

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Автоматизоване управління технологічними процесами
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота / проект

група (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему Розроблення температурно-швидкісного режиму роботи шварто-протяжного агрегату і розробка системи автоматизованого керування температурним режимом протяжного станка

Виконав: студент 2 курсу, групи 8_15_10
спеціальності 151 Автоматизація та управління інформаційними процесами
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Інтеграція та системне інтегрування інформаційних систем
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

В.В. Шмагир
(ініціали та прізвище)

Керівник професор, доцент А.М. Іванченко
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент О.С. Кост
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя
2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Металургії
Кафедра Автоматизованого управління технологічними процесами
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва)
Спеціалізація _____
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

"15" 12 2021 року

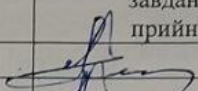
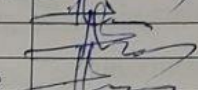
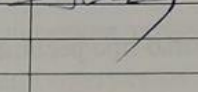
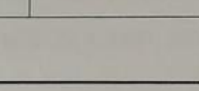
ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Михайло Володимир
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема кваліфікаційної роботи магістра Дослідження температурно-вишвидкостного режиму роботи шварно-прокатного агрегату і розробка системи автоматичного керування температурним режимом прокатного стану
керівник кваліфікаційної роботи магістра Володимир Анатолійович Мисюк к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти від "30" червня 2021 року № 944
- Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи магістра 25 листопада 2021
- Вихідні дані кваліфікаційної роботи магістра Умови виробництва заводу ДД "Кривий Ріг"
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Температурні умови виробництва алюмінієвої котлини металом безперервного лиття та прокату
2. Дослідження вишвидкостного режиму роботи шварно-прокатного агрегату
3. Дослідження температурного режиму при прокатці заготовки у прокатному стані
4. Розробка та дослідження системи автоматичного управління температурним режимом прокатного стану
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Математична модель швидкості заготовки на виході з шварного котла; Термограми за різними способами охолодження металу

структура селія калюдної КЗ температурно калки на вимод з нрмальною
стеня; програмний код керування об'єктом

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра:

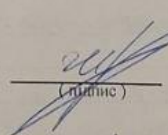
| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата завдання прийняв |
|--------|---|---|
| 1 | Міхаласюк Анатолій Миколайович, професор |  |
| 2 | Міхаласюк Анатолій Миколайович, професор |  |
| 3 | Міхаласюк Анатолій Миколайович, професор |  |
| 4 | Міхаласюк Анатолій Миколайович, професор |  |
| | | |
| | | |

7. Дата видачі завдання 1 лютого 2021р.

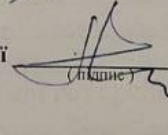
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра | Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи магістра | Примітка |
|-------|--|--|----------|
| 1. | Кваліфікаційний огляд з темми магістерської роботи | 2 лютого 2020 - 3 лютого 2020 | |
| 2. | Виконання математичної моделі для формування температурно-режиму прокатки алямінійвої золотовки. Розміщення на КЗ розміри температурні золотовки при її руці через коти прокатного станка. | 4 лютого 2020 - 26 лютого 2020 | |
| 3. | Обробка отриманих результатів та формування висновків | 24 листопада 2020 - 15 грудня 2020 | |
| 4. | Розробка КЗ температурним режимом | 14 грудня 2020 - 5 січня 2021 | |
| 5. | Розробка програмного коду КЗ в Inty 100 та перевірка формування зміти роботи КЗ | 6 січня 2021 - 15 березня 2021 | |
| 6. | Аналіз надійності швидкісного режиму роботи кваліфікаційного агрегату. Розміщення швидкісних параметрів на швидкісній кривій алямінійвої золотовки | 16 березня 2021 - 2 травня 2021 | |
| 7. | Обробка отриманих результатів | 2 травня 2021 - 23 травня 2021 | |
| 8. | Прекладальна практика | 24 травня 2021 - 29 травня 2021 | |
| 9. | Написання магістерської роботи. | 30 червня 2021 - 30 червня 2021 | |

Здобувач вищої освіти

 (підпис)
Міхаласюк В.В. (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи магістра

 (підпис)
Міхаласюк А.М. (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра виконана на 70 сторінках друкованого тексту та містить 15 таблиць та 34 рисунків. Перелік використаної літератури складає 25 посилань, з яких 3 – наукові роботи та іноземні видання.

Актуальність роботи. Вдосконалення якості виробництва алюмінієвої катанки на ливарно-прокатному агрегаті призводить до поліпшення механічних властивостей алюмінієвої катанки, тому дослідження теплового режиму прокатного стану та розробка системи автоматизації є актуальними.

Об'єкт дослідження. Температурний та швидкісний режими роботи ливарно-прокатного агрегату.

Предмет дослідження. Ливарно-прокатний агрегат.

Метою дослідження було дослідити температурно-швидкісний режими роботи ливарно прокатного стану та розробити систему автоматичного керування температурним режимом роботи прокатного стану, для поліпшення механічних властивостей алюмінієвої катанки.

Наукова новизна. У кваліфікаційній роботі магістра пропонується удосконаленна система автоматичного керування температурним режимом роботи прокатного стану, а саме система управління подачі води на кліті. Стабільність роботи цієї системи дозволяє отримувати катанку з кращими механічними властивостями. Розроблено комп'ютерну модель даної системи автоматичного керування температурним режимом роботи прокатного стану та проведено дослідження на якість роботи програмного коду.

КАТАНКА, ЛИВАРНО-ПРОКАТНИЙ АГРЕГАТ, ШВИДКІСНИЙ РЕЖИМ, ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ, КЛЕТІ

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 7 |
| ВСТУП | 8 |
| Розділ 1 Технологія виробництва алюмінієвої катанки методом безперервного лиття та прокатки | 10 |
| 1.1 Історія розвитку та шлях вдосконалення..... | 10 |
| 1.2 Агрегат для безперервного лиття та прокатки катанки з алюмінію та алюмінієвих сплавів типу LY-1600 | 11 |
| Висновок | 19 |
| Розділ 2 Дослідження швидкісного режиму роботи ливарно-прокатного агрегату..... | 20 |
| 2.1 Дослідження швидкості заготовки на виході з ливарного колеса | 20 |
| 2.2 Дослідження швидкості заготовки на вході в прокатний стан | 24 |
| 2.3 Дослідження впливу швидкості заготовки на виході з ливарного колеса та вході у прокатний стан на величину заготовки перед її прокаткою | 32 |
| Висновок | 35 |
| Розділ 3 Дослідження температурного режиму при прокатці заготовки у прокатному стані..... | 37 |
| 3.1 Математичне моделювання змінення температури заготовки при її прокатці | 37 |
| 3.2 Удосконалення способу керування температурою катанки на виході з прокатного стану | 45 |
| Висновок | 49 |
| Розділ 4 Розробка та дослідження системи автоматичного управління температурним режимом прокатного стану..... | 50 |

| | |
|--|----|
| 4.1 Розробка системи автоматичного управління температурним режимом та прив'язка її до реальних умов роботи прокатного стану | 50 |
| 4.2 Комп'ютерне моделювання САУ температурним режимом прокатного стану та дослідження її роботи | 50 |
| 4.2.1 Середовище програмування ПЛК та моделювання систем автоматичного управління Unity Pro..... | 51 |
| 4.2.2 Розробка програмного коду об'єкта керування | 52 |
| 4.2.3 Розробка програмного коду алгоритму керування..... | 56 |
| 4.2.4 Розробка інтерфейсу оператора та його програмного коду | 58 |
| 4.2.5 Дослідження на комп'ютерній моделі якості роботи САУ температурним режимом прокатного стану..... | 61 |
| Висновок | 66 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 67 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 68 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЛПА – ливарно-прокатний агрегат;

ЛПМ – ливарно-прокатний модуль;

САУ – система автоматичного управління;

ПП – перехідний процес.

ВСТУП

Алюмінієвий дріт є довгомірним металовиробом з круглим перерізом малого розміру. Виробництво алюмінієвого дроту затребуване. Вироби використовують у харчовій, меблевій промисловості, приладобудуванні, машинобудуванні, у будівництві під час проведення зварювальних робіт, для прокладання кабелів електроліній.

Основою для виготовлення дроту є алюмінієва катанка діаметром від 9 до 14 мм. Її одержують трьома способами.

Прокаткою, якщо вихідною сировиною є алюмінієві зливки. Для цього використовують дротяно-прокатний стан. Це комплекс автоматизованих механізмів, що оснащений нагрівальними печами з електричним, газовим або нафтовим обігрівом.

Електротехнічну катанку виготовляють методом пресування, якщо завод оснащено гідравлічним пресом. Нагрітий злиток поміщають у спеціальний контейнер із матрицею. На ній є отвір, що відповідає формі перерізу виробу. Обробка тиском відбувається за рахунок пуансону зі змінною пресшайбою, яка щільно заходить у простір контейнера.

Методом безперервного лиття та прокату, якщо сировина представлена у вигляді розплавленого алюмінію. Це передовий спосіб, який передбачає завантаження рідкої маси в кристалізатор. Спеціальне обертове колесо з вирізом на обід охолоджується водою. Під час руху метал кристалізується та передається на прокатні валки. Готову продукцію згортають у котушки, поміщають у поліетиленові пакети [1].

Виробництво алюмінієвого дроту методом безперервного лиття та прокату в цей час становить понад 80% загального обсягу його виробництва, а мідної катанки – до 100%.

Цим способом отримують бухти алюмінієвої катанки вагою до 1500 кг, що дає змогу скоротити відходи (85 ... 125 кг) та підвищити продуктивність. Також ці установки мають ряд техніко-економічних переваг у порівнянні з

процесом злиткової прокатки: менша площа, менша кількість обслуговуючого персоналу, нижча собівартість продукції [2].

Хоч цей метод й має довгий шлях розвитку, він все рівно потребує вдосконалення технології та способів управління, тож тема магістерської роботи є актуальною.

Тому у магістерській роботі на тему: «Дослідження температурно-швидкісного режиму роботи ливарно-прокатного агрегату і розробка системи автоматичного керування температурним режимом прокатного стану», задачами є: провести літературний огляд, знайти формули для розрахунку швидкісного та температурно режимів роботи ЛПА, провести розрахунки, побудувати графіки та зробити висновки.

Метою роботи є: на основі отриманих результатів дослідження швидкісного та температурного режимів роботи ливарно-прокатного агрегату запропонувати удосконалену систему автоматичного керування температурним режимом прокатного стану, на основі якої створити комп'ютерну модель та провести дослідження.

Розділ 1 Технологія виробництва алюмінієвої катанки методом безперервного лиття та прокатки

1.1 Історія розвитку та шлях вдосконалення

Технологія виробництва прокатки з безперервним литтям пройшла значний шлях розвитку. Спочатку катанку намагалися одержати, подаючи рідкий метал безпосередньо у міжвалковий проміжок. Цей спосіб, названий беззливковим прокатуванням, запропонував Г. Бессемер у 1865 р. [3]. Проте позитивні результати не було одержано ні із сталлю, ні з кольоровими металами через наявність тертя ковзання між початковою затверділою поверхнею зливка та поверхнею форми.

Надалі процес безперервної прокатки удосконалили та подавання металу на валки почали виконувати через насадки, які встановлено між ними.

Найбільшого поширення у сучасній металургії набула технологія, де обтискання зливків, одержаних безперервним литтям, відбувається після кристалізації металу [4].

Компанія «Continuus-Properti», що заснована у 1947 р. [м. Мілан (Італія)], згодом стала світовим лідером з розробки та виробництва обладнання БЛП. Спочатку технологію безперервного лиття та прокатки застосовували для виготовлення дроту зі свинцю і цинку. Проте з часом вона знайшла повсюдне застосування для виробництва катанки з алюмінію та міді, найважливіших матеріалів для кабельної промисловості [5,6].

Збільшення попиту на кабельну продукцію, поява нових вимог до якості алюмінієвої та мідної катанки сприяли вдосконаленню технології безперервного лиття і прокатки, появи нових розробників і виробників ливарно-прокатних агрегатів у США, СРСР, Великобританії, Німеччині, КНР та ін. [4,5].

У 1964 р. компаніями «Southwire» і «Western Electric» США шляхом модернізації ливарної машини та системи охолодження зливка в лінії «Properzi» розроблено ЛПА більшої продуктивності [7].

Для підвищення швидкості лиття в агрегаті збільшили довжину контакту литої заготовки з кристалізатором за рахунок збільшення кута охоплення його сталеву стрічкою з 180 до 270° [4].

Останніми роками на ринку агрегатів безперервного лиття та прокатки кольорових металів активно пропонують свою продукцію китайські фірми «Far East (China) Group Limited» і «Hefei Smarter Technology Group Corporation». Відмінності полягають тільки в техніко-економічних показниках і конструкції деяких машин [8].

Під час проходження практики на заводі «Крок Г.Т.» ознайомився з агрегатом для безперервного лиття та прокатки з алюмінію та алюмінієвих сплавів типу LY-1600.

1.2 Агрегат для безперервного лиття та прокатки катанки з алюмінію та алюмінієвих сплавів типу LY-1600

Машина для безперервного лиття і прокатки катанки з алюмінію і алюмінієвих сплавів типу LY -1600 має характеристики, які приведені у табл. 1.1 ... 1.10.

Таблиця 1.1 - Чотириколісна машина безперервного лиття

| Характеристики | чисельне значення |
|---|-------------------|
| Діаметр ливарного колеса, мм | 1600 |
| Площа поперечного перерізу канавки, мм ² | 2300 |
| Швидкість лиття, м / хв | 7.6 - 15.0 |
| Частота обертання ливарного колеса, об / хв | 1.66 - 3.3 |
| Потужність ел.двигателя з частотним перетворювачем, кВт | 5.5 |
| Тиск охолоджувальної води, МПа | 0,2 - 0,5 |

Продовження таблиці 1.1

| | |
|--|---------|
| Витрата охолоджуючої води, т / год | 100 |
| Внутрішній контур, т / год | 40 |
| Зовнішній контур, т / год | 30 |
| Бічний контур, т / год | 30 |
| Температура охолоджуючої води, ° С | 15 - 45 |
| Вимоги до охолоджувальної води, РН | 7 - 8 |
| зміст СаО, РРМ | 20-50 |
| Розмір частки забруднення, мм, не більше | 0.8 |

Чотириколісного ливарна машина складається з верхнього розливного жолоба, нижнього розливного жолоба, кристалізаціонного колеса з приводом, вузла притискного колеса, що утримує сталеві стрічки, пристрої мастила, що направляє роликового жолоби, пристрою натягу, зовнішнього і внутрішнього охолоджувального пристрою.

Розплавлений алюміній тече в верхній розливний жолоб з роздавальної печі через канал, поплавкову пробку управління потоком, а потім в нижній розливний жолоб.

Весь розливний жолоб може переміщатися вгору і вниз електродвигуном, черв'ячним редуктором і гвинтовою парою.

Розплавлений алюміній надходить в дозуючу камеру горизонтально і формується між кристалізаційним колесом і закриває кристалізаціонне колесо сталеву стрічкою. Перетин кристалізаціонного колеса має Н-подібну форму. Всебічне охолодження гарантує міцність і симетрію кристалізації.

Є чотири напрямки охолодження кристалізаціонного колеса - зовнішнє, внутрішнє та два бокових.

Трубопроводи внутрішньої, зовнішньої і зовнішня частина бічної системи охолодження можуть повертатися навколо відповідної осі, дистанціюючись від кристалізаціонного колеса, що зручно для відтворення поточкових даних охолоджуючої води і обслуговування. Внутрішня система

охолодження має три зони, зовнішня система охолодження має три зони, збоку (зовнішня) система охолодження має дві зони, збоку (внутрішня) система охолодження має дві зони. Разом є десять зон регулювання охолодження.

Все сопла внутрішньої і зовнішньої системи охолодження виконані з нержавіючої сталі. Передбачені показують прилади тиску, потоку води і регульованого тиском стисненого повітря натягу металеві стрічки кристалізатора.

Внутрішня система охолодження кріпиться на валу поруч з колесом кристалізатора. Через внутрішній устрій охолодження проходить охолоджуюча вода з тиском 0.2 ... 0.5 МПа. Охолоджуюча вода розпорошується по внутрішній поверхні кристалізаційного колеса через сопла.

Відповідно, алюмінієвий розплав охолоджується поступово і згущується в алюмінієвий злиток.

Лиття на кристалізаційна колесі вибирається з сформованого злитка, витягується переднім тяговим пристроєм по буферному жолобу. Притискне колісне пристрій притискає сталеву стрічку для запобігання витікання рідкого алюмінію з жолоба кристалізаційного колеса. Направляючий пристрій використовується для настройки і зміни напрямку руху сталеві стрічки.

Натяг сталеві стрічки може регулюватися колісним пристроєм натягу.

Є змазує пристрій сталеві стрічки, яке використовується для легкого роз'єднання литої заготовки від поверхні сталеві стрічки. Змащувальне пристрій знаходиться нижче притискного колеса і монтується за місцем.

Таблиця 1.2 - Правильний пристрій

| Характеристики | Чисельне значення |
|---------------------------------|-------------------|
| Кількість коліс, штук | 5 |
| Кількість правильних груп, штук | 1 |

Правильне пристрій забезпечений п'ятьма правильними роликами: трьома нерухомими роликами знизу і двома рухомими роликами зверху.

Підйом і опускання рухливих роликів наводиться гідроциліндром і управляється електрично.

Таблиця 1.3 - Переднє тяговий пристрій

| Характеристики | Чисельне значення |
|---|-------------------|
| Потужність ел.двигателя з частотним перетворювачем, кВт | 5.5 |
| Діаметр колеса, мм | 130 |

Таблиця 1.4 - Летючі ножиці

| Характеристики | Чисельне значення |
|--------------------------------|-------------------|
| Потужність електродвигуна, кВт | 15 |

Верхня і нижня пластина летючих ножиць наводяться через мотор-редуктор. На верхній і нижній пластині встановлені два леза. Швидкість різання зубців ножиців узгоджена зі швидкістю лиття. Якщо якість лиття погане, то летючі ножиці будуть різати литьову заготовку на дрібні мірні шматки. Якщо якість лиття відповідає стандарту, летючі ножиці зупиняються, і починається процес прокатки. Якщо виникають проблеми з роботою прокатного стану або здвоєного Бухтовщик кошикового типу, летючі ножиці автоматично включаються, ливарна заготівля ріжеться на дрібні мірні шматки, скидається на візок і відвозиться геть обслуговуючим персоналом.

Таблиця 1.5 - Буферний жолоб

| Характеристики | Чисельне значення |
|--|-------------------|
| Тиск стисненого повітря або масла, МПа | 0.4 ... 0.8 |

У передній частині лінії є буферний жолоб. При сталій роботі прокатний стан буде обжимати заготовку автоматично. Але постійне лиття вимагає постійної обрізки заготовки перед досягненням нормального якості заготовки. Буферний жолоб піднімається натисканням на кнопку і забезпечує відсутність

нахилу заготовки. Коли леткі ножиці переріжуть заготовку, буферний жолоб пом'якшить падіння відрізаного шматка.

Таблиця 1.6 - Індукційний нагрівач

| Характеристики | Чисельне значення |
|--|-------------------|
| Вихідна частота, Гц | 450 |
| Вихідна потужність, кВт | 350 |
| Споживання охолоджуючої води, м ³ / год | 15 |
| Температура охолоджуючої води, °С | 15 ... 45 |
| Тиск охолоджувальної води, МПа | 0.2 |

Індукційний нагрівач використовується при виробництві алюмінієвих сплавів для нагріву заготовки перед прокатним станом.

Таблиця 1.7 - Пристрій подачі

| Характеристики | Чисельне значення |
|------------------------------|-------------------|
| Тиск стисненого повітря, МПа | 0.4 ... 0.8 |

Підйом і опускання подає колеса управляється пневматичним елементом. Лита заготівка подається в прокатний стан під дією подає колеса. Подає колесо автоматично піднімається, коли лита заготівка входить в канал між роликками і на цьому подача подає пристроєм закінчується.

Таблиця 1.8 - Прокатний стан

| Характеристики | Чисельне значення |
|--|-------------------|
| Вихідний діаметр катанки, мм | 9,5 |
| Кількість прокатних клітей, комплектів | 15 |
| Номінальний розмір прокатного ролика, мм | 255 |
| Передавальне відношення між клітями | 1: 1.25 |
| Кінцева швидкість, м / с | 6.2 |
| Висота осі прокатки, мм | 852.5 |

Продовження таблиці 1.8

| | |
|---|--------------|
| Потужність головного двигуна постійного струму, кВт | 400 |
| Система масляного змащення | |
| Об'єм ємності мастила, м ³ | 3.5 |
| Масляний насос типу ZCY-18m ³ / 0.36 | |
| - кількість штук | 2 |
| - максимальна продуктивність, м ³ / год | 18 |
| - робочий тиск, МПа | 0,35 |
| - потужність електродвигуна типу У132М2, кВт | 5,5 x 2 = 11 |
| Температура масла, °С, не більше | ≤ 45 |
| Система змащення і охолодження клітей прокатного стану | |
| Тип системи | емульсійна |
| Емульсійний насос типу IS100-65-200 (один насос працює на себе) | |
| - кількість штук | 2 |
| - максимальна продуктивність, м ³ / год | 100 |
| - робочий тиск, МПа | 0.3 - 0.5 |
| - потужність електродвигуна типу У182М, кВт | 2 x 22 = 44 |
| Температура емульсії, °С | 15 - 45 |

Прокатний стан складається з клітей трьох - валкового типу. Система чергування профілів канавок валків: коло → трикутник → коло. Привід від основного двигуна до редукторному блоку здійснюється через муфту. Кожне приводне з'єднання редукторного блоку і кліті забезпечено запобіжною муфтою із запобіжним стопорним штифтом для запобігання поломки при перевантаженні. Кожна кліть має вхідний і вихідний направляючий пристрій. Вхідний направляючий пристрій на непарних клітях є обертовим. Вихідна і вхідна направляючий пристрій на непарних клітях працює на ковзанні. Валки кожної кліті можуть налаштовуватися половинчастими прокладками різної товщини. Діапазон настройки від 0,1 до 1,00 мм. Налаштування канавки здійснюється спеціальним калібром - пробкою.

Відповідно до нульовими технічними вимогами для кожної канавки контрольний калібр повинен проходити, але, якщо калібр більше контрольного калібру на 0,1 мм, то даний калібр проходити не повинен. Зазор між роликами 0.866 ± 0.10 мм.

Система змащення застосовується для змащення між приводними шестернями коробки передач і валами клітей. Змазує масло з масляної ємності заходить в трубу на задній стороні коробки передач, розгалужується по трьом трубопроводам, потім розпорошується через сопла відгалуження масляного насоса, змащує роликовий вал безпосередньо через вигнуту мідну трубу і масляне отвір, яке знаходиться у верхній частині планшайби.

Таблиця 1.9 - Пристрій гартування та охолодження

| Характеристики | Чисельне значення |
|---|-------------------|
| Кількість охолоджуючих ділянок гарту, комплектів | 6 |
| Розрахунковий витрата охолоджуючої води, м ³ / год | 60 |
| Тиск охолоджувальної води, МПа | 0.2 ... 0.5 |
| Температура охолоджуючої води, °С | 15 ... 45 |
| Вимоги до охолоджувальної воді: | |
| Водневий показник рН | 7 - 8 |
| зміст СаО, РРМ | 20 ... 50 |
| Розмір частки забруднення, мм, не більше | 0.8 |

Пристрій гартування та охолодження має функції гартування та охолодження.

Пристрій осушення встановлено на виході приймаючої труби для видалення води з поверхні алюмінієвої катанки.

Таблиця 1.10 - Здвоєний Бухтовщик кошикового типу

| Характеристики | Чисельне значення |
|--------------------------------------|-------------------|
| Максимальна лінійна швидкість, м / с | 6.94 |

Продовження таблиці 1.10

| | |
|--|----------------------|
| Потужність електродвигуна з частотним перетворювачем зажимного тягне пристрою, кВт | 5.5 |
| Розміри бухти, мм | Ø 1800 × висота 1300 |
| Потужність електродвигуна приводу з частотним перетворювачем пристрою освіти кілець, кВт | 4.0 |
| Розміри кошика, мм | Ø 2000 × висота 1800 |
| Вага бухти, кг | 1500 |

Здвоєний Бухтовщик кошикового типу складається з робочої платформи, напрямних роликів, затискного тягне пристрою, пристрої освіти кілець, пристрої намотування катанки.

Робоча платформа складається з власне платформи і сходів. Робоча платформа використовується для монтажу пристрою гартування та охолодження, роликового направляючого пристрою, затискного тягне пристрою, пристрою для формування кілець. Сходи використовуються для роботи і обслуговування

Роликове направляючий пристрій утворює дугу радіусом 1000 мм, що складається з 32-х роликів. Функцією роликового направляючого пристрою є зниження пошкодження поверхні катанки при перегині.

Затискне тяговий пристрій включає два затискають тягнуть ролика. Електродвигун змінного струму з частотним приводом призводить правий затискає ролик, співвісно з яким встановлено зубчасте колесо, що приводить зубчасте колесо, співвісно встановлений з лівим затискають роликом. Швидкість зажимного пристрою регулюється частотним приводом електродвигуна.

Пристрій освіти кілець включає черв'ячний мотор-редуктор, який через муфту здійснює освіту кілець катанки. Налаштуванням швидкості обертання електродвигуна можливо змінювати діаметр кілець. Швидкість обертання налаштовується вручну. Зазвичай швидкість не змінюється і встановлюється

після ходових випробувань. Шлях кільця з одного боку обертальний, катанка деформується перед входом в приймальню кошик, з іншого боку, якщо катанка обірветься в процесі прокатки, хвіст катанки потрапить в корзину автоматично. Зовні головки освіти кілець є чотири накопичувальних зубця. При зміні бухти, пневматично наведені накопичувальні зубці переводяться в горизонтальне положення і накопичують катанку на барабані головки для освіти кілець, перешкоджаючи скидання кілець катанки в кошик. Коли зміна бухти закінчена, накопичувальні зубці пневматично повертаються у вертикальне положення, йдучи своїми площинами за площину барабана головки для освіти кілець, і дозволяють накопиченим кільцям катанки впасти в кошик.

Накопичувальне пристрій може рухати візок з кошиком при зміні бухти щоб уникнути неправильної намотування і досягнення безперервності процесу.

Пристрій намотування катанки включає два візки на рейковому шляху

Висновок

1. Розглянуто історію розвитку та шлях вдосконалення ливарно-прокатного агрегату;
2. Розглянуто характеристики агрегату для безперервного лиття та прокатки з алюмінію та алюмінієвих сплавів типу LY-1600.

Розділ 2 Дослідження швидкісного режиму роботи ливарно-прокатного агрегату

2.1 Дослідження швидкості заготовки на виході з ливарного колеса

При виробництві катанки розплавлений алюміній подається в кільцеву мідну виливницю. На ділянці АС метал та виливниця піддаються водяному охолодженню рис.2.1.

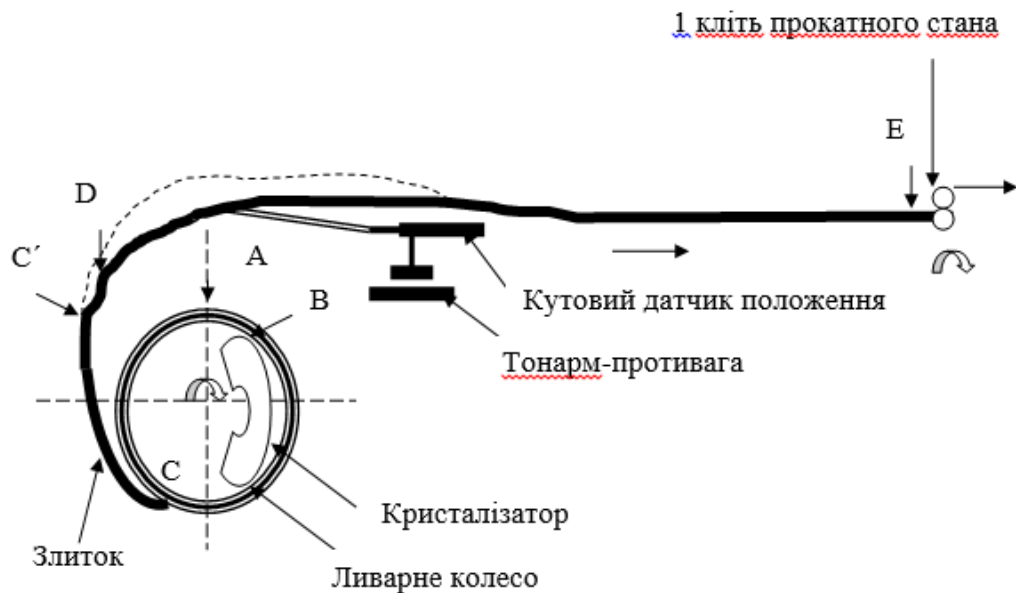


Рисунок 2.1 – Схема формування алюмінієвої заготовки під час лиття

При цьому інтенсивність охолодження зростає від точки А до точки В [9]. Пов'язано це з необхідністю форсування процесу кристалізації розплавленого алюмінію, що забезпечує початок утворення твердого кристалічного скелета виливки за нормальної температури близько 600°C в т.В. Дослідженнями [10] встановлено з цього моменту в злиток можна розглядати як тверде тіло та оцінювати у ньому величину температурних деформацій.

Після т.В інтенсивність подачі води зменшується і припиняється в т.С, де сформована заготовка відокремлюється від виливниці. Пояснюється це тим, що у т.В закінчується рідка фаза і починається тверда, яка потребує нових умов охолодження. При цьому в т.С кристалізується близько 90-95% металу.

Швидкість кристалізації при литті згідно [11] визначається відведенням тепла від фронту кристалізації і визначається як:

$$V_{\text{к.}} = \frac{4\lambda(t_{\text{м}} - t_{\text{вил}})}{I\gamma R} \frac{\text{см}}{\text{сек}}, \quad (2.1)$$

де $V_{\text{к.}}$ - швидкість кристалізації металу; λ - коефіцієнт теплопровідності; $t_{\text{м}}$ - температура поверхні металу; $t_{\text{вил}}$ - температура поверхні виливниці; I - тепловміст; γ - Питома вага металу; R - радіус одержуваного при литті зливка.

З рівняння (2.1) видно, що за інших рівних умовах швидкість кристалізації металу залежить від різниці температур металу та виливниці, яка характеризує собою надлишкову температуру зливка в будь-якій його точці при охолодженні.

$$\theta = t_{\text{м}} - t_{\text{вил}}, \quad (2.2)$$

де θ - надлишкова температура зливка в будь-якій його точці.

Існуюча температурна нестабільність при формуванні зливка в ливарній машині призводить до температурних подовжень, які відновлюються за один цикл лиття і не відновлюються, накопичуючись від циклу до циклу, утворюючи петлю заготовки.

Вимірювання температури металу показали, що на вході ливарної машини температура становить $700 \pm 10^\circ\text{C}$. Після точки С, коли дія водяного кристалізатора закінчується, температура поверхні заготовки при

оптимальному теплообміну металу з виливницею становить близько 300°C і досягає 450°C після завершення процесу кристалізації в т. Д.

Одержувану в результаті процесу безперервного лиття заготовлю довжиною L_c , можна подати у вигляді суми мірних відрізків, кожен з яких утворюється в результаті одного циклу лиття. При цьому кожен відрізок суми складається з базового розміру L_6 , який відповідає температурі металу на вході і виході ливарної машини, відповідно 600°C і 450°C , а також температурної деформації першого $\Delta L_{д1}$ і третього $\Delta L_{д3}$ роду, що утворюються внаслідок порушення теплообміну між металом і виливницею:

$$L_c = \sum_1^n L_6 + \Delta L_{д1} + \Delta L_{д3}, \quad (2.3)$$

де L_c -довжина ливарної заготовки; L_6 -базова довжина зливка при температурі 450°C ; n -кількість циклів лиття з тривалістю одиничного циклу рівним τ .

Виконані розрахунки показали, що за 8 циклів лиття довжина заготовки при зростанні температури злитка в т.С на 40°C збільшується на $0,031\text{ м}$.

Для підтвердження отриманих даних на лінії з виробництва алюмінієвої катанки при сталості швидкостей електроприводів ливарної машини та прокатного стану, за допомогою інформаційно-вимірювальної системи [12] фіксувалися показання датчика просторового положення тонарма, відкаліброваного в одиницях відносного подовження злитка.

До кінця восьмого циклу лиття збільшення довжини заготовки становить $0,033\text{ м}$, що практично збігається з розрахунковими даними.

Швидкість злитка на виході з виливниці $V_{зл}$ визначається не тільки швидкістю руху ливарного колеса $V_{лк}$, а й швидкістю усадки $V_{ус}$:

$$V_{зл} = V_{лк} - V_{ус} \quad (2.4)$$

Якщо швидкість усадки металу уявити як:

$$V_{yc} = \frac{\Delta l}{t}, \quad (2.5)$$

де $\Delta l = l \cdot c \cdot (T_1 - T_2)$ - величина усадки металу на ділянці l ливарного колеса від місця початку кристалізації алюмінію до точки виходу зливка із виливниці; c – температурний коефіцієнт лінійного розширення; T_1 – температура початку кристалізації алюмінію; T_2 - температура зливка на виході з виливниці; t – час обороту ливарного колеса на кут, обмежений температурними точками.

Тоді рівняння швидкості зливка на виході з ливарного колеса (2.4) набуде вигляду:

$$V_{зл} = V_{лк} - \frac{l \cdot c \cdot (T_1 - T_2)}{t} = V_{лк} [1 - c(T_1 - T_2)], \quad (2.6)$$

де $\frac{l}{t} = V_{лк}$ – швидкість ливарного колеса.

Проведено дослідження залежності швидкості заготовки на виході з ливарно колеса від різниці температур, які представлені у табл. 2.1, на рис. 2.2.

Таблиця 2.1 - Дані для розрахунку швидкості зливка на виході з ливарного колеса

| V _{лк} | c | T ₁ -T ₂ | V _{зл} |
|-----------------|----------|--------------------------------|-----------------|
| 0,241 | 0,000027 | 16 | 0,239959 |
| 0,241 | 0,000027 | 17 | 0,239894 |
| 0,241 | 0,000027 | 18 | 0,239829 |
| 0,241 | 0,000027 | 24 | 0,239438 |
| 0,241 | 0,000027 | 25 | 0,239373 |
| 0,241 | 0,000027 | 26 | 0,239308 |
| 0,241 | 0,000027 | 34 | 0,238788 |
| 0,241 | 0,000027 | 35 | 0,238723 |
| 0,241 | 0,000027 | 36 | 0,238657 |

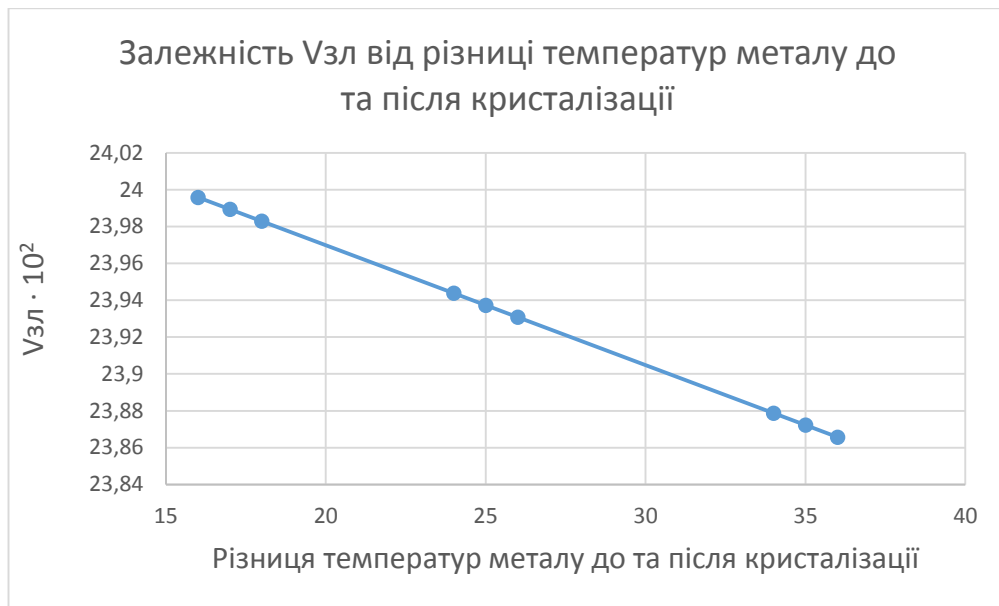


Рисунок 2.2 - Залежність швидкості зливання від різниці температур

З даного графіку можна зробити висновок, що швидкість зливання на виході з ливарного колеса, залежить від різниці температур (температури початку кристалізації алюмінію та температури зливання на виході з виливниці). Чим менше різниця (більше температура зливання на виході з виливниці), тим більша буде швидкість зливання.

2.2 Дослідження швидкості заготовки на вході в прокатний стан

У процесі прокатки відбувається обтискання заготовки валками табору. В результаті частина металу вичавлюється по ходу руху, створюючи зону випередження, а інша частина - у протилежний бік, формуючи зону відставання [13,14].

Теоретично прокатки основну увагу приділяється дослідженню випередження, у зв'язку з тим, що експериментально і аналітично воно визначається простіше і найчастіше використовується на вирішення практичних завдань, що з досить точним визначенням швидкості виходу металу з валків [13,14].

У той же час при вдосконаленні керування роботою ливарно-прокатного модуля (ЛПМ) з виробництва алюмінієвої катанки значний інтерес викликає дослідження відставання металу в осередку деформації та вплив його на процес формування заготівлі, довжину якої необхідно підтримувати на заданому значенні.

При обтисканні смуги валками стану на ділянці 1, що дорівнює довжині вогнища деформації, рис.2.3, смуга деформується і через час t набуває у вертикальному перерізі форму близьку до усіченого конуса. Через час $2t$ валки повернуться на подвійний кут захоплення α і повністю прокатають метал на цій ділянці.

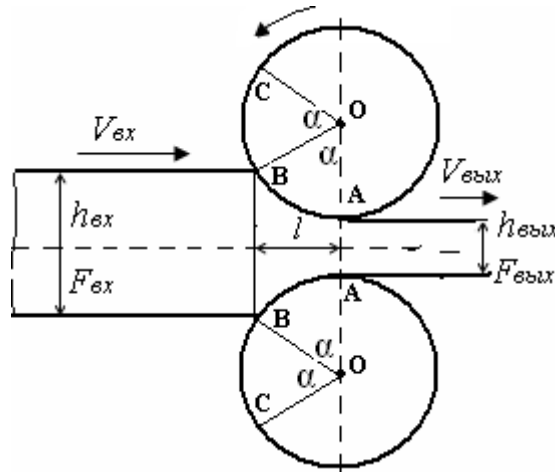


Рисунок 2.3 – Осередок деформації при прокатці смуги

При цьому смуга на виході з валків матиме більший розмір за рахунок видавленого металу в зону випередження на величину Δl_{on} :

$$\Delta l_{on} = \frac{M_{on}}{F_{вих}}, \quad (2.7)$$

та в зону відставання на величину Δl_{om} :

$$\Delta l_{om} = \frac{M_{om}}{F_{вх}} = \frac{M - M_{on}}{F_{вх}}, \quad (2.8)$$

де M_{on} і M_{om} – обсяги видавленого металу в зону випередження та зону відставання; $M = l(F_{вх} - F_{вих})$ - сумарний обсяг видавленого металу з ділянки смуги довжиною l ; $F_{вх}$ та $F_{вих}$ – відповідно, переріз смуги перед валками та на виході з них.

Вирішуючи спільно рівняння (2.7) і (2.8) щодо Δl_{om} , отримаємо величину подовження смуги у бік зони відставання:

$$\Delta l_{om} = \frac{l \cdot \Delta F - \Delta l_{on} \cdot F_{вих}}{F_{вх}}. \quad (2.9)$$

Швидкість, з якою відбувається це подовження дорівнюватиме:

$$V_{om} = \frac{\Delta l_{om}}{2t_1}, \quad (2.10)$$

а швидкість подовження смуги в зоні випередження становитиме:

$$V_{on} = \frac{\Delta l_{on}}{2t_2}. \quad (2.11)$$

Тоді результуючі швидкості металу, що прокочується на вході $V_{вх}$ і виході $V_{вих}$ першої кліті, з урахуванням швидкості валків V_v , можна визначити за рівняннями:

$$V_{вх} = V_v \cos \alpha - \frac{\Delta l_{om}}{2t_1}; \quad (2.12)$$

$$V_{вих} = V_v + \frac{\Delta l_{on}}{2t_2}, \quad (2.13)$$

де $V_B \cdot \cos \alpha$ - горизонтальна проекція швидкості валків у перерізі входу, $2t_1 = l/V_B \cdot \cos \alpha$ - час витяжки заготовки довжиною l у бік відставання при її прокатці; $2t_2 = l/V_B$ - час витяжки заготовки довжиною l у бік випередження під час її прокатці.

Якщо на валку подумки зробити кернові позначки в точках А і В і прокатати ділянку смуги довжиною l , то відповідно до [13] випередження можна обчислити за формулою:

$$S_{on} = \frac{l_n - l_B}{l_B}, \quad (2.14)$$

де $l_n = l + \Delta l_{on}$ - довжина смуги обмежена керновими відмітками після прокатки заготовки довжиною $l = R \sin \alpha$; $l_B = \pi R / 180$ - довжина кола валка, яка брала участь у прокатці смуги завдовжки l ; $\alpha \approx 57,3 \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$ - кут захоплення смуги валками; $\Delta h = h_{вх} - h_{вих}$ - величина абсолютного обтиснення; $h_{вх}$ та $h_{вих}$ - висота смуги, відповідно, перед валками та після них; R - радіус валків.

З урахуванням наведених виразів, формула (2.14) набуде вигляду:

$$S_{on} = \frac{l + \Delta l_{on}}{R \sqrt{\Delta h / R}} - 1 \quad (2.15)$$

Відомо [13], що найпростішою та зручною для розрахунку величини випередження є формула Головіна-Дрездена:

$$S_{on} = \gamma^2 \frac{R}{h_{вих}} \quad (2.16)$$

Зважаючи на те, що значення нейтрального кута γ пов'язане з величиною коефіцієнта тертя β та кутом захоплення α рівнянням [13]:

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta}\right) \quad (2.17)$$

Формулу Головіна-Дрездена можна представити у вигляді:

$$S_{on} = \frac{R\alpha^2}{4h_{вих}} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta}\right)^2. \quad (2.18)$$

Підставляючи цей вираз у відому формулу відставання, отримаємо:

$$S_{om} = 1 - \frac{1 + S_{on}}{\lambda \cdot \cos\alpha} = 1 - \frac{1}{h_{вих} \cdot \cos\alpha} \left[h_{вих} + \frac{R\alpha^2}{4} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta}\right)^2 \right]. \quad (2.19)$$

Прирівнюючи праві частини виразів (2.15) і (2.18) отримаємо рівняння для визначення величини подовження у бік зони випередження при прокатці заготовки:

$$\Delta l_{on} = \frac{R^2\alpha^3}{4h_{вих}} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta}\right)^2 + R\alpha - R\sin\alpha. \quad (2.20)$$

З урахуванням того, що $\alpha \approx \sin\alpha$, справедливо записати:

$$\Delta l_{on} = \frac{R^2\alpha^3}{4h_{вих}} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta}\right)^2 = R \cdot \alpha \cdot S_{on}. \quad (2.21)$$

Вирішуючи це рівняння спільно з (2.9) та, враховуючи, що $\alpha \approx \sin\alpha$, отримаємо формулу для визначення величини подовження заготовки у бік зони відставання:

$$\Delta l_{om} = \frac{R\alpha}{h_{BX}} \left[\Delta h - \frac{R\alpha^2}{4} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right)^2 \right] = R\alpha \left(\frac{\Delta h}{h_{BX}} - \frac{S_{on}}{\lambda} \right). \quad (2.22)$$

Вирішуючи спільно рівняння (2.12) і (2.22) і, враховуючи, що $\alpha \approx \sin\alpha$, отримаємо вираз для розрахунку швидкості заготівлі на вході в стан:

$$V_{BX} = V_B \cos\alpha \left[1 - \frac{\Delta h}{h_{BX}} + \frac{R\alpha^2}{4h_{BX}} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right)^2 \right] = V_B \cos\alpha \left[1 - \frac{\Delta h}{h_{BX}} + \frac{S_{on}}{\lambda} \right]. \quad (2.23)$$

Щоб отримати рівняння швидкості заготівлі на виході з кліти, вирішимо спільно (2.13) та (2.21):

$$V_{ВИХ} = V_B \left[1 + \frac{R\alpha^2}{4h_{BX}} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right)^2 \right] = V_B (1 + S_{on}). \quad (2.24)$$

Як випливає з рівнянь (2.21) та (2.22) мінливість будь-якого геометричного чи фізичного фактора прокатки призводить до зміни величини подовження заготівлі. Щоб визначити ступінь впливу товщини заготівлі h_{BX} , радіусу валків R , кута захоплення α , натягу заготівлі та коефіцієнта тертя β на стабільність процесу виробництва катанки, було виконано дослідження отриманих рівнянь. Розраховано таблиці відносно коефіцієнта тертя β (табл.2.2) та відносно радіусу валків R і кута захоплення α (табл. 2.3).

Таблиця 2.2 – Залежність швидкості на вході до прокатного стану від коефіцієнта тертя β

| T | R | a | h _{вх} | Δh | V _в | B | V _{вх} |
|-----|-------|-------|-----------------|-----|----------------|----------|-----------------|
| 450 | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,123611 | 0,2390791030661 |
| | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,195031 | 0,2405093917334 |
| | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,241728 | 0,2413385129832 |
| 480 | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,116444 | 0,2389931162259 |
| | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,183722 | 0,2402821588252 |
| | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,227712 | 0,2411085801820 |
| 530 | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,104498 | 0,2389537676082 |
| | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,164875 | 0,2398864609705 |
| | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,204352 | 0,2406893073062 |

На основі отриманих даних побудовано графік (рис. 2.4).

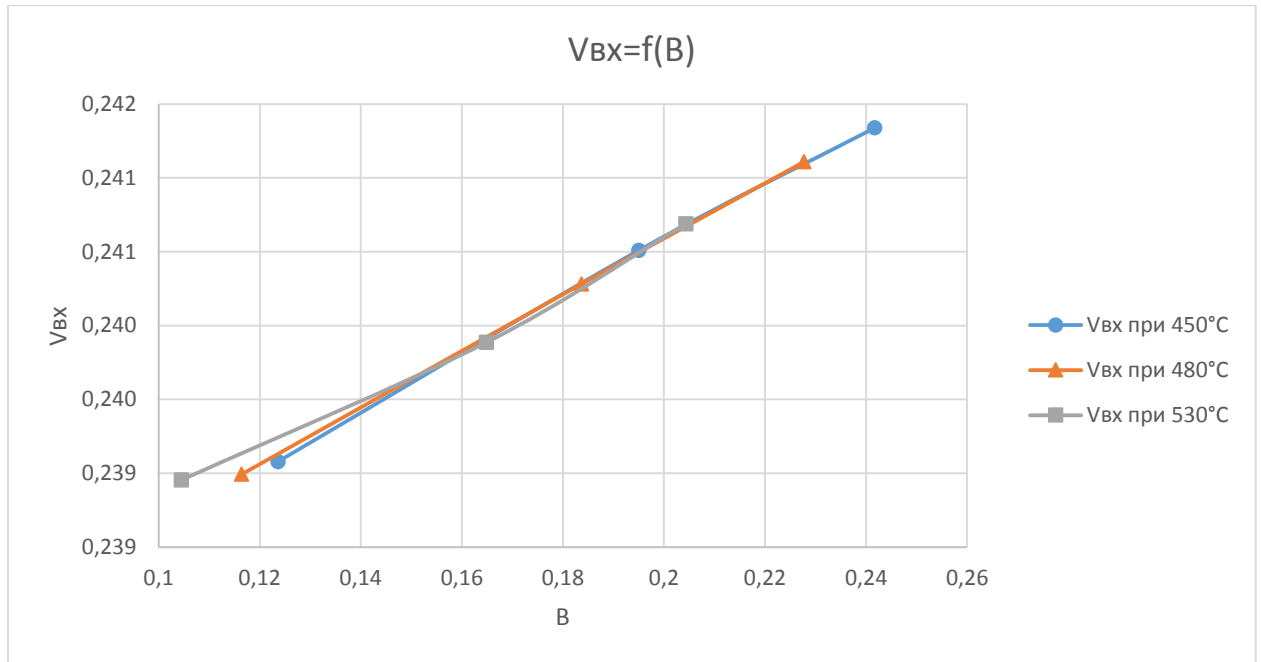


Рисунок 2.4 - Функціональна залежність $V_{BX}=f(\beta)$

На рис.2.4 представлено графік функціональної залежності $V_{BX}=f(\beta)$, на якому ми бачимо, що:

- при температурі 450°C: При зменшенні коефіцієнта тертя β на 3,662%, вихідна величина швидкості металу, що прокочується на вході V_{BX} зменшується на 0,059%. При збільшенні коефіцієнта тертя β на 2,394%, вихідна величина V_{BX} збільшується на 0,034%;

- при температурі 480°C: При зменшенні коефіцієнта тертя β на 3,662%, вихідна величина V_{BX} зменшується на 0,054%. При збільшенні коефіцієнта тертя β на 2,394%, вихідна величина V_{BX} збільшується на 0,034%;

- при температурі 530°C: При зменшенні коефіцієнта тертя β на 3,662%, вихідна величина V_{BX} зменшується на 0,039%. При збільшенні коефіцієнта тертя β на 2,394%, вихідна величина V_{BX} збільшується на 0,033%;

Отже, з отриманих даних можна зробити висновок, що величина швидкості металу, що прокочується на вході V_{BX} має пряму залежність від коефіцієнта тертя β , при кожній з температур.

Таблиця 2.3 - Залежність швидкості на вході до прокатного стану від радіусу валків R та кута захоплення α

| T | R | α | $h_{вх}$ | Δh | $V_{в}$ | B | $V_{вх}$ |
|-----|-------|----------|----------|------------|---------|----------|-----------------|
| 450 | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,195031 | 0,2405093917334 |
| | 126,8 | 0,2 | 51,3 | 5,2 | 0,27 | 0,195031 | 0,2442160591815 |
| | 126 | 0,187 | 51,3 | 4,4 | 0,27 | 0,195031 | 0,2484132939156 |
| 480 | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,183722 | 0,2402821588252 |
| | 126,8 | 0,2 | 51,3 | 5,2 | 0,27 | 0,183722 | 0,2440174522839 |
| | 126 | 0,187 | 51,3 | 4,4 | 0,27 | 0,183722 | 0,2482402226221 |
| 530 | 127,5 | 0,215 | 51,3 | 5,9 | 0,27 | 0,164875 | 0,2398864609705 |
| | 126,8 | 0,2 | 51,3 | 5,2 | 0,27 | 0,164875 | 0,2436648399510 |
| | 126 | 0,187 | 51,3 | 4,4 | 0,27 | 0,164875 | 0,2479285863332 |

На основі отриманих даних побудовано графік (рис. 2.5).

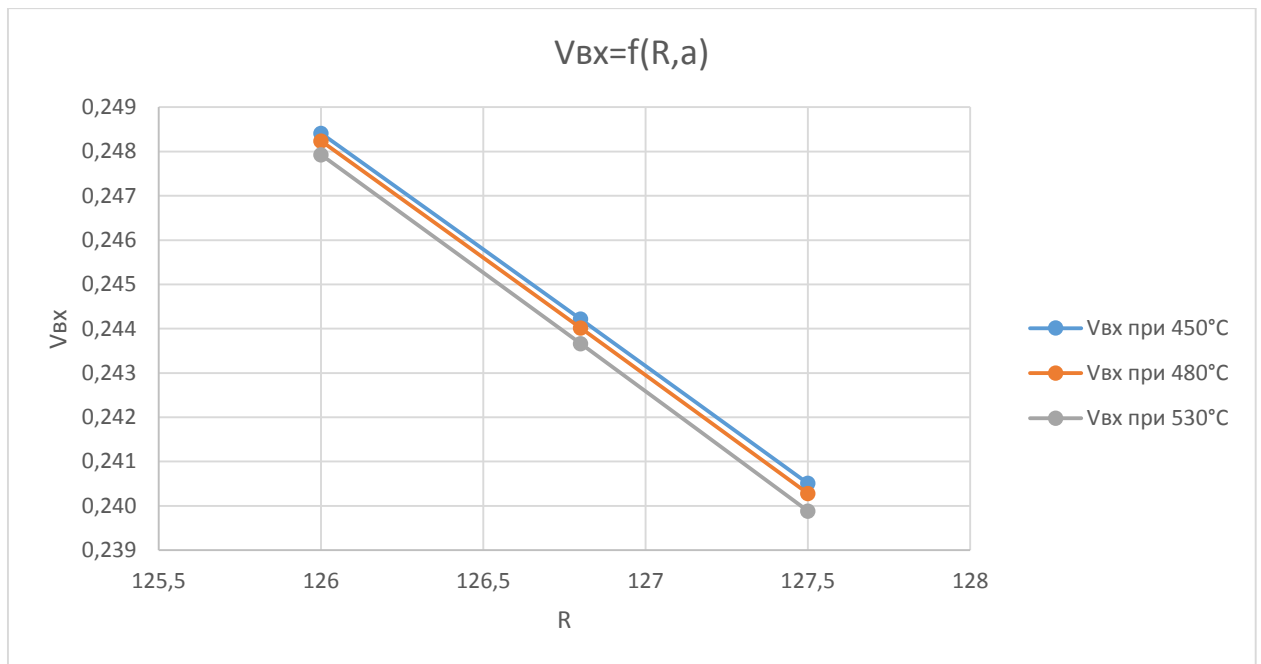


Рисунок 2.5 – Функціональна залежність $V_{вх}=f(R,a)$

На рис.2.5 представлено графік функціональної залежності $V_{вх}=f(R,a)$, на якому ми бачимо, що:

– при температурі 450°C: При зменшенні радіусу R на 0,55%, вихідна величина $V_{вх}$ збільшується на 1,54%, при зменшенні радіусу R на 1,18%, вихідна величина $V_{вх}$ збільшується на 3,29%;

– при температурі 480°C: При зменшенні радіусу R на 0,55%, вихідна величина $V_{\text{вх}}$ збільшується на 1,55%, при зменшенні радіусу R на 1,18%, вихідна величина $V_{\text{вх}}$ збільшується на 3,31%;

– при температурі 530°C: При зменшенні радіусу R на 0,55%, вихідна величина $V_{\text{вх}}$ збільшується на 1,57%, при зменшенні радіусу R на 1,18%, вихідна величина $V_{\text{вх}}$ збільшується на 3,35%;

Отже, з отриманих даних можна зробити висновок, що вихідна величина швидкості металу, що прокочується на вході $V_{\text{вх}}$ має зворотньо-пропорційну залежність від радіусу R.

З отриманих даних робимо висновок, що на вихідну величину швидкості металу, що прокочується на вході $V_{\text{вх}}$ більше впливає радіус валків R та кута захоплення α , ніж коефіцієнт тертя β .

Чим менше радіус валків, тим більша швидкість металу на вході до прокатного стану.

2.3 Дослідження впливу швидкості заготовки на виході з ливарного колеса та вході у прокатний стан на величину заготовки перед її прокаткою

Дослідженнями встановлено [15], що на формування довжини алюмінієвої заготовки суттєво впливає температурне скорочення металу (усадка) ΔL_1 , яке відбувається в результаті його охолодження у виливниці ливарного колеса:

$$\Delta L_1 = k \cdot L_0 \cdot c_1 (T_c - T_A), \quad (2.25)$$

де $L_0 = V_L \cdot \Delta t$ – базова довжина отриманого зливка за цикл лиття; V_L – лінійна швидкість заготовки на виході з ливарного колеса; c_1 – коефіцієнт температурного подовження алюмінію; T_c – температура зливка на виході з

ливарного колеса; T_A – температура металу на вході в ливарне колесо; k – кількість циклів лиття; Δt – цикл лиття.

В наслідок температурної нестабільності при формуванні зливка у ливарному колесі величина усадки змінюється. Так, при збільшенні температурного градієнта на 40 °С базова довжина заготовки, яка формується протягом 8 циклів лиття збільшується на 0,04м.

Відомо також, що при зміні коефіцієнта витяжки прокатного стана, який залежить від поверхні валків і стану катаючих клітей змінюється швидкість руху заготовки на вході в стан [16]. Тоді при незмінній швидкості ливарного колеса довжина заготовки за час її руху до прокатного стана, змінюється на величину:

$$\Delta L_2 = (V_{\text{л}} - V_{\text{вх}}) \cdot k \Delta t = \left(V_{\text{л}} - \frac{\pi d^2 c_2 n}{4 Q_{\text{вх}}} \right) \cdot k \Delta t, \quad (2.26)$$

де $V_{\text{вх}} = V_{\text{вих}} \frac{Q_{\text{вих}}}{Q_{\text{вх}}} = \frac{V_{\text{вих}}}{\lambda}$ – швидкість заготовки на вході в прокатний стан;

$V_{\text{вих}} = c_2 n$ – швидкість катанки на виході з прокатного стана; $Q_{\text{вх}}$ – перетин заготовки на вході в прокатний стан; $Q_{\text{вих}}$ – перетин катанки на виході з

прокатного стана; $\lambda = \frac{Q_{\text{вх}}}{Q_{\text{вих}}} = \frac{4 Q_{\text{вх}}}{\pi d^2}$ – коефіцієнт витяжки прокатного стана; d

– діаметр катанки; c_2 – коефіцієнт передачі швидкості прокатного стана; n – швидкість обертання електропривода.

На реальному об'єкті при коливаннях коефіцієнта витяжки від 17,1 до 16,1 приріст довжини алюмінієвої заготовки ΔL_2 за час її руху від ливарного колеса до прокатного стана складає від 0,06м до 0,6м.

Таким чином, виходячи з особливостей роботи об'єкта керування та результатів досліджень, довжину заготовки можна визначити рівнянням:

$$L = L_{\text{заг}} + \Delta L_1 + \Delta L_2, \quad (2.27)$$

де $L_{\text{заг}}=16,8\text{м}$ – базова довжина алюмінієвої заготовки між ливарним колесом і прокатним станом.

З урахуванням 2.25 і 2.26, математична модель довжини заготовки на ливарно-прокатному модулі отримує вигляд:

$$L = L_{\text{заг}} + \left(V_{\text{л}} \cdot c_1 (T_c - T_A) + V_{\text{л}} - \frac{\pi d^2 c_2 n}{4 Q_{\text{вх}}} \right) \cdot k \Delta t \quad (2.28)$$

Вираз у дужках цього рівняння визначається нестабільністю роботи ливарного колеса й прокатного стана, а тому характеризує величину прирощення заготовки ΔL під впливом збурень, діючих в ЛПМ.

На основі отриманих формул розраховано залежність величини прирощення заготовки ΔL від радіусу валків R та кута захоплення α (рис. 2.6).

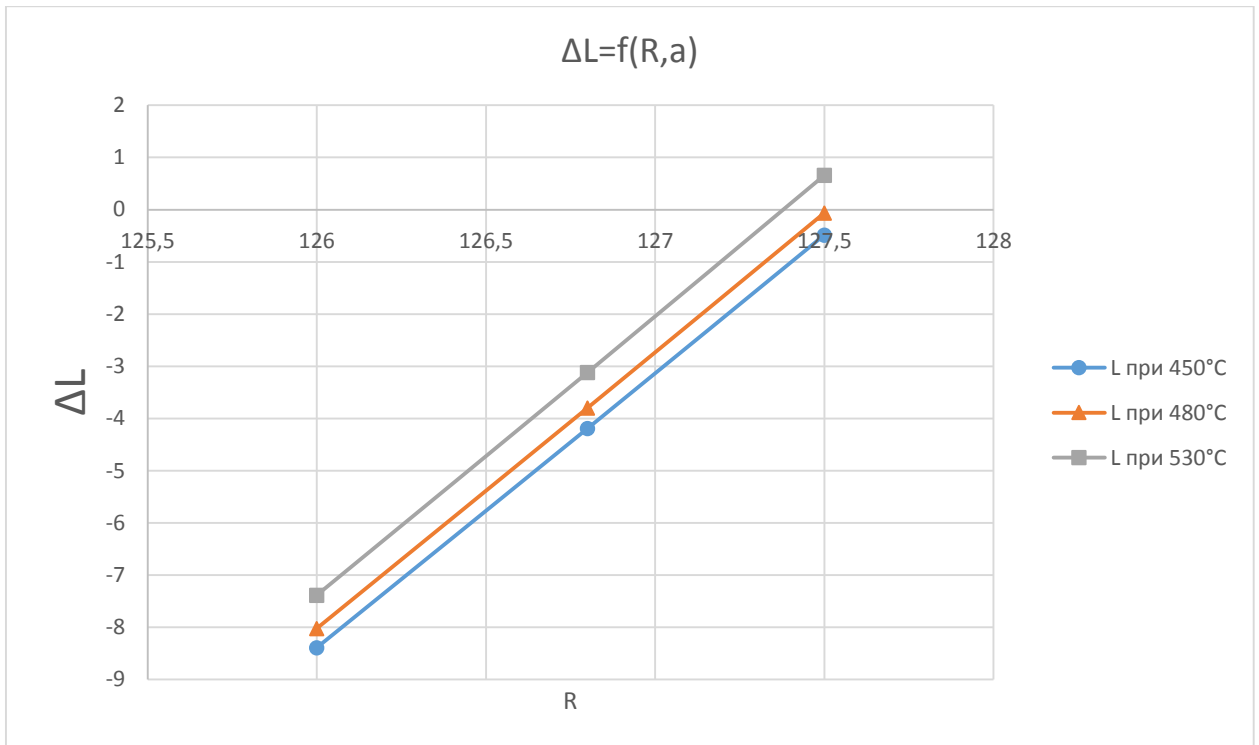


Рисунок 2.6 - Функціональна залежність $\Delta L=f(R,a)$

На графіку видно, що залежність величини прирощення заготовки ΔL від радіусу валків R та кута захоплення α є проміжно-пропорційною.

Висновок

1. Досліджено швидкість заготовки на виході з ливарного колеса, виведено формулу швидкості злитка на виході з ливарного колеса, по ній проведено розрахунок та побудовано графік. Швидкість злитка на пряму залежить від температури злитка на виході з ливарного колеса.

2. Досліджено швидкості заготовки на вході до прокатного стану, виведено формулу швидкості злитка, по ній проведено розрахунок та побудовано графік. На швидкість заготовки більше впливає радіус валків та кут захоплення, ніж коефіцієнт тертя.

3. Досліджено вплив швидкості заготовки на виході з ливарного колеса та на вході до прокатного стану на величину заготовки перед її прокаткою, приведені розрахунки та побудовано графік.

4. Виведена залежність величини прирощення заготовки ΔL від радіусу валків R та кута захоплення α .

Розділ 3 Дослідження температурного режиму при прокатці заготовки у прокатному стані

3.1 Математичне моделювання змінення температури заготовки при її прокатці

Важливою технічною характеристикою прокатного стану, яка значною мірою впливає на якість алюмінієвої катанки та продуктивність ливарно-прокатного агрегату, є температурний режим прокатки. Рівень енергетичних ресурсів, що витрачається на деформування металу в валках, також залежить від характеру зміни температури металу за довжиною неперервного стану. Тому, аби катанка отримала належні властивості, а прокатний стан працював економічно, температурний режим прокатки має бути оптимізовано під ці умови.

Протягом гарячої прокатки температура металу змінюється внаслідок теплового випромінювання, конвективного теплообміну до навколишнього середовища, теплопровідності (валкам), а також під впливом теплоти, що виділяється в процесі пластичної деформації та примусового охолодження валків емульсією [17]. Оскільки температура заготовки під час гарячої прокатки суттєво впливає на опір деформації, пластичність металу, його структуру та механічні властивості [18], виникає необхідність керування нею. Тому проведені дослідження температурного режиму прокатки без урахування останньої складової теплового балансу, аби на підставі отриманих результатів визначитися з алгоритмом примусового охолодження штаби рідиною. Дослідження виконано за допомогою формули, яку отримано внаслідок розв'язання теплового балансу та використовують для розрахунків змінювання температури алюмінієвої штаби під час прокатки на реверсивному стані [19]:

$$\Delta T_i = F(T_{i-1}) \cdot \frac{2\tau_i}{h_i} + 56f(5,23\delta \cdot \tau_i) \cdot (T_{i-1} - T_p) \cdot \frac{(R \cdot \Delta h)^{0,5}}{h_i \cdot \omega_i \cdot R} - 4,7 \ln \lambda_i \cdot \frac{K_i}{10}, \quad (3.1)$$

де ΔT_i – змінювання температури штаби між клітями, К; $\Delta T_i = T_i - T_{i-1}$, T_i , T_{i-1} – температура металу перед і після прокатки в i -тій кліті, К; $F(T_{i-1})$ – функція, яку визначають з відповідного графіка довідника; $f(5,23\delta\tau_i)$ – функція Іванцова, що знаходять зі спеціальної таблиці довідника; τ_i – час проходження штаби між клітями, с; h_i – товщина штаби після прокатки в i -тій кліті, мм; δ_τ – час контакту штаби з валками, с, $\delta_\tau = (R \cdot \Delta h)^{0,5} / (\omega_i \cdot R)$; T_p – середня розрахована температура навколишнього середовища, К; R – радіус валків, мм; Δh – абсолютне обтиснення, мм; ω_c – кутова швидкість валків, с⁻¹; K_i – середній опір деформації, МПа; λ – коефіцієнт витяжки.

Розрахунок базових параметрів заготовки під час проходження клітей прокатного стана, виконували методом зведеної штаби, у якій площа поперечного перетину та ширина співпадають з такими самими параметрами заготовки [20]. Середній опір деформації технічного алюмінію визначали за методикою Хензеля-Шпіттеля [21].

Дослідження температурного режиму прокатки проводили для технічного алюмінію без примусового охолодження за температурою навколишнього середовища в клітках 50°C, базовою початковою температурою заготовки 450°C та збільшеною до 480°C, 530°C і 560°C.

Загальний вигляд розрахованих термограм, рис.3.1, показує, що при збільшенні початкової температури заготовки з 450°C до 560°C, тобто на 110°C, температури катанки на виході з прокатного стана, відповідно 332°C і 374°C, відрізняються лише на 42°C. При цьому основні змінювання температури штаби відбуваються на перших двох третинах прокатного стана. На цьому відрізку температури зменшуються за експонентами майже на третину. Так на графіку 1 – з 560°C до 374°C, а на графіку 4 – з 450°C до 322°C. Далі, після 10-ї кліті зміни температур значно уповільнюються і не виходять за межі 10°C.

Проміжні термограми 2 і 3 з початковими температурами 530°C і 480°C мають практично такий самий вигляд і розташовані майже паралельно графікам 1 і 4.

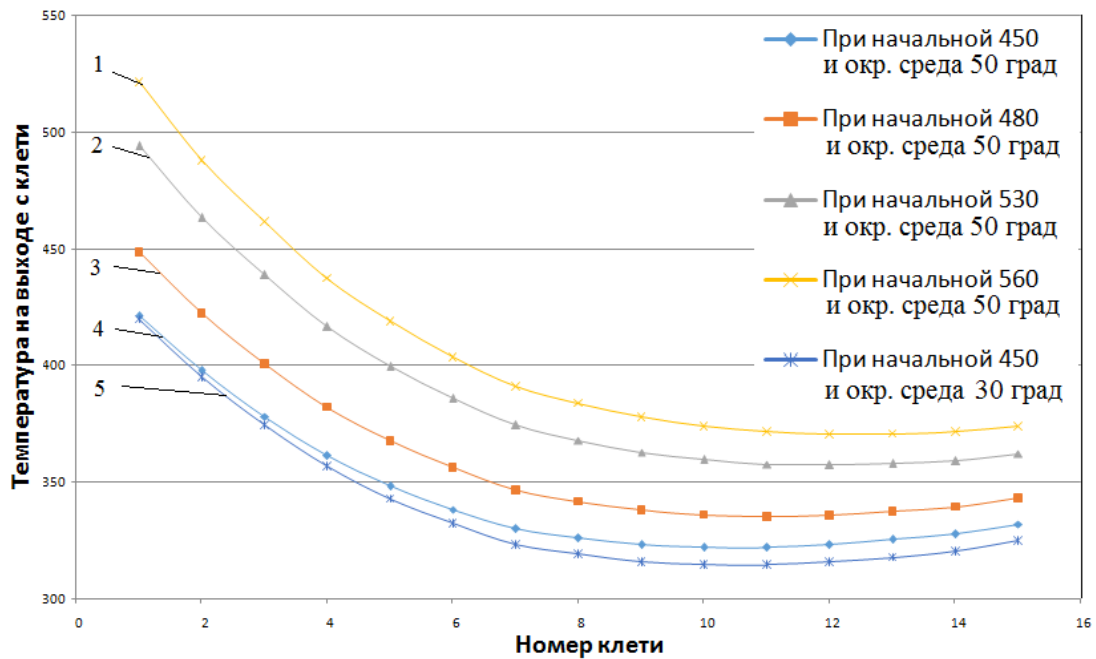


Рисунок 3.1– Термограми алюмінієвої заготовки у прокатному стані

Таблиця 3.1 - Термограми заготовок в прокатному стані за різними їх температурами перед прокаткою та температурами навколишнього середовища у кліті

| Номер кліти | За початковою температурою заготовки 450°C та температурою у кліті. 50°C | За початковою температурою заготовки 480°C та температурою у кліті. 50°C | За початковою температурою заготовки 530°C та температурою у кліті. 50°C | За початковою температурою заготовки 560°C та температурою у кліті. 50°C | За початковою температурою заготовки 450°C та температурою у кліті. 30°C |
|-------------|--|--|--|--|--|
| 1 | 421,1838288 | 448,5212185 | 494,2367336 | 521,6699503 | 419,7264511 |
| 2 | 397,7967773 | 422,2665138 | 463,3200977 | 488,0505976 | 394,9600733 |
| 3 | 378,1681304 | 400,8162298 | 438,7431331 | 461,5932713 | 374,3174887 |
| 4 | 361,4572172 | 382,0360232 | 416,5056382 | 437,3107769 | 356,6248409 |
| 5 | 348,3090354 | 367,5038247 | 399,6298621 | 418,9962109 | 342,7558313 |
| 6 | 338,2523814 | 355,9851941 | 385,7104124 | 403,6448473 | 332,0813088 |
| 7 | 329,7705819 | 346,3869981 | 374,2306312 | 391,0628916 | 323,1110638 |
| 8 | 326,0263661 | 341,6472803 | 367,8685297 | 383,7335966 | 319,0772741 |
| 9 | 322,9069448 | 337,7205849 | 362,6331632 | 377,7371624 | 315,7198788 |
| 10 | 321,9130471 | 335,9233063 | 359,5129364 | 373,8901204 | 314,5765693 |
| 11 | 321,7887779 | 335,1525634 | 357,6624121 | 371,4519147 | 314,3576119 |

Продовження таблиці 3.1

| | | | | | |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 12 | 323,0528161 | 335,7823354 | 357,2382672 | 370,4489003 | 315,5803814 |
| 13 | 325,1885819 | 337,3886204 | 357,9619511 | 370,6883296 | 317,7232299 |
| 14 | 327,6928877 | 339,3947445 | 359,1502084 | 371,4215882 | 320,2467928 |
| 15 | 331,9861911 | 343,17932 | 362,101233 | 373,9041896 | 324,6215691 |

Такий характер змінювання температури пояснюється тим, що на початковій стадії прокатки загальні втрати теплоти штабою суттєво перевищують кількість теплоти, що виділяється металом під час його деформування. При цьому більше 90% втрат теплоти відбувається за рахунок тепловіддавання валкам стана. За ходом прокатки втрата теплоти штабою зменшується внаслідок зменшення її контактної поверхні та збільшення швидкості руху, а прихід теплоти від зминання у валках збільшується, оскільки зниження температури металу потребує більших зусиль під час його деформування. Після 11-ої кліті кількість теплоти, що виділяється у процесі пластичної деформації штаби починає перевищувати втрати і температура катанки збільшується на виході з прокатного стана. Так, за прокатки заготовки з початковою температурою 450°C, температура збільшується на 10°C, з 322°C до 332°C, а з початковою температурою 560°C лише на 2,5°C, з 371,5°C до 374°C. Тобто температура штаби зростає тим більше, чим нижче початкова температура заготовки, але не перевищує 2,5%. Така різниця у змінах температур пояснюється тим, що за більш високою температурою спротив металу деформації в валках зменшується, а тому зменшується кількість теплоти, що виділяється металом.

Одночасно зі зміною температурного режиму заготовка при проходженні клітей пластично деформується і її структура поступово змінюється від поверхневих шарів до середині. Після десятої кліті штаба набуває однорідної структури за всім перерізом. Протягом прокатки зернистість структури неперервно подрібнюється і найбільш інтенсивніше це відбувається на останній стадії прокатки коли штаба має однорідну структуру, при цьому ступень подрібнення тим більше чим нижче температура заготовки [22].

Таким чином, дослідження показали, що температурний режим прокатного стана характеризується двома зонами, кожна з яких визначає умови формування властивостей катанки. У першій зоні, яка охоплює дві третини прокатного стана і відбувається деформування металу за високими температурами, формується однорідна структура штаби. У другій зоні, яка розповсюджується на останню третину прокатного стана і метал прокатується за заниженими температурами, штаба набуває механічних властивостей. Це означає, що при керуванні температурним режимом треба враховувати наявність цих зон і процеси, що в них відбуваються, тобто поєднувати протилежні підходи, щодо рівня температур, в одному технологічному об'єкті. Для розв'язання такої задачі, перш за все, потрібно мати інформацію про температуру на межі двох зон для будь-яких умов прокатки. Оскільки безпосереднє вимірювання цього параметру супроводжується певними складнощами, отримано розрахункову формулу температури штаби в 10-й кліті, яка використовує експериментальні дані дослідження температурного режиму в прокатному стані. Аналізуючи термограми з початковими температурами заготовки 450°C і 560°C (рис.3.1), було складено співвідношення різниць температур на вході у прокатний стан і в 10-й кліті:

$$\frac{110}{52} = \frac{\Delta T_{\text{заг}}}{\Delta T_{10}}$$

за допомогою якого отримана формула для розрахунку абсолютної температури штаби у 10-й кліті для заготовки з будь якою заданою температурою $T_{\text{заг}}$ перед прокатним станом і температурою навколишнього середовища 50°C:

$$T_{10} = T_{10}^{\text{баз}} + \Delta T_{10} = T_{10}^{\text{баз}} + 0,47\Delta T_{\text{заг}} = T_{10}^{\text{баз}} + 0,47(T_{\text{заг}} - 450), \quad (3.2)$$

де $\Delta T_{\text{заг}}$ – перевищення температури заготовки на вході у прокатний стан відносно базового значення 450°C ; ΔT_{10} – перевищення температури штаби у 10-й кліті для заготовки з будь якою заданою вхідною температурою $T_{\text{заг}}$, відносно заготовки з базовою початковою температурою 450°C ; $T_{10}^{\text{баз}}=322^{\circ}\text{C}$ – температура штаби у 10-й кліті для заготовки з базовими початковою температурою 450°C і температурою середовища в прокатній кліті 50°C .

Оскільки характер змінення термограми заготовки у прокатному стані залежить не тільки від її початкової температури, а і від температури навколишнього середовища у кліті прокатного стана, проведені додаткові температурні дослідження для заготовки з базовою початковою температурою 450°C . Результати досліджень, рис.3.1, показали, що за зменшенням температури навколишнього середовища у кліті прокатного стана з 50°C до 30°C траєкторія термограми 5 поступово знижується за довжиною прокатного стана. Причому на першій третині довжини прокатного стана, коли швидкість охолодження штаби найбільша, температури двох графіків відрізняються не суттєво. Проте відхилення після восьмої і до останньої 15-ї кліті залишаються майже незмінними в межах $(7 \dots 7,5)^{\circ}\text{C}$. Тобто після 8-ї кліті характеристика практично паралельно зміщується униз на температуру втричі меншою за падіння температури навколишнього середовища в кліті прокатного стана. Як наслідок температура штаби після 10-ї кліті за температурою навколишнього середовища 30°C дорівнює $314,6^{\circ}\text{C}$, у той час, як термограма, що розрахована за базовою температурою навколишнього середовища $T_{\text{сп}}=50^{\circ}\text{C}$ у тому самому місці має температуру 322°C . Це означає, що в формулі (3.2) базова температура штаби у 10-й кліті прокатного стана, яка дорівнює 322°C , змінюється залежно від температури навколишнього середовища в кліті прокатного стана. Якщо за характером зміни термограм 4 і 5 (рис 3.1), які отримані для заготовок з початковою температурою 450°C скласти пропорцію

між температурними градієнтами навколишнього середовища у кліті прокатного стана ($50 \dots 30$)°C і штаби після 10-ї кліті, ($322 \dots 314,6$)°C:

$$\frac{20}{7,4} = \frac{\Delta T_{cp}}{\Delta T_{10}},$$

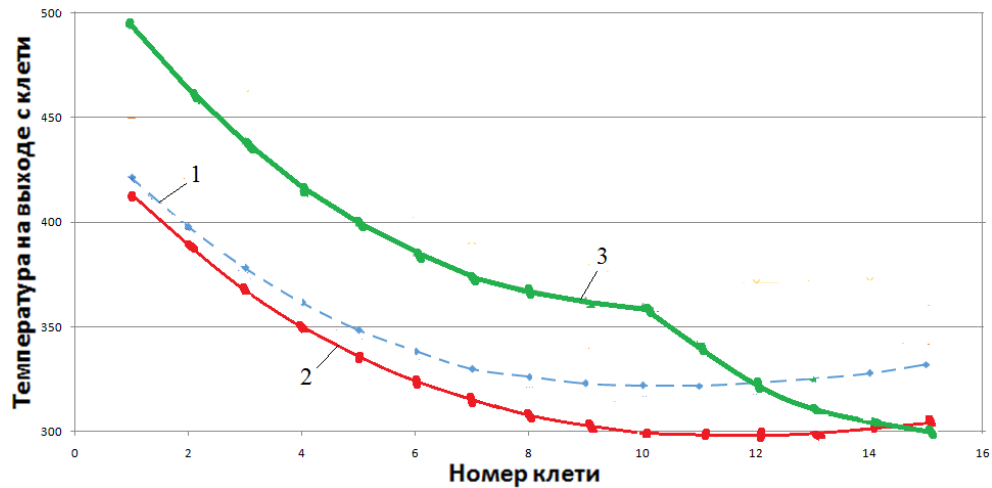
тоді на підставі приведеного співвідношення можна вивести розрахункову формулу базової температури штаби в 10-й кліті прокатного стана за будь-якою температурою навколишнього середовища T_{cp} :

$$T_{10}^{баз} = 322 + 0,37 \cdot \Delta T_{cp} = 322 + 0,37 \cdot (T_{cp} - 50) \quad (3.3)$$

Об'єднуючи вирази (3.2) і (3.3) отримаємо рівняння, за допомогою якого можна розрахувати температуру штаби у 10-й кліті T_{10} за будь-якими початковою температурою заготовки $T_{заг}$ і температурою навколишнього середовища T_{cp} у кліті прокатного стана:

$$T_{10} = 322 + 0,37(T_{cp} - 50) + 0,47(T_{заг} - 450) \quad (3.4)$$

За технологією на діючих ливарно-прокатних агрегатах здійснюється примусове охолодження валків емульсією. В результаті температура штаби, що розрахована без охолодження її рідиною, рис.3.2 крива 1, додатково зменшується за всією її довжиною так, аби катанка на виході прокатного стана мала температуру 300°C, рис.3.2, крива 2, і найкращі механічні властивості. Проте прокатка в умовах знижених температур збільшує час формування однорідної структури штаби і скорочує в прокатному стані частку шляху, де вона набуває механічні властивості. Окрім того деформування металу в валках за зниженими температурами потребує більших енергетичних витрат.



1 - Охолодження емульсією одночасно за всіма клітями; 2 – без охолодження рідиною; 3 – охолодження емульсією і додатково водою

Рисунок 3.2 – Термограми за різними способами охолодження штами

Підвищення початкової температури заготовки хоча і забезпечує економію енергоресурсів, проте висока температура в останніх клітях не сприяє одержанню штабою структури з дрібним металевим озерненням, а отже і необхідного ліміту міцності катанки – одного з важливіших показників якості. У зв'язку з цим для забезпечення більш економічної роботи прокатного стану і одержання необхідних механічних властивостей катанки, керування температурним режимом стану потрібно вести шляхом збільшення початкової температури заготовки до максимально можливої і зменшення температури штаби наприкінці прокатки до 300°C, рис.3.2, крива 3. Підвищення температури заготовки можна реалізувати за допомогою індукційної печі, що розташована перед прокатним станом, а зменшення температури наприкінці прокатки тільки за допомогою охолоджувальної емульсії. Щоб керування температурою за визначеними зонами (до та після 10-ї кліті) було незалежним, подача емульсії у кліті прокатного стану має відбуватися від окремих джерел. У першій незмінно за вимогами змащування контактуючих поверхонь і мінімально допустимого охолодження валків, а в іншій ще і з огляду на температуру штаби. Проте висока швидкість прокатки у кінці стану, невелика відстань між клітями і висока температура штаби на цій ділянці можуть

унеможливити зменшення температури катанки до заданого рівня тільки за рахунок витрати емульсії. Більш інтенсивне охолодження штаби на останній третині прокатного стана може бути забезпечено за рахунок використання додаткової витрати води у міжклітьовому просторі, мінімальне значення якої за початковою температурою заготовки, температурою навколишнього середовища у прокатному стані, розрахованою температурою штаби у 10-й кліті та температурою катанки на виході з прокатного стана можна визначити за допомогою формули [23]:

$$Q_{\text{вод}}^{\text{мін}} = \frac{3,6 \cdot F_{\text{ср}} \cdot V_{\text{ср}} \cdot \rho_{\text{ал}} \cdot C_{\text{ал}} (T_{10} - T_{\text{к}})}{C_{\text{в}} \cdot k \Delta T_{\text{вод}}^{\text{макс}}}, \quad (3.5)$$

де $F_{\text{ср}}$, $V_{\text{ср}}$ – середня площа перетину штаби та середня швидкість руху її в останній третині прокатного стана; $\rho_{\text{ал}}$, $C_{\text{ал}}$ – щільність і теплоємність технічного алюмінію при температурі 322°C; $T_{\text{к}}$ – задана температура катанки на виході з прокатного стана; $C_{\text{в}}$ – теплоємність води; $T_{\text{вод}}^{\text{макс}}$ – максимально допустимий розігрів охолоджувальної води, зазвичай 10°C; $k = 0,75 \dots 0,80$ – коефіцієнт ефективності охолодження, пов'язаний з втратами води.

3.2 Удосконалення способу керування температурою катанки на виході з прокатного стану

Базуючись на теорії представлений у розділі 3.1 можна реалізувати такий метод керування температурою катанки на виході з прокатного стану. Охолодження штаби в останній третині прокатного стана здійснювати тільки водою, а розраховану мінімально необхідну витрату її використовувати в якості уставки стабілізуючому регулятору, що змінює подачу води на міжклітьове охолодження наприкінці прокатки, і автоматично коригувати її за температурою катанки на виході прокатного стана, можна реалізувати каскадну систему автоматичного керування температурним режимом

прокатного стана за будь-якими заданими значеннями температур заготовки до та після прокатного стана.

Структурна схема каскадної системи автоматичного керування температурою катанки на виході з прокатного стана представлена на рис. 3.3.

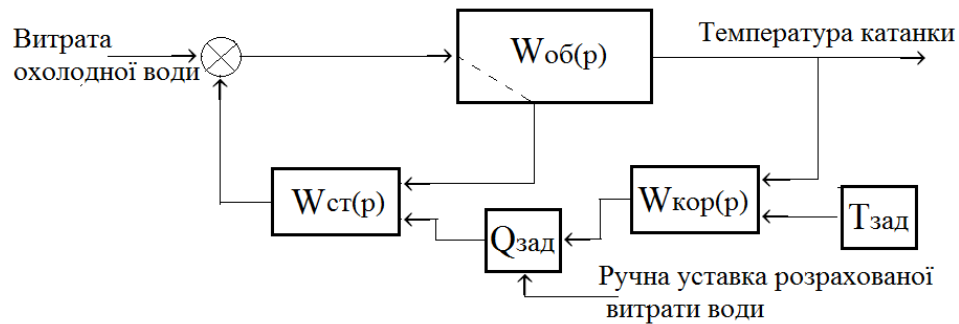


Рисунок 3.3 – Структурна схема каскадної системи автоматичного керування температурою катанки на виході з прокатного стана

Дослідження якості роботи запропонованої системи автоматизації виконано на електронній моделі, що створена у середовищі програмування промислових контролерів «UnityPro» корпорації «Schneider Electric». Інерційний об'єкт автоматизації (прокатний стан) апроксимований передавальною функцією $W_{об(p)} = \frac{K_{об} \cdot e^{\tau p}}{T_{об} \cdot p + 1}$, а його малоінерційна частина (кран витрати води) представлена у вигляді пропорційного звена $W''_{об(p)} = K''_{об} = 0,1$, стабілізуючий регулятор реалізує П-закон $W_{ст(p)} = K_p$, а коректувальний – ПІ-закон $W_{кор(p)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{уз} \cdot p + 1} \right)$.

$$W_{об(p)} = \frac{K_{об} \cdot e^{\tau p}}{T_{об} \cdot p + 1} = \frac{6,14 \cdot e^{0,78p}}{3 \cdot p + 1}, \quad (3.6)$$

де $K_{об} = \frac{\Delta T_k}{\Delta Q_{вод}} = \frac{27^\circ\text{C}}{4,4 \text{ м}^3/\text{час}} = 6,14 \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{час}}{\text{м}^3}$ – коефіцієнт передачі інерційного об'єкта; $T_{об} = 3 \text{ с}$ – постійна часу інерційного об'єкта; $\tau = 0,78 \text{ с}$ – транспортне

запізнювання інерційного об'єкта; $K''_{об} = \frac{\Delta Q_{вод}}{\Delta U} = \frac{4}{40} = 0,1 \frac{м^3}{час \cdot \%x.p.o}$

коефіцієнт передачі малоінерційного об'єкта; задане значення витрати води $Q_{зад} = 4,4 \frac{м^3}{час}$; $T_{зад} = 300^\circ C$ – задана температура катанки на виході з прокатного стана.

Перед запуском у роботу ливарно-прокатного агрегату визначаються з температурою заготовки, що подається у прокатний стан і необхідною температурою катанки на його виході. За допомогою формули (3.5) розраховують мінімально необхідну витрату води на примусове міжклітьове охолодження штаби в останній третині прокатного стана і встановлюють її в якості завдання для стабілізуючого регулятора витрати води. Після цього в автоматичному режимі стабілізуючий регулятор $W_{ст(р)}$ починає підтримувати на заданому значенні витрату води. Якщо при цьому температура катанки на виході прокатного стана не відповідає заданому значенні, регулятор $W_{кор(р)}$ коригує значення уставки в стабілізуючому регуляторі доки температура катанки не зрівняється із заданою.

Спосіб автоматичного регулювання був перевірений для умов прокатного стану ЛПА «LV-1600», на вході якого заготовка із алюмінієвого сплаву А5Е мала б температуру $T_{заг} = 500^\circ C$, а катанка на виході була б з температурою $T_k = 320^\circ C$.

Розрахування мінімально необхідної витрати води на примусове міжклітьове охолодження штаби в останній третині прокатного стана здійснювалось з використанням наступних величин: $F_{ср} = 0,000151$ – середня площа поперечного перетину прокату на дільниці 10 – 15-й клітей, $м^2$; $V_{ср} = 3,24$ – середня швидкість прокату на дільниці 10 – 15-й клітей, $м/с$; $\rho_{ал} = 2710$ – щільність технічного алюмінію, $кг/м^3$; $C_{ал} = 1065$ – теплоємність технічного алюмінію при температурі $325^\circ C$, $Дж/кг \cdot град.$; $T_{шт} = 347$ – розрахована температура штаби у 10-й кліті для заготовки з температурою $500^\circ C$ на вході

у прокатний стан, °С; $T_k = 320$ – задана температура катанки на виході з прокатного стана, °С; $C_B = 4190$ – теплоємність води при температурі 40°С, Дж/кг·град.; $\Delta T_{\text{ВОД}}^{\text{max}} = 10$ –максимально допустимий розігрів охолоджувальної води °С.

За результатами розрахунків мінімально необхідна витрата води на примусове міжклітьове охолодження штаби в останній третині прокатного стана склала $Q_{\text{ВОД}}^{\text{min}} = 4,4$ м³/час.

Якщо це значення витрати води використати в якості уставки стабілізуючому регулятору $W_{\text{ст(р)}}$, то він одразу почне регулювання за П-законом, не чекаючи інформації про температуру катанки на виході з прокатного стана. Оскільки завдання стабілізуючому регулятору установлює мінімально необхідну витрату води на охолодження штаби, температура катанки на виході стана $W_{\text{об(р)}}$ буде більше за встановлене завдання коригуючому регулятору. Завдяки цьому небалансу температур регулятор $W_{\text{кор(р)}}$ почне за ПІ-законом коригувати значення уставки регулятора $W_{\text{ст(р)}}$ в бік її збільшення и витрата охолодної води почне зростати. Коли температура катанки зрівняється із заданим значенням, коригуючий регулятор зупинить свої керувальні дії і уставка стабілізуючого регулятора залишиться незмінною, доки температура катанки на виході прокатного стана дорівнює заданому значенню. При появі збурень з боку витрати води регулятор $W_{\text{ст(р)}}$ відпрацює керувальні дії відповідно до його зкоригованої уставки. Якщо температура катанки відхилиться від заданого значення регулятора $W_{\text{кор(р)}}$, останній знову почне коригувати уставку стабілізуючому регулятору і так далі.

Таким чином, керування температурним режимом прокатного стана ЛПА при виробництві алюмінієвої катанки здійснюється за заданими температурами заготовки і катанки, що визначаються вимогами технології, шляхом примусового міжклітьового охолодження штаби в останній третині прокатного стана. На підставі значень цих температур розраховується мінімально необхідна витрата води, яка використовується в якості заданої

уставки стабілізуючому регулятору і автоматично коригується регулятором, що підтримує на заданому значенні температуру катанки на виході з прокатного стану. За таким способом керування температура штабина більшої частині стану примусово не знижується, а значить не потрібні додаткові енергоресурси на деформування металу в клітях. У той же час в останній третині прокатного стану відбувається регулювання температури, величина якої визначена бажаними механічними властивостями прокату.

Висновок

1. Проведений аналіз літератури, знайдені необхідні формули для математичного модулювання змінення температури заготовки при її прокатці.
2. Запропонована та описана каскадна система автоматичного керування температурою катанки на виході з прокатного стану.
3. Розраховано коефіцієнти об'єкта, а саме:
 - $K_{об} = 6,14$ – коефіцієнт передачі інерційного об'єкта;
 - $T_{об} = 3 \text{ с}$ – постійна часу інерційного об'єкта;
 - $\tau = 0,78 \text{ с}$ – транспортне запізнювання інерційного об'єкта.

Розділ 4 Розробка та дослідження системи автоматичного управління температурним режимом прокатного стану

4.1 Розробка системи автоматичного управління температурним режимом та прив'язка її до реальних умов роботи прокатного стану

Виходячи з запропонованої теорії у розділі 3.2 реалізоване каскадне керування об'єкта на комп'ютерній моделі, головна перевага каскадного регулювання полягає в поліпшенні якості роботи системи при будь-яких збуреннях за навантаженістю, а також при великій інерційності об'єкта за каналом регулювання. Якщо збурення прикладені до входу об'єкта, то допоміжний регулятор починає виконувати регулюючий вплив ще до того, як на виході системи з'явиться яке-небудь відхилення; похибка при цьому може бути зменшена до 10-100 разів порівняно з одноконтурним регулюванням.[24]

Реалізовано каскадне регулювання за допомогою стабілізуючого та корегуючого регуляторів.

Стабілізуючий регулятор реалізує П-закон. Передатна функція П-регулятора: $W_{cm(p)} = K_p$. Принцип дії у тому, що регулятор виробляє керуючий вплив на об'єкт пропорційно величині помилки (що більше помилка Е, то більше керуючий вплив Y).

Корегуючий регулятор реалізує ПІ-закон. ПІ-регулятор є поєднанням П-та І-регуляторів(Керуюча дія пропорційно інтегралу від помилки). Передатна функція ПІ-регулятора: $W_{кор(p)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{из} \cdot p + 1} \right)$. [25]

4.2 Комп'ютерне моделювання САУ температурним режимом прокатного стану та дослідження її роботи

4.2.1 Середовище програмування ПЛК та моделювання систем автоматичного управління Unity Pro

Програмно-технічні засоби, які входять до складу автоматизованих систем управління технологічними процесами, можна віднести до однієї з груп (рис.4.1):

- технічні засоби польового рівня (датчики, виконавчі механізми та перетворювачі і т.ін.);
- промислові контролери та регулятори;
- засоби розподіленої периферії (винесені за межі контролерів засоби вводу/виводу, електроприводи);
- засоби SCADA/HMI (комп'ютери з програмним забезпеченням супервізорного управління та збору даних (SCADA), операторські панелі (HMI));
- інструментальні засоби розробки та налагодження (програмувальники, програмне забезпечення для створення виконавчих програм, конфігурування та діагностики обладнання).

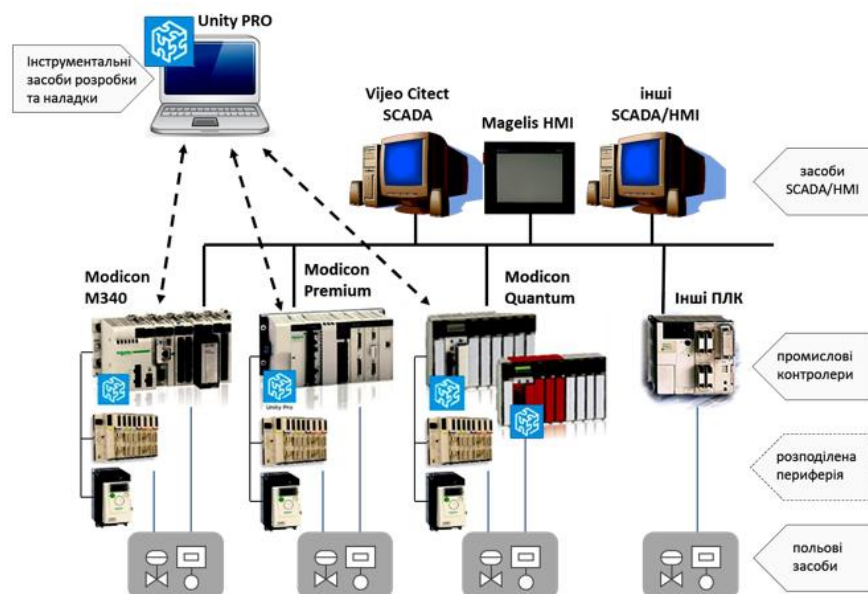


Рисунок 4.1 - Середовище UNITY PRO в інфраструктурі АСУТП

UNITY PRO - це програмне середовище конфігурування, програмування, налагодження та діагностики виконавчої системи промислових контролерів Modicon від Schneider Electric: Modicon M340, TSX Premium (включно Atrium) та Quantum. Місце UNITY PRO в інфраструктурі АСУТП показане на рис.4.1.

UNITY PRO є результатом розвитку та інтегрування двох програмних середовищ:

- PL7 PRO яке використовувалось для програмування контролерів TSX Microi TSX Premium;
- Concept, яке використовувалось для програмування контролерів Modicon Momentum та Modicon Quantum.

Середовище UNITY PRO може бути використане тільки для роботи з ПЛК, в яких функціонує операційна система UNITY (OS UNITY). Тобто TSX Premium з операційною системою PL7 або Quantum з операційною системою Concept запрограмувати з використанням UNITY PRO неможливо. Винятком можуть бути деякі з цих ПЛК, в які попередньо треба завантажити OS UNITY з використанням OS Loader.

4.2.2 Розробка програмного коду об'єкта керування

Після освоєння середовища програмування UNITY PRO, створено в ньому проект (рис.4.3) для системи автоматичного керування температурним режимом прокатного стану. В ньому створені змінні, реалізована задача MAST (рис. 4.4), операторський інтерфейс (рис. 4.8).

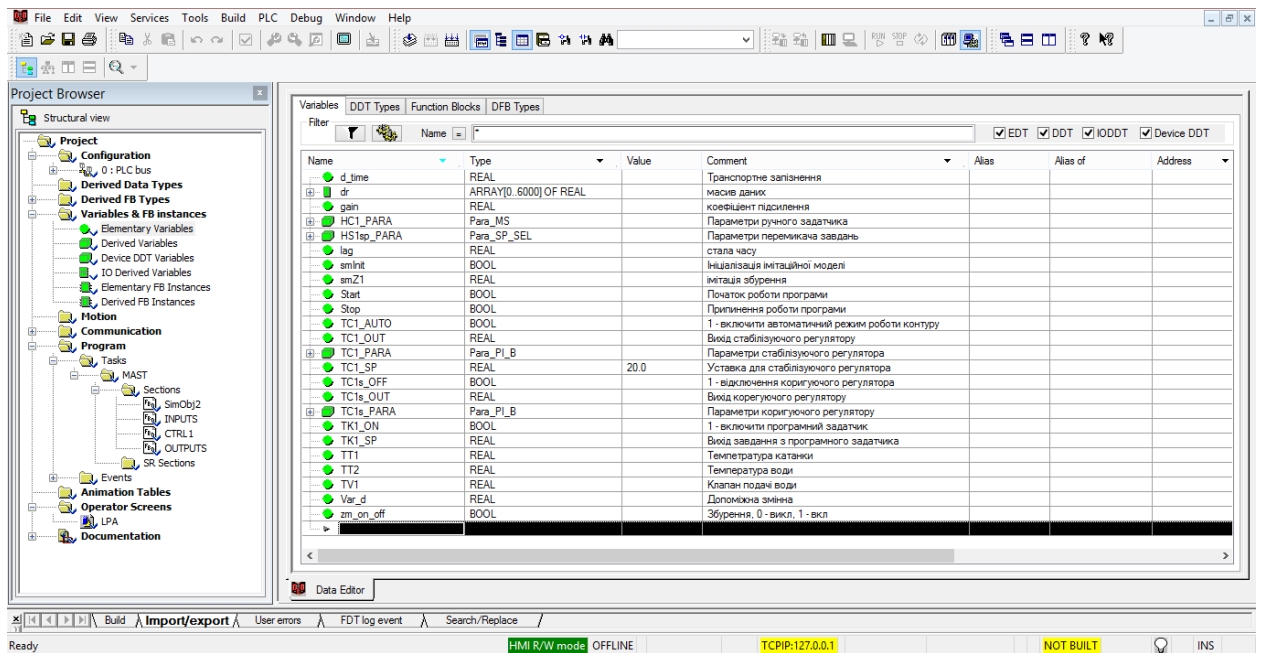


Рисунок 4.3 – Проект SAP температурним режимом прокатного стану

Система управління забезпечує регулювання температури з підтримкою наступних функцій:

а) стабілізація температури на виході стану на заданому оператором або програмним задатчиком значенні, з використанням каскадного регулятора, де:

1) стабілізуючий регулятор (ПІ режим);

2) корегуючий регулятор (ПІ режим) служить для швидкої реакції контуру регулювання на зміну малоінерційного ТТ2;

б) можливість настройки коефіцієнтів K_p та T_i з операторського екрану;

в) можливість ручного управління виконавчим механізмом TV1 з операторського екрану при переключенні в ручний режим з забезпеченням безударності переходу;

г) можливість переключення з ручного завдання на програмне управління та навпаки в будь який момент часу з забезпеченням безударності переходу;

д) при ручному управлінні виконавчим механізмом стабілізуючий регулятор повинен фіксувати своє вихідне значення в останньому положенні.

Розроблений проект реалізується за допомогою чотирьох секцій (рис. 4.4): секція "INPUTS" – для обробки вхідних каналів вимірювання (датчики температури); секція "OUTPUTS" – для обробки вихідного каналу правління; секція "CTRL1" – для реалізації контуру регулювання.

Секція "Simulation" призначена тільки для імітації об'єкта.

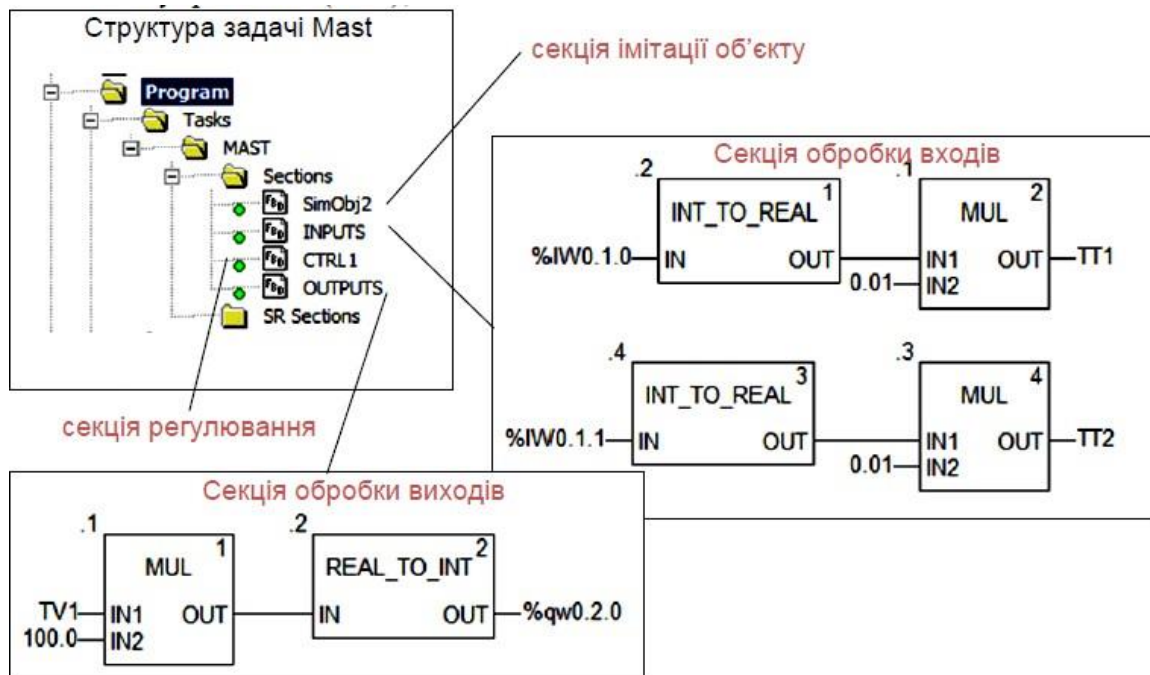


Рисунок 4.4 – Структура задачі MAST

Реалізація програмного коду об'єкта керування представлена на рис. 4.5. Вона складається з блоків: RS_0 (RS) – завдяки якому реалізується запуск та припинення роботи програми; HS1sp (SP_SEL) – перемикач завдань; TC_1 (PI_B) – реалізує роботу стабілізуючого регулятора; TC1s (PI_B) – реалізує роботу корегуючого регулятора; HC1 (MS) – реалізує роботу ручного управління.

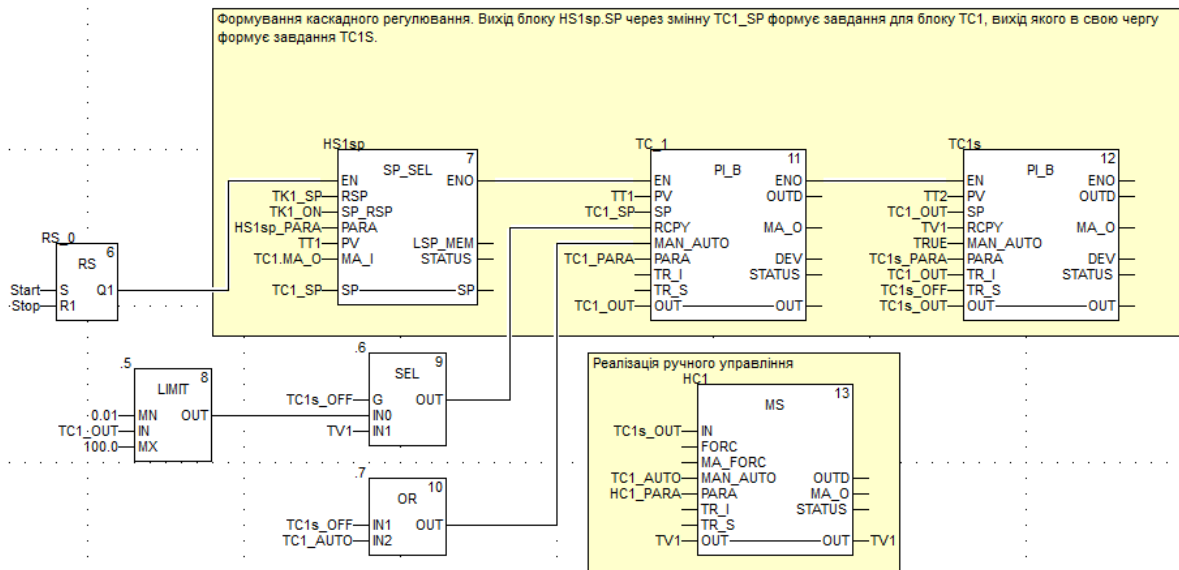


Рисунок 4.5 – Фрагмент секції з реалізацією контуру регулювання

Вихід блоку *HS1sp.SP* через змінну *TC1_SP* формує завдання для блоку *TC1*, вихід якого в свою чергу формує завдання *TC1s*. Таким чином формується каскадне регулювання.

Блок перемикавання завдання *HS1sp.SP* на вході *RSP* (дистанційне завдання) отримує значення в змінній *TK1_SP* з програмного задатчика (див. рис. 4.4). При активації оператором програмного управління (*TK1_ON=TRUE*), через вхід *SP_RSP* блок *HS1sp* переключається в дистанційний режим, при якому $HS1sp.SP = HS1sp.TK1_SP$. Це ж значення копіюється в змінну *TC1_SP*, так як вона прив'язана до входу/виходу *SP*. У локальному режимі (*TK1_ON=FALSE*) оператор може змінювати уставку безпосередньо змінюючи *TC1*.

Реалізація каскадного регулятора. Стабілізуючий регулятор *TC1* реалізований через функціональний блок типу *PI_B*. Його задача забезпечити значення температури *TT1* на рівні заданому *TC1_SP*.

Корегуючий регулятор *TC1s* теж реалізований через функціональний блок типу *PI_B*, однак по замовченню він працює в П-режимі, так як інтегральна складова відключена ($T_i=0$). Його задача швидко зреагувати на зміну менш інерційної змінної процесу *TT2*. Таким чином велику частину

збурень швидко компенсує корегуючий регулятор, а стабілізуючий регулятор забезпечить точність регулювання.

У каскадному режимі вихід регулятора підключається до *TC1s.SP* через змінну *TC1_OUT*, тим самим формуючи завдання веденому регулятору.

Враховуючи вимоги до безударності переходів та різні режими роботи контуру регулювання, обидва регулятори *TC1* та *TC1s* працюють в режимі використання входу *RCPY* (*en_rcpy=TRUE*). Це значить, що нове значення виходу *OUT* регулятори будуть розраховувати на базі значення входу *RCPY*.

Реалізація ручного управління. Ручне управління контуру реалізоване через блок ручного управління *HC1* та відповідних режимів роботи регуляторів *TC1* та *TC1s*. Значення виходу *HC1.OUT* зв'язане зі змінною *TVI*. У автоматичному режимі роботи контуру (*TC1_AUTO=TRUE*) вихід *HC1.OUT=TC1s_OUT*. У ручному режимі вихід *HC1.OUT* може бути змінений оператором. При цьому, враховуючи що значення *TVI* повторюється на входах *RCPY* блоків регулювання забезпечується безударний перехід.

Корегуючий регулятор завжди знаходиться в автоматичному режимі, так як для ручного режиму передбачений блок *HC1*. Стабілізуючий регулятор, якщо він знаходиться в режимі каскаду з корегуючим, в ручному режимі повинен фіксувати своє вихідне значення в останньому положенні. Це забезпечується шляхом переключення його в ручний режим. Таким чином стабілізуючий регулятор працює в автоматичному режимі, коли працює в автоматичному режимі весь контур.

4.2.3 Розробка програмного коду алгоритму керування

Реалізація програмного коду алгоритму керування представлена на рис. 4.6. Вона складається з блоків: *smk11* (*smValve*) – реалізую роботу клапану (рис. 4.7); *LAG_FILTER2* (*LAG_FILTER*) – реалізує роботу аперіодичної ланки 1-го порядку; *DTIME_1* (*DTIME*) – реалізує ланку чистого (транспортного) запізнювання.

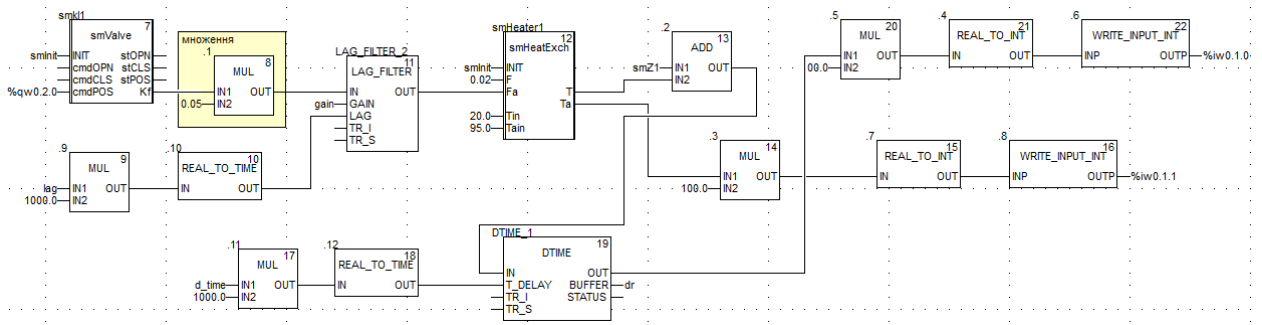


Рисунок 4.6 – Програмний код алгоритму керування

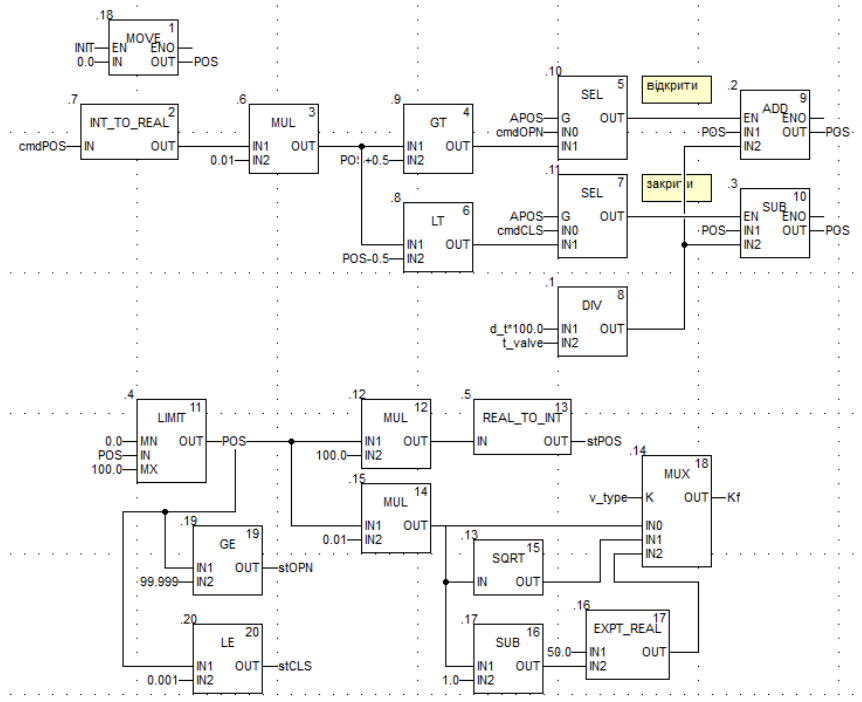


Рисунок 4.7 – Програмний код блоку smk11 (smValve)

Функціональний блок smValve реалізує роботу клапану на відкриття та закриття.

Функціональний блок LAG_FILTER призначений для реалізації аперіодичної ланки (1-го порядку), де вихід розраховується за формулою:

$$OUT = OUT_{old} + \frac{dt}{LAG + dt} \cdot \left(GAIN \cdot \frac{IN_{old} + IN}{2} - OUT_{old} \right), \quad (4.1)$$

де змінні із індексами old – значення на попередньому виклику, dt – інтервал між викликами блока, інші параметри наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри блока LAG_FILTER

| Вхідні параметри | | |
|-------------------|------|---|
| IN | REAL | Вхідні значення |
| GAIN | REAL | Коефіцієнт підсилення |
| LAG | TIME | Стала часу |
| TR_1 | REAL | Вхід ініціалізації (слідкування) |
| TR_S | BOOL | 1 = режим слідкування 0 = автоматичний режим |
| Вихідні параметри | | |
| OUT | REAL | Вихід |

Функціональний блок DTIME призначений для реалізації ланки чистого (транспортного) запізнювання між входом IN та виходом OUT. Час запізнювання визначається показником T_DELAY. Для розміщення даних транспортного запізнення між входом і виходом використовується змінна, яка підключається до виходу BUFFER. Ця змінна має тип ANY, враховуючи, що розмір буферу може бути різним. Однак у більшості випадків розмір буфера буде більше, ніж REAL, оскільки кількість значень у буфері буде більше 1-го.

4.2.4 Розробка інтерфейсу оператора та його програмного коду

Розроблено інтерфейс оператора, який представлено на рис. 4.8, та складається з наступних блоків: 1 – Назва інтерфейсу оператора (рис. 4.9); 2 – Кнопки пуск на стоп, для запуску та зупинення роботи програми (рис. 4.10); 3 – Значення вхідного сигналу, вихідного сигналу, уставки та настройок корегуючого та стабілізуючого регуляторів (рис. 4.11); 4 – Значення відкриття клапану (рис. 4.12); 5 – Кнопки для переходу в руч/авто режими роботи (рис.

4.13); 6 – Збурення та поле для вводу його значення (рис. 4.14); 7 – Поле для вводу уставки корегуючого регулятора (рис. 4.15); 8 – Поля для вводу параметрів об’єкта (рис. 4.16); 9 – Тренд (графік) (рис. 4.17).

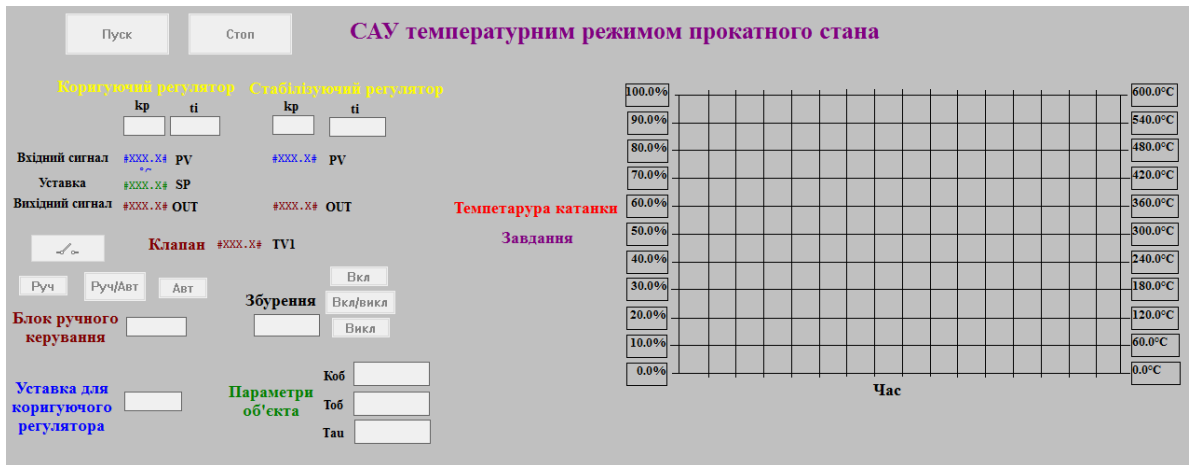


Рисунок 4.8 – Інтерфейс оператора

САУ температурним режимом прокатного стану

Рисунок 4.9 – Назва інтерфейсу оператора



Рисунок 4.10 – Кнопки пуск на стоп, для запуску та зупинення роботи програми

| | Коригуючий регулятор | | Стабілізуючий регулятор | |
|-----------------|----------------------|----------|-------------------------|-----|
| | кр | ті | кр | ті |
| | 0.533 | 1s_752ms | 2.5 | 0s |
| Вхідний сигнал | 70.0 | PV | 82.0 | PV |
| Уставка | 70.0 | SP | | |
| Вихідний сигнал | 72.0 | OUT | 25.2 | OUT |

Рисунок 4.11 - Значення вхідного сигналу, вихідного сигналу, уставки та настройок корегуючого та стабілізуючого регуляторів

Клапан 25.2

Рисунок 4.12 - Значення відкриття клапану

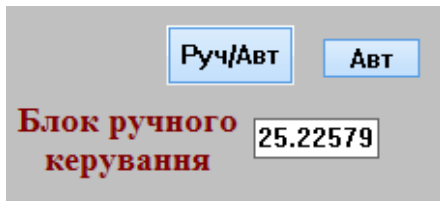


Рисунок 4.13 - Кнопки для переходу в руч/авто режими роботи

Блок ручного керування працює у діапазоні 0...100% відкриття клапану.

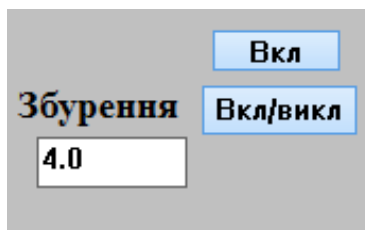


Рисунок 4.14 - Збурення та поле для вводу його значення

Збурення вноситься в діапазоні 0...10.

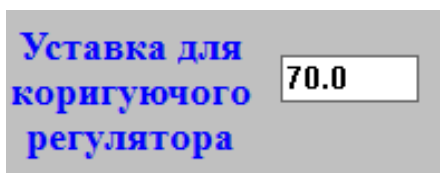


Рисунок 4.15 - Поле для вводу уставки корегуючого регулятора

Уставка для коригуючого регулятора вноситься в діапазоні 0...100% прямопропорційно температурі.

| | | |
|------------------------------|-----|------|
| Параметри об'єкта | Коб | 6.14 |
| | Тоб | 3.0 |
| | Тau | 0.78 |

Рисунок 4.16 - Поля для вводу параметрів об'єкта

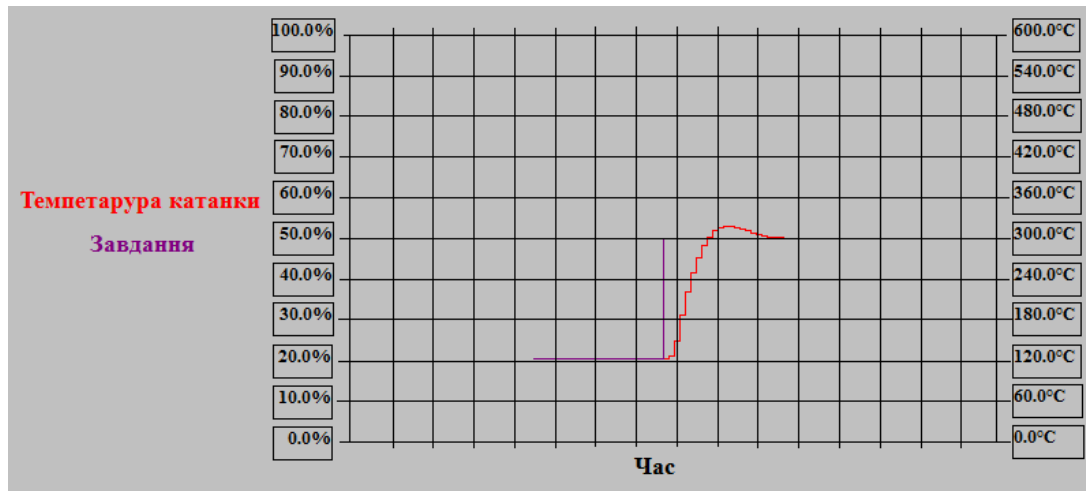


Рисунок 4.17 - Тренд (графік)

4.2.5 Дослідження на комп'ютерній моделі якості роботи САУ температурним режимом прокатного стану

Проведено дослідження на комп'ютерній моделі якості роботи САУ температурним режимом прокатного стану. Для цього проведено інженерний розрахунок налаштувань корегуючого регулятора:

1. Для аперіодичного перехідного процесу:

$$Kp = \frac{0,6}{K \cdot T} = \frac{0,6}{6,14 \cdot \frac{0,78}{3}} = 0,376 \quad (4.1)$$

$$Ti = 0,8 \cdot \tau + 0,5 \cdot T = 0,8 \cdot 0,78 + 0,5 \cdot 3 = 2,124 \quad (4.2)$$

2. Для перехідного процесу з 20% перерегулюванням:

$$Kp = \frac{0,85}{K \cdot T} = \frac{0,85}{6,14 \cdot \frac{0,78}{3}} = 0,533 \quad (4.3)$$

$$Ti = 0,9 \cdot \tau + 0,35 \cdot T = 0,9 \cdot 0,78 + 0,35 \cdot 3 = 1,752 \quad (4.4)$$

Результати роботи САУ при розрахованих настройках регулятора представлені на рис. 4.18 та рис. 4.19.



Рисунок 4.18 – Робота САУ при аперіодичному переходному процесу



Рисунок 4.19 – Робота САУ при переходному процесу з 20% перерегулюванням

Після досліджувався вплив параметрів об'єкта $K_{об}$ та $T_{об}$, результати дослідження представлені на рис. 4.20, рис. 4.21, рис. 4.22, рис. 4.23, рис. 4.24.

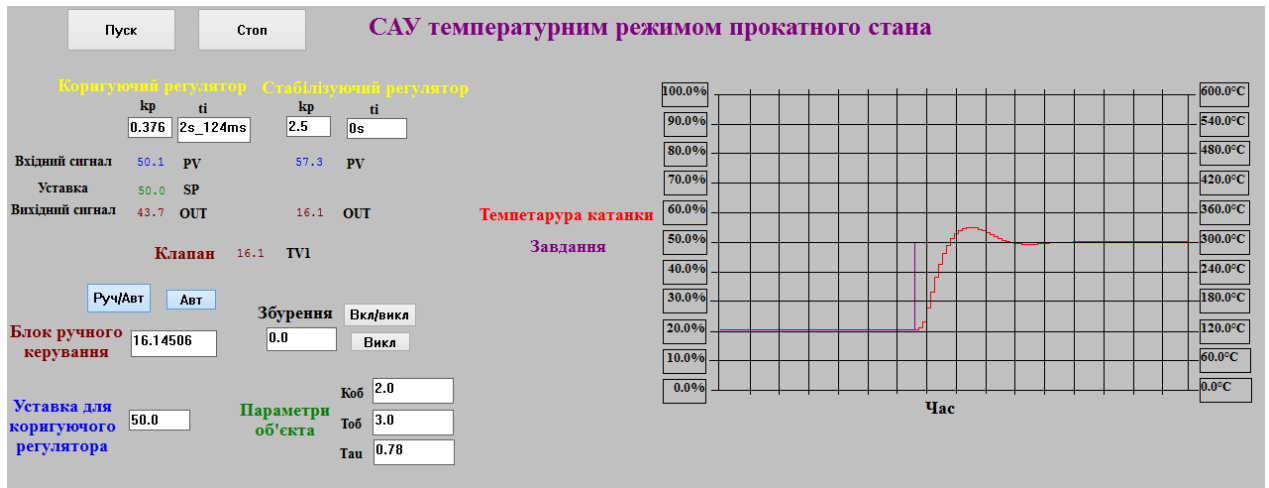


Рисунок 4.20 – Дослідження впливу параметра об'єкта ($K_{об} = 2.0$, $T_{об} = 3.0$, $\tau = 0.78$)

При коефіцієнті передачі ($K_{об}$) рівному 2, отримуємо перерегулювання 5%, статична похибка (δ) наближена до нуля, час регулювання 56с.

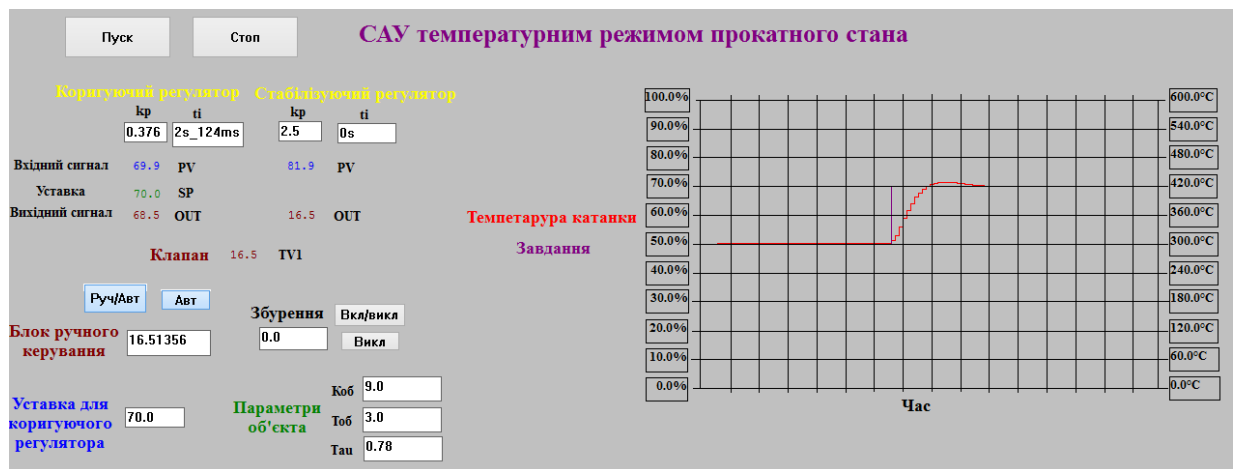


Рисунок 4.21 – Дослідження впливу параметра об'єкта ($K_{об} = 9.0$, $T_{об} = 3.0$, $\tau = 0.78$)

При коефіцієнті передачі ($K_{об}$) рівному 9, отримаємо перерегулювання 1,5%, статична похибка (σ) наближена до нуля, час регулювання $T_{рег} = 42с$.



Рисунок 4.22 – Дослідження впливу параметра об'єкта ($K_{об} = 6.14$, $T_{об} = 1.0$, $\tau = 0.78$)

При зміні постійної часу ($T_{об}$) отримували такі показники якості керування процесом. При постійній часу ($T_{об}$) рівній 1, отримуємо перерегулювання 2%, статична похибка (σ) наближена до нуля, час регулювання $T_{рег} = 42с$.

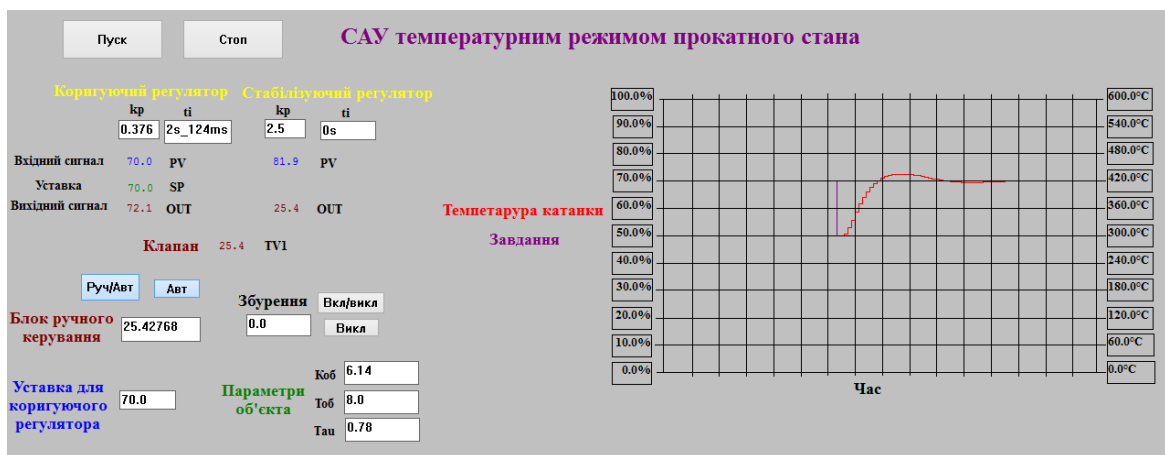


Рисунок 4.23 – Дослідження впливу параметра об'єкта ($K_{об} = 6.14$, $T_{об} = 8.0$, $\tau = 0.78$)

При постійній часу ($T_{об}$) рівній 8, отримуємо перерегулювання 2%, статична похибка (σ) наближена до нуля, час регулювання $T_{рег} = 84с$.



Рисунок 4.24 – Дослідження впливу параметра об'єкта ($K_{об} = 6.14$, $T_{об} = 3.0$, $\tau = 0.78$)

Далі підставимо значення коефіцієнту передачі та постійної часу, які були розраховані у розділі 3 ($K_{об} = 6.14$, $T_{об} = 3.0$). Отримаємо перерегулювання 3%, статична похибка (σ) наближена до нуля, час регулювання $T_{рег} = 35с$.

Після підбору оптимальних параметрів об'єкта та настройок регуляторів, перейшли до перевірки роботи збурення (рис. 4.25). Збурення подається на об'єкт в діапазоні $0...10$.



Рисунок 4.25 – Дослідження роботи САУ при збуренні

На графіку видно, що при появі збурення система виходить на задане значення уставки, що свідчить про те, що дану програму можна використовувати на виробництві.

Висновок

1. Розробка системи автоматичного управління температурним режимом та прив'язка її до реальних умов роботи прокатного стану.
2. Розробка комп'ютерної моделі САУ температурним режимом прокатного стану. Представлені змінні та програмний код.
3. Дослідження комп'ютерної моделі САУ температурним режимом прокатного стану при роботі регулятора з різними настройками (для аперіодичного пп та пп з 20% перерегулюванням), підібрані параметри об'єкта (коефіцієнт передачі $K_{об} = 6.14$, постійна часу $T_{об} = 3.0$, запізнювання $\tau = 0.78$), представлена робота САР при появі збурення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено літературний огляд з теми магістерської роботи. Знайдено необхідні формули для розрахунку швидкості катанки на виході з ливарного колеса, на вході до прокатного стану та фх стикування; також знайдено необхідні формули для розрахунку оптимальної температури катанки, для отримання найкращих механічних властивостей.

2. Проведені розрахунки по знайдених формулах, побудовані графіки, які представлені у кваліфікаційній роботі у розділах 2 та 3.

3. Розроблено програмний інтерфейс САР температурним режимом ливарно-прокатного агрегату. Проведено дослідження якості її роботи, а саме при роботі регулятора з різними настройками (для аперіодичного пп та пп з 20% перерегулюванням), підібрані параметри об'єкта (коефіцієнт передачі $K_{об} = 6.14$, постійна часу $T_{об} = 3.0$, запізнювання $\tau = 0.78$), представлена робота САР при появі збурення.

4. Дане дослідження показало, що програму можна реалізовувати на підприємстві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія виробництва алюмінієвої проволочки. URL: <https://promzn.ru/drugoe-proizvodstvo/alyuminievoj-provoloki.html> (дата звернення: 18.12.2020).
2. Метод безперервного лиття та прокатки. URL: https://studopedia.ru/8_38936_metod-neprevivnogo-litya-i-prokata.html (дата звернення: 20.12.2020).
3. Ніколаєнко А. М., Таран Ю. П., Трегулова І. В. Особливості технологій безперервного лиття та прокатки алюмінію. *Металургія*. Запоріжжя, 2017. - № 37. С. 100 – 105.
4. Целиков А. И. *Металлургические машины и агрегаты : настоящее и будущее*. Москва, 1979г. 144 с.
5. Исследовательская группа ИНФОМАЙН. Обзор рынка алюминиевой катанки в России. Изд. 2-е, июль 2013. URL: <http://www.infomine.ru/research/4/309> (дата звернення: 20.01.2021).
6. «Континуус-Проперци» – новая. URL: http://www.rmo.ru/ru/nmobarudovanie/nmobarudovanie/20053/22_24_nmo_3_05 (дата звернення: 15.02.2021).
7. Southwire Company LLC. URL: <http://www.southwire.com/documents/SCR-Aluminum-Brochure.pdf>. (дата звернення: 18.03.2021).
8. Far East (China) Group Limited. URL : <http://shcablemachinery.ru/1-4-continuous-casting-rolling-line>. (дата звернення: 22.04.2021).
9. Шульга А. И., Егоров С. Г., Головина А. В. Исследование влияния условий охлаждения алюминиевой катанки на ее свойства. Запорожье, 2007г. 148 с.
10. Таран Ю. П., Ніколаєнко А. М. Исследование температурных деформаций алюминиевой заготовки при её непрерывном литье. *Металлургия* : научные труды ЗГИА. Запорожье, 2010. № 22. С. 174–181.

11. Добаткин В. И. Слитки алюминиевых сплавов. Свердловск, 1960г. 112 с.
12. Таран Ю. П., Николаенко А. Н. Локальная информационно-измерительная система для контроля параметров технологического процесса. Запорожье, 2007. 139 с.
13. Грудев А. П. Теория прокатки : учебник для вузов. Москва, 2001. С. 280.
14. Николаев В. А. Теория и практика процессов прокатки. Запорожье, 2002. С. 232 с.
15. Таран Ю.П., Николаенко А.Н. Исследование температурных деформаций заготовки при непрерывном литье алюминия. *Металлургия* : научные труды ЗГИА. Запорожье, 2007. С. 139-144.
16. Таран Ю. П., Николаенко А. Н. Исследования влияния работы прокатного стана на формирование заготовки при непрерывном литье алюминия. *Металлургия* : научные труды ЗГИА. Запорожье, 2011. № 22. С. 144-147.
17. Никитин Г. С., Восканьянц А. А., Крюков К. А. Расчет энергосиловых параметров при горячей прокатке в непрерывной группе сортового стана : метод. указания. Москва, 2010. 28 с.
18. Шилов В. А., Пономарев А. А., Николаев М. С. Моделирование температурных режимов прокатки на новом мелкосортно-проволочном стане. *Современные металлические материалы и технологи* : труды международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2011. С. 70-71.
19. Сидельников С. Б. Константинов И. Л., Ворошилов Д. С. Технология прокатки : учебник. 3-е изд. Красноярск, 2016. 180 с.
20. Загиров Н. Н., Константинов И. Л., Иванов Е. В. Основы расчетов процессов получения длинномерных металлоизделий методами обработки металлов давлением : учеб. пособие. Красноярск, 2011. 312 с.

21. Остапенко А. Л., Курдюкова Л. А. Сопротивление деформации алюминия, меди и их сплавов. *Производство проката*. Москва, 2011. № 1. С. 10-24.
22. Сухоруков, Г. И. Повышение комплекса физико-механических свойств полуфабрикатов из малолегированного алюминиевого : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01. Братск, 1984. 35с.
23. Шилов В. А., Пономарев А. А., Николаев М. С. Моделирование температурных режимов прокатки на новом мелкосортно-проволочном стане. *Производство проката*. Санкт-Петербург, 2011. № 8. С. 18 – 23.
24. Каскадні системи регулювання. URL: <https://studopedia.org/10-119113.html> (дата звернення: 28.09.2021).
25. П-, ПІ-, ПД-, ПІД- регулятори. URL: <https://automation-system.ru/main/15-regulyator/type-of-control/90-408-p-pi-pid.html> (дата звернення: 15.10.2021).