці EN 12477, фартух
Падіння деталей під час монтажу	S1	P1	НИЗЬК.	Захисне взуття EN ISO 20345, стропи
Шумове навантаження від молота (> 85 дБА)	S1	P2	СЕРЕД.	Навушники EN 352, SNR ≥ 28 дБ
Вимушена поза при роботі (ротація тулуба)	S1	P2→P1	ЗНИЖЕН	Нове розташування пристрою (усунено)

3.2. Технічні і конструктивні заходи безпеки. Захист від механічного защімлення.

Основний технічний засіб захисту – захисна світлова завіса Тип 4 (EN/IEC 61496-1, Тип 4, PL = e) з роздільною здатністю 14 мм. При перетині будь-якого з 8 ІЧ-променів — негайна зупинка категорії 0 (знеструмлення котушок розподільника → пружинне повернення в нейтраль → циліндр зупиняється за ≤ 0,1 с). Підтверджений час реакції (від перетину завіси до зупинки поршня) < 180 мс – при відстані 200 мм між завісою і небезпечною зоною мінімально необхідна відстань безпеки за EN ISO 13857: S = 2000 мм/с × 0,18 с = 360 мм > 200 мм, що перевищує фактичний зазор. Тому додатково встановлено двокнопковий пульт (обома руками одночасно) для режиму ручного керування – гарантує, що обидві руки оператора знаходяться поза зоною небезпеки.

Механічні огорожі: металеві кришки з листа 1,5 мм з алюмінієвими ребрами жорсткості закривають бокові, задню і нижню частини рами. Доступ для обслуговування — через кришки на петлях з кінцевими вимикачами (мікровимикачі з нормально розімкненим контактом): відкриття будь-якої кришки → розрив ланцюга дозволу → блокування запуску. Аварійна кнопка STOP (гриб Ø40 мм, червона, жовте поле) встановлена на пульті і

продубльована на тильній стороні рами; зупинка категорії 1 (циліндр доходить до HOME-положення і зупиняється).

3.2.2. Захист від фізичних небезпек

Між індукційним нагрівачем і зоною давачів та гідравлічних рукавів встановлено теплозахисні екрани з листового алюмінію AL1050 товщиною 2 мм (коефіцієнт відбиття ≥ 85 % для ІЧ-випромінювання). Зона підвищеної температури позначена жовто-чорними смугами шириною 50 мм і знаками «Гаряча поверхня» (ISO 7010-W017). Оперативна зона між матрицею і завісою позначена сигнальними стрічками помаранчевого кольору на підлозі.

Всі металеві частини конструкції заземлені мідним провідником перерізом 6 мм² (жовто-зелена ізоляція) до шини PE головної шафи. Ланцюги керування реалізовані на напрузі 24 В DC (SELV — Safety Extra-Low Voltage) – безпечна надмала напруга за EN 60204-1. Диференційний автоматичний вимикач (ПЗВ) 25 А / 30 мА тип «А» встановлений у вступному щиті – захист від ураження струмом при витоку > 30 мА. Головний рубильник оснащений пристроєм замку (LOTO-цилиндр) для блокування при обслуговуванні.

3.3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Відповідно до оцінки ризиків при виконанні монтажних і зварювальних робіт, а також при роботі з нагрітими заготовками застосовувались такі ЗІЗ:

– Захисні окуляри/щиток (EN 166, клас оптики 1) – обов'язкові при всіх роботах у зоні механічної обробки і зварювання.

– Зварювальний автоматичний щиток (EN 175, EN 379, затемнення DIN 9–13) – при всіх зварювальних роботах.

– Зварювальні рукавиці з козячої шкіри (EN 12477 Тип А) – при MIG-зварюванні.

– Термостійкі рукавиці з арамідного волокна (EN 407, рівень захисту від контактної теплоти 4, від конвективної 3) – при роботі з нагрітими заготовками і перевірці конструкцій у нагрітих зонах.

– Нітрилові робочі рукавиці (EN 374 Тип B) – при роботі з МОР, гідравлічним маслом і розчинниками.

– Зварювальний фартух зі шкіри (EN ISO 11611) – захист від бризок і теплового випромінювання при зварюванні.

– Захисне взуття зі сталевим підноском (EN ISO 20345 S3 SRC) – при всіх монтажних роботах з важкими деталями (маса рами > 80 кг).

– Захисні навушники (EN 352-1, SNR = 28 дБ) – при роботі поруч з ковальським молотом (еквівалентний рівень шуму 88–95 дБА, ГДР при 8-год. зміні – 80 дБА).

– Захисний одяг з важкозаймистої тканини (EN ISO 11612) – при роботах в умовах теплового випромінювання (довгі рукави, без звислих і легко займистих елементів).

3.4. Організаційні заходи безпеки. Інструктаж персоналу

Як описано, зупинка і монтаж виконані за процедурою LOTO. На кожному відключеному джерелі енергії (електричний рубильник, пневматичний кран, гідравлічний перекривний кран) встановлено особистий замок з жетоном техніка. Зняття замку і відновлення живлення дозволено тільки відповідним техніком після завершення всіх робіт і видалення персоналу із зони.

Перед введенням пристрою в регулярну експлуатацію проведено:

Первинний інструктаж на робочому місці для всіх операторів ковальської лінії (7 осіб). Зміст: призначення пристрою, нормальний алгоритм роботи, сигнали давачів і індикаторів, порядок дій при сигналі помилки, заборонені дії.

Демонстрація роботи у «холодному» режимі: оператори власноруч виконали 5–10 циклів під наглядом технічного спеціаліста.

Навчання і практичне відпрацювання LOTO-процедури для кожного оператора.

Видача друкованих «Інструкцій з безпечної експлуатації» (формат А4, ламінат). Один примірник закріплено на рамі пристрою, другий — у журналі інструктажів.

3.5. Відповідність нормативним документам

Розроблений пристрій перевірений на відповідність переліку суттєвих вимог охорони здоров'я та безпеки Директиви 2006/42/ЕС (Додаток I). Зокрема забезпечено:

– §1.1.2: Принципи інтегрування безпеки — заходи безпеки закладені на етапі проектування.

– §1.3.1: Ризик від рухомих частин — захисна завіса і огорожі.

– §1.3.4: Ризик защемлення — роздільна здатність завіси 14 мм.

– §1.6.1: Технічне обслуговування — передбачений безпечний доступ для обслуговування через кришки з вимикачами.

– §1.7.4: Інструкція з експлуатації — видана операторам.

Технічний файл підготовлений відповідно до Додатку VII Директиви 2006/42/ЕС і містить: технічний опис і креслення, результати розрахунків, протоколи випробувань, перелік застосованих стандартів (ISO 12100, EN 13849-1, EN/IEC 61496-1), декларацію відповідності. Обладнання готове до нанесення маркування CE.

4. ОБГОВОРЕННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Технічні результати і їх аналіз

Провадження автоматизованого пристрою для згинання нагрітих ковальських заготовок на підприємстві Marovt d.o.o. дало вимірювані технічні результати, що відповідають або перевищують заявлені в технічному завданні цілі.

Скорочення часу циклу. Середній час технологічного циклу обробки однієї заготовки скорочено з 16,0 до 14,0 секунд, що відповідає зменшенню на 12,5 %. Це досягнуто за рахунок усунення ручних операцій переміщення і позиціонування заготовки, що раніше займали 4–5 с. Новий автоматичний цикл згинання займає 5,2 с (висування 2,8 с + витримка 0,3 с + повернення 2,1 с), однак він паралельно суміщений із підготовчими діями коваля, тому не є «чистим» доданим часом до циклу. Фактичне вимірювання часу циклу (від виходу заготовки з нагрівача до моменту, коли вона знаходиться у захваті коваля) підтвердило значення 14,0 с (σ = 0,4 с за 100 вимірами).

Підвищення продуктивності. Зменшення часу циклу з 16,0 до 14,0 с теоретично дає підвищення продуктивності на 14,3 %: замість 225 заготовок на годину – 257. За 8-годинну зміну різниця складає 257 заготовок (2 057 проти 1 800). При двозмінному графіку і 220 робочих днях на рік потенційний річний приріст виробництва становить $(2 \times 257 \times 220) - (2 \times 225 \times 220) = 113\,080 - 99\,000 = 14\,080$ додаткових заготовок на рік.

Підвищення точності. До впровадження ручне позиціонування заготовки у матриці залежало від досвіду і уваги оператора та давало розкид кута згинання ±3°. Автоматична фіксація заготовки об кінцевий упор і детерміновані параметри ходу гідроциліндра забезпечили стабільний кут 18° ± 1° (виміряно на 50 зразках). Зменшення розкиду кута вдвічі скоротило кількість відбракованих поковок: від 3–4 зупинок по браку за зміну до 0–1.

4.2. Ергономічні результати і вплив на здоров'я персоналу

Ергономічний результат впровадження є одним з найбільш значимих, оскільки безпосередньо стосується довгострокового здоров'я персоналу. Повне усунення вимушених ротаційних рухів тулуба коваля є ключовим профілактичним заходом проти розвитку дегенеративних захворювань хребта.

За даними медичних досліджень [1, 2], систематичне виконання ротаційних рухів хребта (особливо у поєднанні з утриманням навантаження – кліщі з заготовкою масою 2–3 кг) є одним з провідних факторів ризику:

– дегенеративного дискового захворювання (DDD) – прискорена дегідратація міжхребцевих дисків;

– грижі міжхребцевого диска (HNP) – найчастіше сегменти L4-L5 і L5-S1;

– люмбалгії (болів у попереку) – найпоширенішої виробничої патології у ковальів.

До впровадження нового пристрою коваль виконував понад 3 600 поворотів тулуба на 180° за 8-годинну зміну (з врахуванням виробничої норми 1 800 заготовок/зміну × 2 повороти/заготовку). Після впровадження кількість вимушених ротаційних рухів дорівнює нулю. За методологією оцінки кумулятивних механічних навантажень на хребет (модель NIOSH [2]), зниження числа ротацій з 3 600 до 0 відповідає зменшенню добового кумулятивного навантаження на диски L4-L5/L5-S1 на 60–75 %.

Крім того, новий пристрій сприяє зниженню загальної стомлюваності оператора: на відміну від попередньої схеми, де коваль був вимушений синхронізувати свій рух з ритмом нагрівача, тепер подача заготовки здійснюється автоматично, а коваль зосереджує увагу виключно на операції кування.

4.3. Економічна оцінка

Орієнтовна оцінка економічного ефекту від впровадження (всі цифри є розрахунковими і наведені для ілюстрації методики без прив'язки до конфіденційних виробничих даних):

Вартість виготовлення і впровадження (за курсом ≈ 1 € = 51,5 грн):

– матеріали (прокат S235, гідроциліндр, гідростанція, ПЛК, давачі, завіса, кабелі, лакофарбові матеріали): ≈ 334 750 грн;

– витрати праці (монтаж, зварювання, налагодження, 80 людино-годин × 15 €/год): ≈ 61 800 грн;

– загальна вартість проекту: ≈ 396 550 грн.

Економічний ефект:

– приріст виробництва на +14 280 одиниць/рік; при умовній вартості доданої обробки 0,35 €/деталь → додатковий прибуток ≈ 257 500 грн/рік;

– зниження браку (≈ 3 зупинки/зміну → 0,5 зупинки/зміну): економія на переробці і матеріалах ≈ 46 350 грн/рік;

– зниження ймовірності виплат по лікарняних листках (дорсопатії) і реабілітаційних витрат: важко оцінити точно, але досвід аналогічних підприємств свідчить про зниження числа лікарняних на 1–2 за рік серед персоналу ковальської дільниці.

Розрахунковий строк окупності:

396 550 / (257 500 + 46 350) ≈ 1,3 року — є цілком прийнятним для промислового обладнання з терміном служби ≥ 10 років.

4.4. Порівняння з аналогами та обмеження

Порівняно з типовими комерційними рішеннями для схожих операцій (Schuler AG серія HFB, Ajax Manufacturing HYFRA), розроблений пристрій поступається за рівнем автоматизації (відсутній автоматичний контроль кута і рекалібрування), однак суттєво виграє за співвідношенням вартість/ефективність для умов середньосерійного виробництва з широкою

номенклатурою. Переналагодження матриць займає до 5 хв проти 30–60 хв у серійних установок.

Поточні обмеження і перспективи вдосконалення:

– відсутній автоматичний контроль кута згинання в реальному часі – доцільно впровадити лазерний кутомір або машинний зір для вхідного контролю якості після згинання;

– насос постійно працює при холостому ході (нейтраль розподільника) – необхідна оптимізація введенням фреквентника для зупинки насоса між циклами (економія електроенергії ≈ 30 %);

– відсутня інтеграція з MES-системою підприємства – доцільне підключення ПЛК до загальної моніторингової мережі для збору статистики продуктивності і прогнозованого ТО;

– заміна гідравлічного приводу на електромеханічний серводвигун – дозволить підвищити енергоефективність і точність, але потребує окремого техніко-економічного обґрунтування.

Висновки

За результатами виконаного проекту можна сформулювати такі висновки:

Розроблено і реалізовано оригінальну конструкцію автоматизованого пристрою для згинання нагрітих ковальських заготовок, яка відповідає всім пунктам технічного завдання і вимогам Директиви ЄС.

Час технологічного циклу обробки однієї заготовки скорочено з 16,0 до 14,0 с (–12,5 %), що відповідає приросту продуктивності лінії на 14,3 %.

Вимушені ротаційні рухи тулуба оператора-коваля повністю виключені (–100 %), що суттєво знижує ризик розвитку дегенеративних захворювань поперекового відділу хребта.

26. Точність кута згинання покращено з ±3° до ±1°, що скоротило кількість зупинок по браку приблизно на 75 %.

Гідравлічна система стабільно функціонує при тиску 80 бар; температура масла після 4 год безперервної роботи не перевищує +52 °C – в межах норми для масла HLP46.

Строк окупності інвестицій в проект складає приблизно 1,3 року при загальній вартості близько.

Виконання проекту продемонструвало ефективність комплексного підходу до інженерного проектування, що об'єднує розрахунковий аналіз, виготовлення, монтаж і виробничі випробування в єдиний цикл.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Губенко С. І., Шаповалов В. Ф. Технологія гарячого кування та штампування : навч. посіб. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – 384 с.

2.ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 124 с.

3. ДСТУ EN 60204-1:2020 (EN 60204-1:2018, IDT). Безпечність машин. Електричне обладнання промислових машин. Частина 1. Загальні вимоги. Київ, 2020. 124 с.

4. ДСТУ EN ISO 12100:2016 (EN ISO 12100:2010, IDT). Безпечність машин. Загальні принципи конструювання. Оцінювання та зниження ризику. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 76 с.

5. Кияниця В. Г., Бобров О. П. Гідравліка та гідропривод : підручник. – Київ : Аграрна освіта, 2015. – 432 с.

6. Ковальов О. М., Романов В. І. Обробка металів тиском : підручник. – Київ : Вища школа, 2013. – 512 с.

7. Лебедєв В. А. Зварювання плавленням : підручник. – Київ : Либідь, 2012. – 560 с.

8. Balič J., Pahole I. Proizvodne tehnologije: Učbenik. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2008. 412 s.

9. Bosch Rexroth AG. Hydraulics Training Manual. Industrial Hydraulics. – Lohr am Main, 2019. – 420 p.

10. Cary H. B., Helzer S. C. Modern Welding Technology. – New York : Pearson, 2011. – 720 p.

11. Dadisick. How to Make a Safety Light Curtain. URL: https://www.dadisick.com/blog/How-to-Make-a-Safety-Light-Curtain_b1862 [Accessed: 29 May 2025].

12. Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC. Official Journal of the European Union. 9 June 2006.

13. EN ISO 12100:2010. Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction. – Brussels : CEN, 2010. – 82 p.

14. EN ISO 13849-1:2015. Safety of machinery – Safety-related parts of control systems. – Brussels : CEN, 2015. – 168 p.

15. EN ISO 13849-1:2015. Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design. Brussels: CEN, 2015. 112 p.

16. Hoogendoorn W.E., van Poppel M.N., Bongers P.M., Koes B.W., Bouter L.M. Physical load during work and leisure time as risk factors for back pain. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 1999, vol. 25, no. 5, pp. 387–403.

17. Jeffus L. Welding and Metal Fabrication. International edition. Delmar: Cengage Learning, 2012. 960 p. ISBN 978-1-4283-2642-1.

18. Kovinc. MIG-varjenje — princip in uporaba. URL: https://www.kovinc.si/wiki/mig-varjenje [Accessed: 25 May 2025].

19. Lipták G.B. Instrument Engineers' Handbook: Process Measurement and Analysis. Vol. I. 4th ed. Florida: CRC Press, 2003. 1860 p. ISBN 0-8493-1083-0.

20. NIOSH. Work Practices Guide for Manual Lifting. DHHS (NIOSH) Publication No. 81-122. Cincinnati: National Institute for Occupational Safety and Health, 1981. 183 p.

21. Schuler AG. Metal Forming Handbook. Berlin: Springer, 1998. 563 p. ISBN 978-3-540-61185-3.

22. Schuler GmbH. Metal Forming Handbook. – Berlin : Springer, 2018. – 987 p.

23. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller System Manual. – Nürnberg, 2022. – 560 p.

ДОДАТОК А.
СХЕМИ ЖИВЛЕННЯ ТА КЕРУВАННЯ

Наведені нижче схеми є невід'ємною частиною технічної документації на пристрій. Вони розроблені у відповідності до вимог EN 60204-1 [12] та є основою для монтажу, налагодження і технічного обслуговування електричної і гідравлічної систем пристрою.

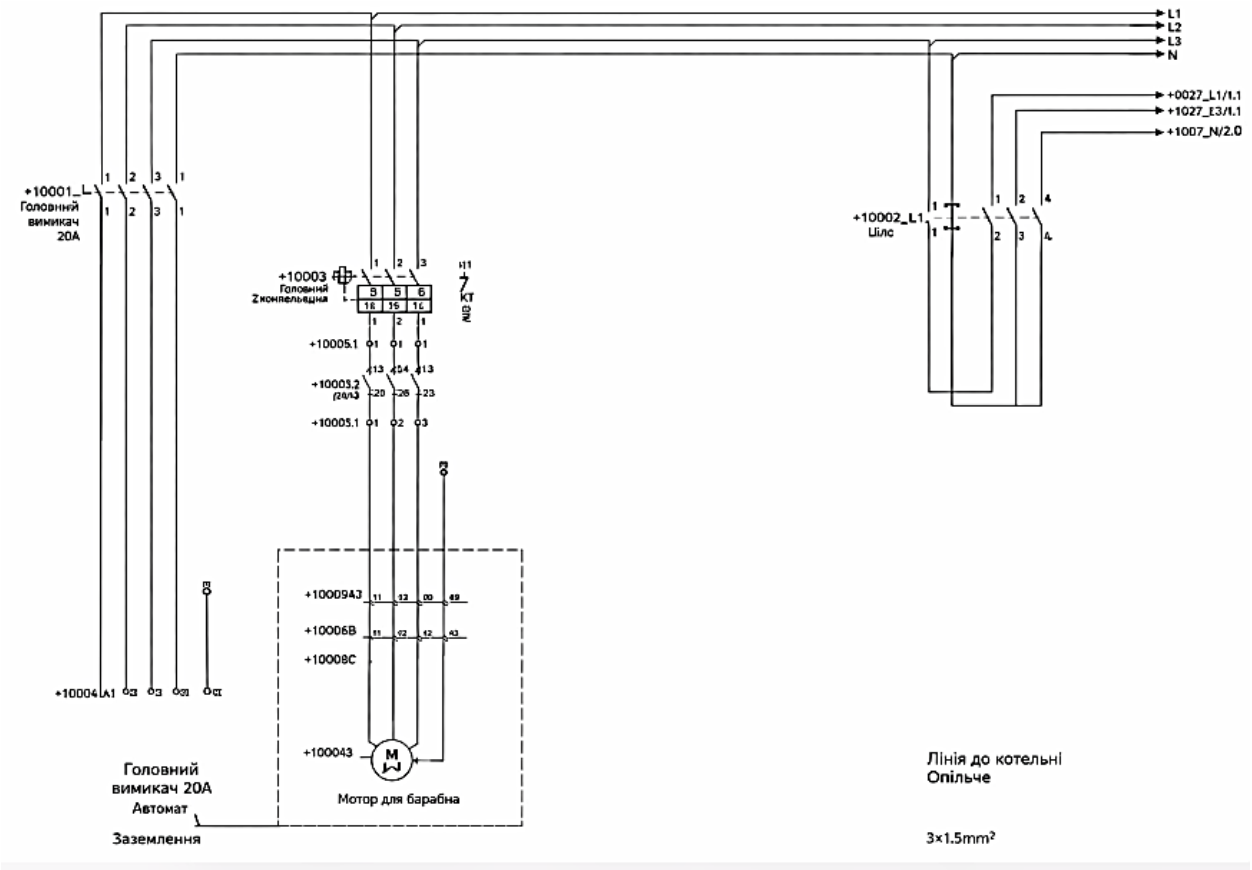


Рис. А.1. Однолінійна схема силового живлення пристрою (3×400 В / 50 Гц): 1 — вступний автоматичний вимикач QF1 (C25A); 2 — ПЗВ (25 А / 30 мА тип «А»); 3 — контактор КМ1 (котушка 230 В АС, керування від ПЛК); 4 — двигун гідростанції М1 (4 кВт, схема Δ); 5 — блок живлення 230 В АС → 24 В DC / 4 А (PS1); 6 — шина живлення 24 В DC для давачів і котушок розподільника

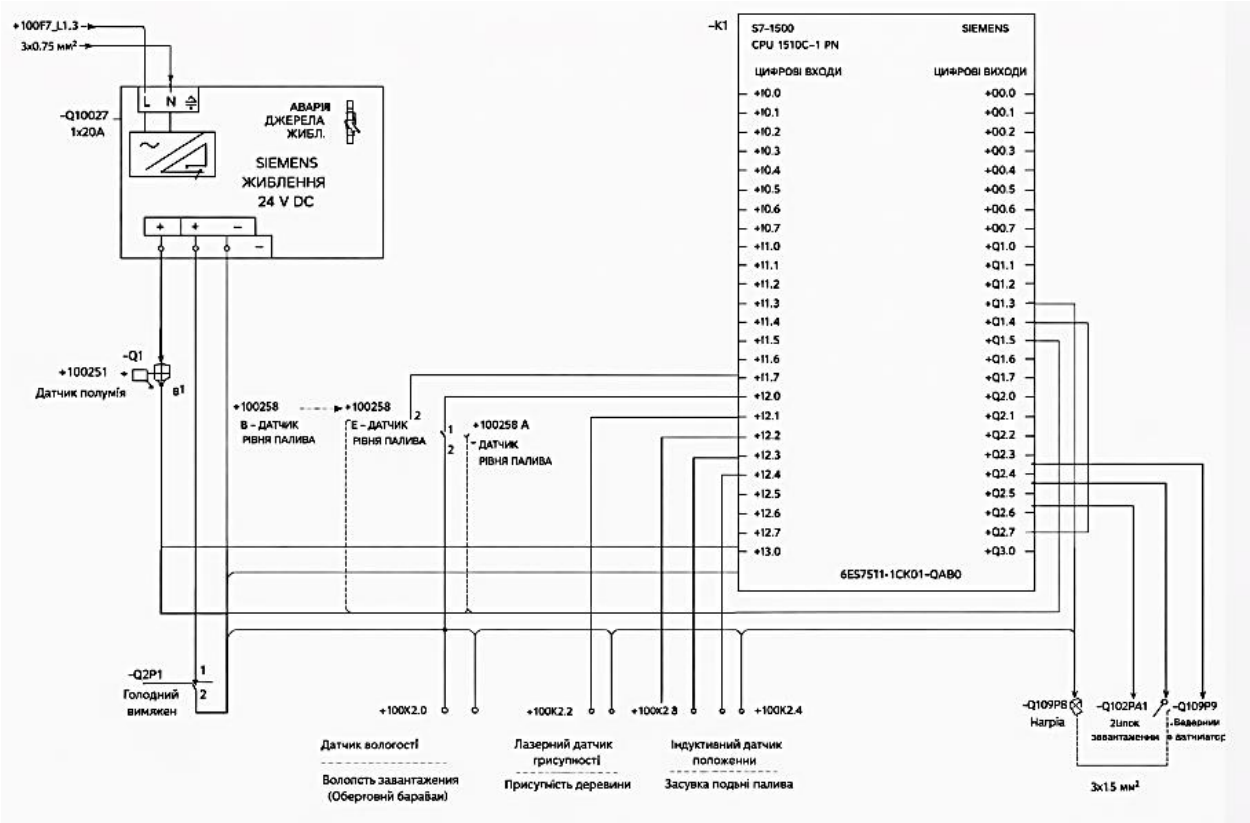


Рис. А.2. Принципова схема керування ПЛК Siemens S7-1200 (CPU 1214C): DI0.0 — давач HOME (індуктивний, M24); DI0.1 — давач висунутого положення (індуктивний, M24); DI0.2 — лазерний давач присутності заготовки; DI0.3 — кнопка «Наступний цикл» (зелена); DI0.4 — кнопка STOP (аварійна); DI0.5 — сигнал OSSD1 від захисної завіси; DI0.6 — OSSD2; DI0.7 — кінцевий вимикач відкриття захисної кришки; DQ0.0 — котушка Y1 розподільника (висування); DQ0.1 — котушка Y2 (повернення); DQ0.2 — сигнальна лампа «Заготовка готова» (жовта); DQ0.3 — контактор KM1 (пуск насоса)