

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ _____

(підпис)

«_____» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Карпенко Дмитру Валентиновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи керування лабораторної муфельної печі

Затверджена наказом по університету від 08.11.2021 №1696 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____

3. Вихідні дані до роботи: Напруга живлення 220 В, 50 Гц. Потужність що споживається 2,5 кВт. Робочий об'єм камери 7,8 літрів. Робоча температура до 1100 °С.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ _____

4.2 Аналіз предметної області; _____

4.3 Розробка конструкції муфельної печі; _____

4.4 Аналіз параметрів що впливають на якісні показники ливарних виробів; _____

4.5 Розробка алгоритму управління нагрівом муфельної печі; _____

4.6 Охорона праці; _____

4.7 Висновки; _____

4.8 Додатки. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал представлений у виді презентації PowerPoint (*.ppt)
– с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	05.11.21	виконав
2	Аналіз вимог технічного завдання	10.11.21	виконав
3	Аналіз вибору матеріалів та компонентів	15.11.21	виконав
4	Розрахунок параметрів нагрівального елемента	24.11.21	виконав
5	Збірка муфельної печі	28.11.21	виконав
6	Розробка автоматичної системи управління для муфельної печі	01.12.21	виконав
7	Оформлення пояснювальної записки	02.12.21	виконав
8	Перевірка керівником роботи	02.12.21	виконав
9	Нормоконтроль		
10	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk		
11	Подання роботи на рецензію		
12	Подання роботи на підпис зав. кафедри		
13	Подання атестаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 05.11.2021 р.

Студент _____ Карпенко Д. В.
(підпис)

Керівник роботи _____ доцент Разумов-Фризюк Є. А.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 94 с., 5 табл., 69 рис., 22 джерела.

ВИДИ ЛИТТЯ, ПЛАВКА, МЕТАЛ, ФОРМА, МУФЕЛЬНА ПІЧ,
МУФЕЛЬ, ДРІТ, ПЛАТА УПРАВЛІННЯ.

Метою магістерської кваліфікаційної є розроблення автоматизованої системи керування лабораторної муфельної печі.

В ході виконання кваліфікаційної роботи було розроблено конструкцію лабораторної муфельної печі. Розраховано та виготовлено нагрівальний елемент, розроблено електричну схему управління нагріву муфельної печі. Розроблено програмно-апаратна частина управління муфельної печі. Проведено аналіз розбіжностей у температурі на нагрівальному елементі, на внутрішніх стінках, у внутрішньому об'ємі муфельної печі та на тиглі, що знаходиться у камері печі. Виходячи із цих розбіжностей у температурі розроблено програмну корекцію температури для забезпечення точної температури нагріву тиглю для плавки металу.

ABSTRACT

Explanatory note: 94 pages, 5 tables, 69 pictures, 22 sources.

**TYPES OF CASTING, MELTING, METAL, FORM, MUFFLE OVEN,
MUFFEL, WIRE, CONTROL BOARD**

The purpose of the master's qualification is to develop an automated control system for a laboratory muffle oven.

During the qualification work, the construction of the laboratory muffle oven was developed. A heater element is calculated and made, the electric circuit for heating control of muffle oven was developed. The software and hardware part for muffle oven control has been developed. The analysis of differences in temperature on the heating element, on the inner walls, inner volume and on the crucible were analyzed. Based on these differences in temperature, a software temperature correction was developed to provide exact heating temperature of the crucible for melting metal.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз предметної області.....	12
1.1 Використання лиття у виробництві радіоелектронної техніки.....	12
1.2 Аналіз видів лиття.....	14
1.2.1 Лиття у землю.....	14
1.2.2 Оболонкове лиття	15
1.2.3 Лиття по виплавлених моделях.....	17
1.2.4 Лиття в металеві форми (кокілі).....	19
1.2.5 Лиття під тиском.....	20
1.2.6 Відцентрове лиття.....	23
1.3 Аналіз способів плавки металів.....	24
1.3.1 Електрична муфельна піч.....	24
1.4 Аналіз аналогічних конструкцій.....	26
1.5 Висновки до розділу.....	28
2 Розробка конструкції муфельної печі.....	29
2.1 Аналіз та розробка структурної схеми.....	29
2.2 Розрахунок параметрів нагрівального елемента.....	30
2.3 Розробка електричної частини.....	39
2.3.1 Вибір елементів.....	39
2.3.2 Виготовлення макету.....	42
2.4 Розробка програмної частини.....	46
2.5 Керування роботи муфельної печі.....	48
2.6 Висновки до розділу.....	50
3 Аналіз параметрів що впливають на якісні показники ливарних виробів.....	51
3.1 Види дефектів лиття.....	51
3.2 Аналіз параметрів що впливають на виникнення дефектів.....	57

3.3 Експериментальні дослідження	59
3.4 Висновки до розділу.....	68
4 Розробка алгоритму управління нагрівом муфельної печі.....	69
4.1 Аналіз вимог до режимів нагріву.....	69
4.2 Аналіз методів вимірювання температури.....	70
4.3 Висновки до розділу.....	84
5 Охорона праці.....	85
Висновки.....	90
Перелік джерел посилання.....	91
Додаток А Програмний код.....	94
Додаток Б Демонстраційний матеріал у вигляді презентації.....	96

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ЕПО – електрична піч опору;

ЕРС – електрорушійна сила;

ТХА – термопара хромель-алюмель;

ШВП – шамотна скловолокниста плита;

IDE – integrated development environment;

LCD – liquid crystal display;

SSR – solid state relay;

STL – stereolithography;

USB – universal serial bus.

ВСТУП

Лиття низькотемпературних сплавів це одна з найбільш поширених технологій, що забезпечує високоякісне і високопродуктивне виготовлення виробів різної тематики – дослідних прототипів, деталей для техніки та механізмів, прес-форм. Можливе виготовлення будь-яких складних форм деталей, що неможливе при виготовленні на верстаті. Лиття металів та їх сплавів є дуже актуальним для електроніки, за допомогою лиття можна виготовляти різні корпуси, радіатори, кріплення та інші деталі.

Для виготовлення якісних деталей та елементів можна використати адитивні технології а саме 3D-друк. Для отримання виливків з металу при виготовленні малих серій або дослідних зразків успішно використовуються форми надруковані на 3D-принтері. У ці форми заливається віск, потім восківки використовуються для виготовлення керамічних або гіпсових форм в процесі лиття по виплавленим моделям. Також можна використовувати моделі, виготовлені за допомогою 3D-друку з певного матеріалу, що дозволить виплавити його з гіпсової форми, та потім проводити лиття у цю форму.

Існує багато видів печей що використовуються для плавки металів, але найбільш розповсюдженими є звичайні електричні печі з нагрівальним елементом – спіраль, називають такі печі – муфельними.

Муфельна піч здобула велику популярність завдяки своїм перевагам:

- малі габарити та вага;
- низька вартість;
- легкий та зрозумілий принцип роботи;
- малошумність.

Муфельні печі використовують для обжигу виробів з кераміки, для термічної обробки металів, а саме: гартування, відпуск, плавка, спаювання кольорових металів. Також муфельні печі часто використовують в лабораторних умовах, наприклад в університетах де габарити печі грають велику роль, а інших

енергетичних ресурсів окрім електроенергії немає. Однак у муфельних печей є деякі недоліки, такі як:

- велике споживання електроенергії;
- малий об'єм камери;

Блок управління печі складається з терморегулятора, термопари, реле та радіатора, вимикача. Терморегулятори поділяються на аналогові та цифрові. Аналогові терморегулятори використовуються частіше в старих печах та мають недолік – великий відсоток похибок. На встановлення та підтримання температури впливає велика кількість суб'єктивних умов. Цифровий терморегулятор є самим простим та надійним, він містить екран або два, на яких відображається задана та поточна температура. Також використовують програматори для виконання багатоступінчатих задач. Термопара для муфельної печі служить для вимірювання поточної температури всередині печі. Дані з термопари поступають на терморегулятор, який контролює робочий процес. Реле найчастіше використовують твердотіле напівпровідникове, що може витримувати сильний нагрів. Для запобігання нагріву використовують радіатори.

Завдяки своїм перевагам електричні муфельні печі є дуже популярними, а завдяки своїй невеликій вартості в порівнянні з іншими печами є доступними для великої кількості споживачів.

Актуальність роботи полягає в тому, що для виконання термічної обробки металів є необхідним точне дотримання температурного режиму. Наприклад для проведення плавки металів з високою температурою плавки, приблизною до максимально допустимої розробленої установки. Якщо знехтувати цими температурними показниками, то піч може вийти з ладу при надвисоких температурах. Також для проведення закалки та відпуску є необхідним дотримання певного порогу температур із певним часом витримки. Автоматизація процесу управління температурним режимом покращить точність вимірювання температури в камері, тим самим і точність дотримання температурних режимів із необхідною витримкою по часу. Через правильне

дотримання температурних режимів та часу покращиться якість виливків, та буде правильно проводитись закалка та відпуск металів.

Предмет дослідження – технологія лиття низькотемпературних матеріалів.

Об'єкт дослідження – автоматизація керування нагрівом муфельної печі.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи керування лабораторної муфельної печі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз технічного завдання та літератури;
- аналіз аналогічних конструкцій;
- обрати компоненти для розробки макета;
- провести розрахунки нагрівального елемента;
- розробити структурну схему;
- зібрати макет печі;
- провести аналіз параметрів що впливають на якісні показники ливарних виробів;
- провести експериментальні дослідження;
- написати програмний код для автоматичної системи управління нагрівом муфельної печі;

Атестаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008:2015 [2], методичними вказівками [1], [3] та навчальним посібником [4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Використання лиття у виробництві радіоелектронної техніки

У виробництві радіоелектронної техніки лиття відіграє дуже важливу роль, а саме дає можливість виготовлення різних деталей – корпусів (рис 1.1), монтажних елементів для плат (рис 1.2), радіаторів (рис.1.3). У порівнянні із фрезеруванням або штамповкою лиття є більш дешевим виробництвом завдяки малої кількості відходів. Наприклад при фрезеруванні корпусу весь його внутрішній об'єм та інші кріплення будуть стружкою-відходом. При штамповці з листового матеріалу декількох складних деталей усі невикористані місця на заготовці стануть відходом. При використанні лиття відходом стане лише ливниковий канал, який потім можна повторно використати для нової деталі. Також у порівнянні із фрезеруванням або штамповкою лиття є більш простим методом виробництва.



Рисунок 1.1 – алюмінієвий корпус



Рисунок 1.2 – монтажні елементи



Рисунок 1.3 – радіатор

Є можливість виготовлення різних деталей для збірки станків, а саме з'єднувальних елементів наприклад кутників (рис 1.4), опор валів (рис 1.5).



Рисунок 1.4 – алюмінієвий кутник



Рисунок 1.5 – опора валу

Для досягнення більш якісної деталі необхідно використовувати лиття під тиском. В лабораторних умовах штампування є неможливим завдяки великих розмірів установки та її вартості, фрезерувальний ЧПУ станок також є дуже дорогим. Лиття в лабораторних умовах є більш простим та бюджетним методом, а завдяки можливості використання 3D-принтерів є можливість виготовлення прототипів та дослідних зразків, виготовлення матриць по надрукованим моделям.

1.2 Аналіз видів лиття

1.2.1 Лиття у землю

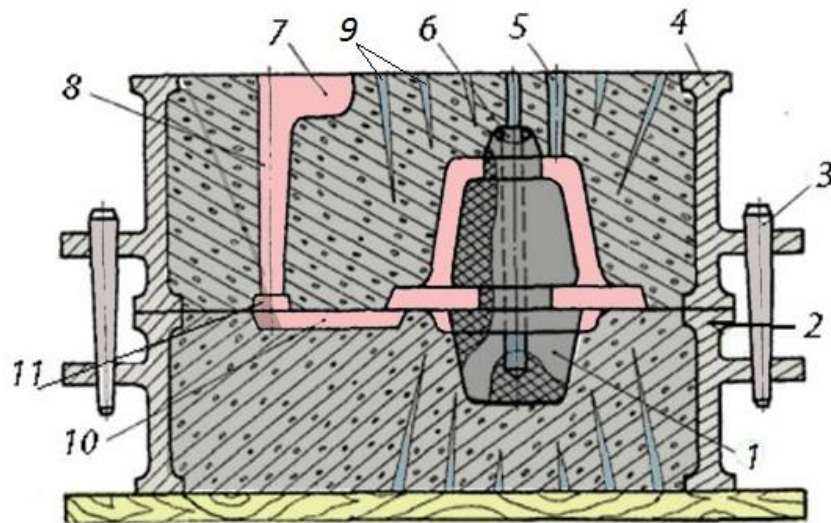
Лиття у землю це процес отримання виливків-деталей за допомогою вільної заливки розплавленого металу в форму, що виготовлена з піску з додаванням глини, води і невеликої кількості спеціальних домішок. Взагалі, у якості матеріалу виливків використовується сірий чавун, який володіє доброю текучістю та малою усадкою (1%), низьковуглецева сталь. Обмежено виробляються таким способом виливки з мідних та алюмінієвих сплавів [19].

Форма складається з двох напівформ, які називаються тиглями. Вони виготовляються вручну або машиною. Робочі порожнини у формувальній суміші верхнього тигля та нижнього тигля отримують за допомогою кожної половини роз'ємної моделі.

Тигель також має перфорації. Вони використовуються для відведення тепла і випаровування залишкової вологи при формуванні і кристалізації деталей. Для видалення газу з порожнини у верхній частині тигля роблять отвір.

Витягнувши половину моделі з формувальної суміші, встановіть стрижень в порожнину. Потім помістіть верхній тигель на нижній і закріпіть шпильками. Розплавлений метал заливається в зібрану форму через ливникову систему. Ливникова система складається з чашки, стояка, шлакозбірника та живильника. Оскільки рідкий метал стискається під час процесу кристалізації, живильник подає рідкий метал, щоб повністю заповнити порожнину. Після того, як метал

кристалізується і вилівка охолоне, вибийте вилівок із форми та вийміть стрижень. (рис.1.6).



1 – порожнина; 2 – нижня опока; 3 – стрижень; 4 – верхня опока; 5 – канал для відведення газів; 6 – стрижень; 7 – ливникова чаша; 8 – стояк; 9 – наколи; 10 – живильник; 11 – шлакозбірник.

Рисунок 1.6 – Ливарна форма

Переваги:

- низька вартість технічного оснащення;
- можливість отримати будь-який вилівок за вагою та розміром.

Недоліки:

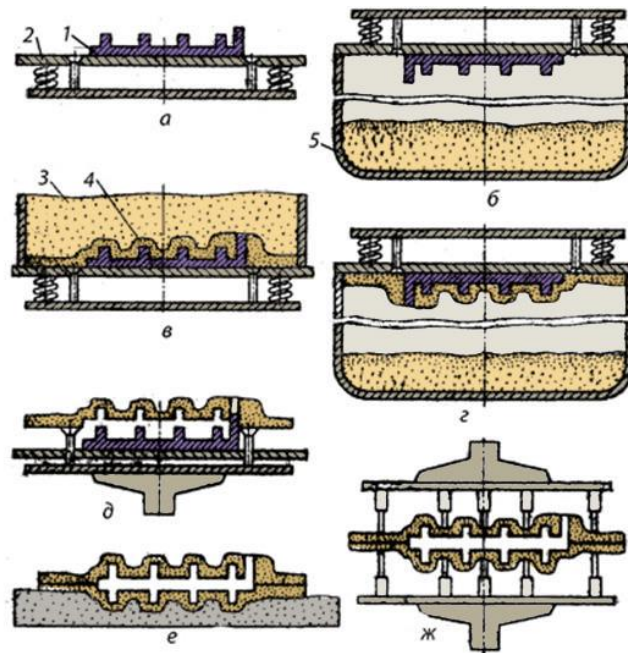
- низька точність розмірів (14 ... 16 квалітети);
- висока шорсткість поверхні;
- груба кристалічна дендритна структура виливків з низькими механічними властивостями.

1.2.2 Оболонкове лиття

Оболонкове лиття – отримання вилівки в тонкостінних формах-оболонках товщиною 6...15 мм, виготовлені з високоміцної піщано-смоляної суміші. Шаблон складається з двох напівоболонки, які з'єднуються з вертикальною або

горизонтальною лінією з'єднувача за допомогою склеювання або за допомогою скоб або затискачів. [6].

Металеву модель закріплюють на пластині (рис. 1.7 а). Далі закріплюють модельну пластину на ванні, заповненій сумішшю, щоб утворився обертовий бункер і нагрівають її до $200^{\circ}\text{C} \dots 250^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.7 б). Потім обертовий бункер перевертають, а металеву модель покривають формовкою і витримують при $10^{\circ}\text{C} \dots 0^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.7 в). Смола формувальної суміші плавиться, зв'язує пісок і далі полімеризується, утворюючи оболонку. Потім обертовий бункер повертається назад, щоб вивантажити суміш з моделі (рис. 1.7 г). За допомогою спеціального штовхача сформована на металевій моделі оболонка знімається (рис. 1.7 д). Щоб остаточно затвердіти смолу і отримати напівформовану оболонку, поміщають її у піч, нагріту до $300^{\circ}\text{C} \dots 350^{\circ}\text{C}$, і витримують $60\text{с} \dots 90\text{с}$ (рис. 1.7 е). Потім склеюють гарячу напівоболонку синтетичним клеєм (рис. 1.7 ж).



1 – модель; 2 – модельна плита; 3 – формуюча суміш; 4 – напівтверда оболонка;
5 – поворотний бункер.

Рисунок 1.7 – Етапи виготовлення оболонки

Отриману форму оболонки поміщають у тигельну ємність, заповнену кварцовим піском або металевими гранулами, щоб запобігти передчасному виходу з ладу при заливці розплавленого металу.

Переваги в порівнянні з литтям в землю:

- вища точність (12 ... 14 квалітети);
- вища якість поверхні;
- висока газопроникність оболонок;
- зменшена вартість формувальної маси (в 20 ... 30 разів);
- процес легко механізувати й автоматизувати;
- висока ефективність формування (до 500 оболонок в годину).

Недоліки:

- вага виливків обмежена (до 300 кг, найбільш економічно до 50...80 кг);
- через високу вартість смоли висока вартість формувальних матеріалів.

1.2.3 Лиття по виплавлюваних моделях

Лиття по виплавлюваних моделях – відливку отримують шляхом заливки цілісної тонкостінної керамічної форми, виготовленої з легкоплавких складів за допомогою моделі [7].

Технологія лиття по виплавлюваних моделях:

- виготовлення моделей. Виготовляють металеву прес-форму, порожнина якої має конфігурацію і розміри майбутнього виробу з урахуванням ливарної усадки і припуску на механічну обробку (якщо є). Потім за допомогою форми для відливання моделі необхідно використовувати матеріали з низькою температурою плавлення (парафін, віск, церезин, стеарину і ін.) відливають моделі [7];
 - установка блоків моделей. Виготовляють модельний блок однозливною системою (рис. 1.8 а);
 - формування на блоках керамічної оболонки. Модельний блок покривають керамічною суспензією методом занурення, що складається з вогнетривкого матеріалу і сполучного матеріалу (рис. 1.8 б);

- сушка. Модельний блок посипають кварцовим піском і сушать на повітрі. Повторюють операції кілька разів, щоб отримати форми товщиною 5 – 8 мм;
- виплавляння моделей з керамічних форм. При 80°C...90 °C з модельного блоку виплавляють компоненти моделі (рис. 1.8 в);
- формування оболонок;
- прожарювання оболонкових форм. Модельний блок зберігається в печі при температурі 800°C...900°C. Після прожарювання оболонка модельного блоку стає твердою, повітропроникною формою керамічного блоку;
- заливка. Заливають розплавлений метал в блок-форму;
- вибивання. Після охолодження металу та його кристалізації керамічну блок-форму руйнують;
- очищення виливків.

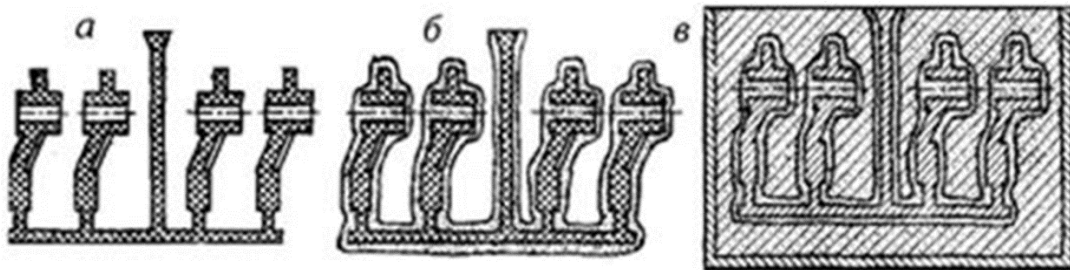


Рисунок 1.8 – Виготовлення форм по виплавлюваних моделях

Переваги:

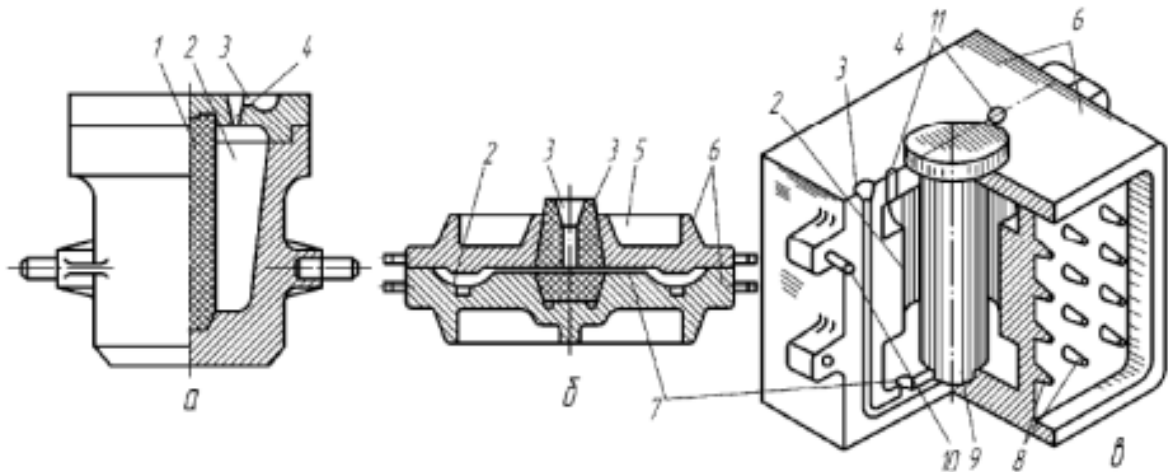
- висока точність;
- можливість отримувати складні фасонні виливки;
- можливість отримувати деталі з будь-якого сплаву;
- висока чистота поверхні;
- зменшення або виключення механічної обробки деталей.

Недоліки:

- складність технологічного процесу;
- технологічний процес триває довго;
- дорогі витратні матеріали.

1.2.4 Лиття в металеві форми (кокілі)

Лиття в кокілі – отримують шляхом вільного заливання розплаву в один корпус (рис. 1.9 а), знімну металеву форму з горизонтальними з'єднувачами (рис.1.9б) і вертикальними з'єднувачами. (рис. 1.9 в) [6].



- 1 – піщаний стрижень; 2 – порожнину форми; 3 – ливникова чаша; 4 – стояк;
 5 – ребра жорсткості; 6 – половини кокілю; 7 – живильники; 8 – пальці;
 9 – металевий стрижень; 10 – напрямні штирі; 11 – випори.

Рисунок 1.9 – Конструкція кокілю

Технологія кокільного лиття:

- підготовка форми для заливки рідкого металу. Робоча поверхня порожнини покрита теплоізоляційним покриттям товщиною 0,3-0,8 мм для уповільнення охолодження виливка;
- збирання форми з установкою стержнів;
- нагрів форми. Залежно від литого металу і товщини стінок виливки холодну форму перед заливкою розплавленого металу нагрівають до 150 °С – 350 °С;
- лиття металу;
- вилучення виливки;
- вирізка та чистка виливки.

Переваги:

- можливість багаторазового використання форми (300 – 500 сталевих виливків масою 100 – 150 кг, близько 5000 дрібних чавунних виливків, десятки тисяч виливків з алюмінієвих сплавів);
- висока точність;
- якість поверхні виливків дуже висока (дрібне зерно, за рахунок підвищеної тепловіддачі форми, можливість нагрівання форми);

Недоліки:

- висока вартість форми;
- складність виготовлення складних конфігурацій і тонкостінних виливків;
- стабільність форми під час лиття тугоплавких сплавів відносно низька.

1.2.5 Лиття під тиском

Лиття під тиском – процес отримання виливків у металевих формах (пресформах), в яку заливають метал і формують виливок під тиском повітря або поршня [6].

Існують наступні типи машин:

- поршневої дії (з гарячою і холодною камерою стиснення);
- компресорної дії (з рухомою і нерухомою камерами стиснення).

Машина з гарячою камерою пресування (рис. 1.10) пресова камера 2 розташована в тиглі 1, а тигель 1 нагрівається розплавленим металом.. У верхньому положенні циліндра 3 металевий поршень 4 видавлює через отвір 8 для заповнення порожнини. Коли поршень рухається вниз по перекритому отвору, сплав проходить через канал 7 під тиском 10-30 МПа і заповнює порожнину кристалізатора 5 через профільюючий мундштук 6 (формувальну зону). Після застигання виливка циліндр повертається у вихідне положення, а виливка виймається з форми за допомогою виштовхувачів.

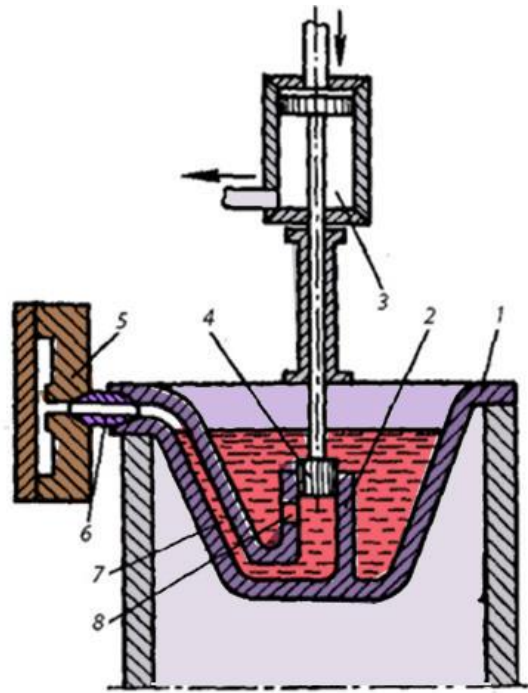


Рисунок 1.10 – Схема поршневої машини з гарячою камерою пресування

На верстаті з вертикальною камерою холодного пресу розплавлений метал заливають у пресову камеру 2 (рис. 1.11 а). Поршень 1 стискає рідкий метал і здавлює задню частину 4, так що метал під тиском потрапляє в порожнину форми 3 (рис. 1.11 б). Після твердіння виливку поршень і п'ята піднімаються, а надлишок твердого металу 5 відривається від виливка 6. Форма відкривається і виймається виливок (рис. 1.11 в).

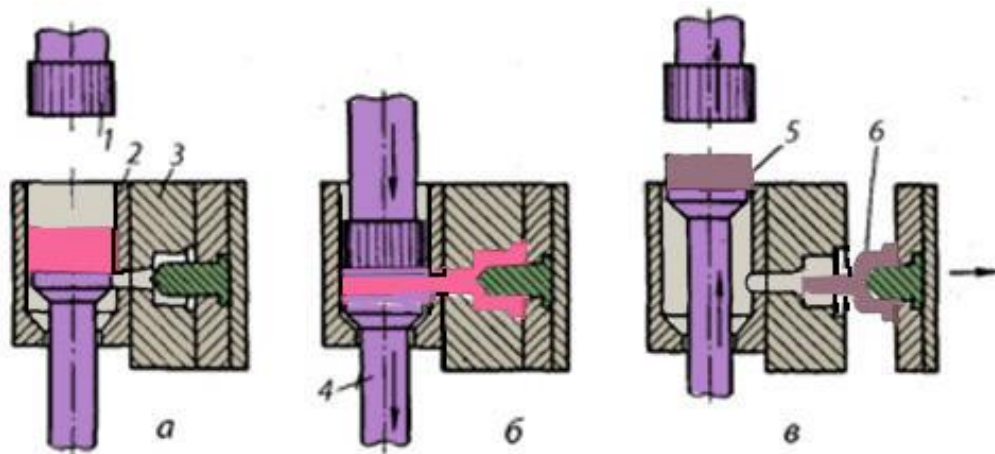


Рисунок 1.11 – Схема холодної вертикальної камери стиснення

На верстаті з горизонтальною камерою холодного пресування розплавлений метал заливається в камеру преса 4 (рис. 1.12 а). Потім металевий поршень 5 під тиском подається в порожнину форми (рис. 1.12 б), яка складається з нерухомої напівформи 3 і рухомої напівформи 1. Внутрішня порожнина у прес-формі отримується стрижнем 2. Після затвердіння виливку розкривають прес-форму, виймають стрижень 2 (рис. 1.12 в) виштовхувачами 6 видаляється з робочої порожнини форми виливок 7.

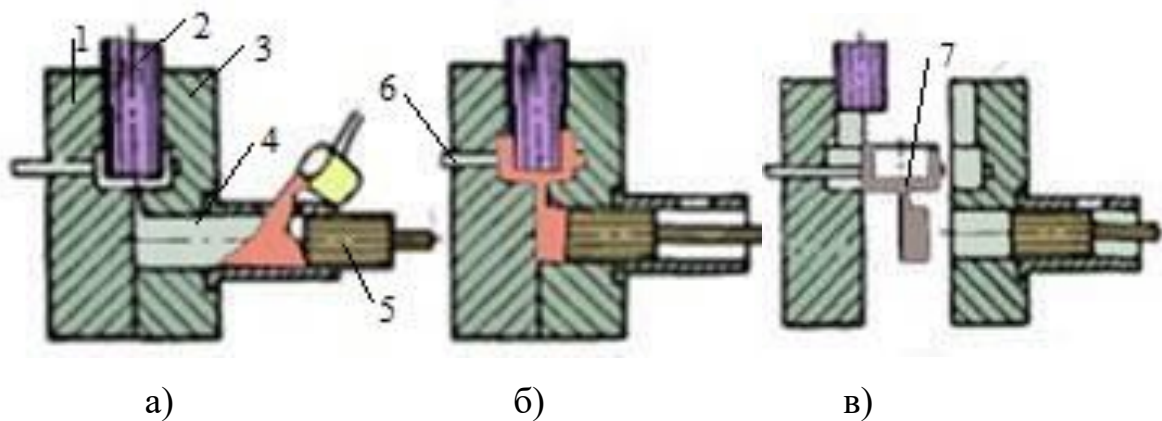


Рисунок 1.12 – Схема холодної горизонтальної камери стиснення

Переваги:

- можливість отримання складних (в тому числі армованих) виливків;
- можливість отримання тонкостінних виливків (від 0,8 мм);
- можливість отримання виливків з підготовленими отворами;
- можливість отримання виливків з написами і дрібним гравіруванням;
- висока точність розмірів;
- висока якість поверхні;
- висока продуктивність;
- можливість процесів автоматизації;
- високі механічні властивості виливків.

Недоліки:

- висока вартість технологічного оснащення;
- у великих виливках утворюється пористість.

1.2.6 Відцентрове лиття

Відцентрове лиття – процес отримання виливків шляхом заливання розплавленого металу в обертову форму, в якій виливка формується під дією відцентрової сили (інерційної сили) [8].

У більшості випадків використовуються два варіанти цього способу, при яких розплав заливають у форму з горизонтальною або вертикальною віссю обертання. У першому варіанті отримують виливки – тіла обертання малої та великої довжини, а в другому – тіла малої довжини та фігурні тіла обертання. Найпоширенішим методом є відливання порожнистих циліндричних виливків у металеві форми з горизонтальними обертовими валами. За цим методом (рис. 1.13) виливок формують у полі відцентрових сил з вільною циліндричною поверхнею, а формуюча поверхня є внутрішньою поверхнею виливниці. Обертання створюється двигуном 1. Швидкість обертання регулюється редуктором 2. Ролик 3 сприяє обертанню форми 4. Розплав із ковша заливають через наповнювач 5 у обертову форму. Розплав розтікається по внутрішній поверхні форми, утворюючи під дією поля відцентрових сил порожнистий циліндр. Після того, як метал застиг і зупинився, форма виливка знімається.

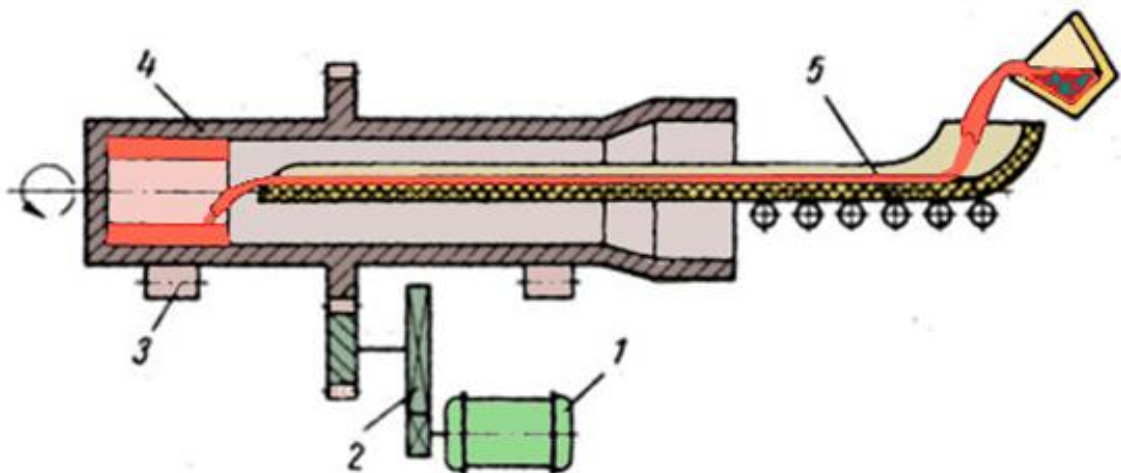


Рисунок 1.13 – Схема отримання виливки при обертанні форми навколо горизонтальної осі

Переваги:

- дрібнозерниста структура виливків;
- зменшення неметалевих включень і забруднення газом;
- для формування отвору не потрібен стрижень;
- завдяки відсутності литників, випарів, і т. п. метал можна заощадити.

Недоліки:

- складно отримати точний розмір отвору;
- збільшена ізоляція сплаву.

1.3 Аналіз способів плавки металів

Спосіб плавлення металу вибирають за температурою, при якій плавиться метал, його хімічним складом, фізико-хімічними властивостями розплаву, обсягом виробництва. При виплавці чорних металів (чавун, сталь) у ливарних цехах застосовують вагранку (чавун), електродугову піч (чавун, сталь), мартенівську піч (сталь), при виплавці сталі застосовують також кисневі перетворювачі.

Паливні та електричні печі використовують для плавки кольорових сплавів і металів. Принцип роботи: нафтогазові печі, печі опору, індукційні печі та печі спеціального призначення – електродугові, електронно-променеві, плазмові, вакуумні. Вхідними металевими матеріалами для отримання сплавів при всіх способах виплавки є злитки і феросплави (продукція металургійного виробництва), металобрухт, дефектування власного виробництва, виливки, металева стружка в металообробних цехів. [9].

Далі будуть розглянуті основні схеми і особливості плавки чорних та кольорових металів.

1.3.1 Електрична муфельна піч

Електрична муфельна піч (рис. 1.14) являє собою піч з нагрівальним боксом 6, муфельну камеру 8, всередині камера виготовлена з жаростійкого

матеріалу (кераміка, шамотна цегла, азбестові плити, корунд) та електронагрівальним елементом всередині 9. Корпус печі 7 багатощаровий і має ізоляційний шар для підтримки високої температури в печі. Дверцята печі 12 повинні бути щільно закриті, забороняється використання печі без дверцят. Піч має широкий діапазон робочих температур від 100°C до 2000°C. За допомогою програмованого контролера 1 можна точно вибрати необхідну температуру, час витримки, відкрити вентиляцію, вмикання та вимикання печі. У більшості випадків ці печі використовуються для термічного випалу кераміки та термічної обробки металів. За допомогою муфельної печі можна плавити метал, гартувати та відпускати метал, зварювати кольорові метали. Вони також використовуються для аналізу та досліджень, а також для вирощування монокристалів.

Під дією електричного струму спіраль, розташована в середині муфельної печі, нагрівається, тим самим нагріваючи всю піч. Є можливість використовувати термопару та контролер, що містять програми для контролю та регулювання температури. Для розплавлення металу в муфельній печі необхідний тигель, тобто ємність, щоб запобігти розповсюдженню металу в печі і полегшити операцію під час лиття. Тигель, як правило, повинен бути виготовлений з матеріалу, який не вступає в реакцію з розплавленим матеріалом і не буде впливати на його склад. Температура плавлення або руйнування матеріалу, з якого виготовлений тигель, повинна бути вищою за температуру плавлення матеріалу в тиглі [10].

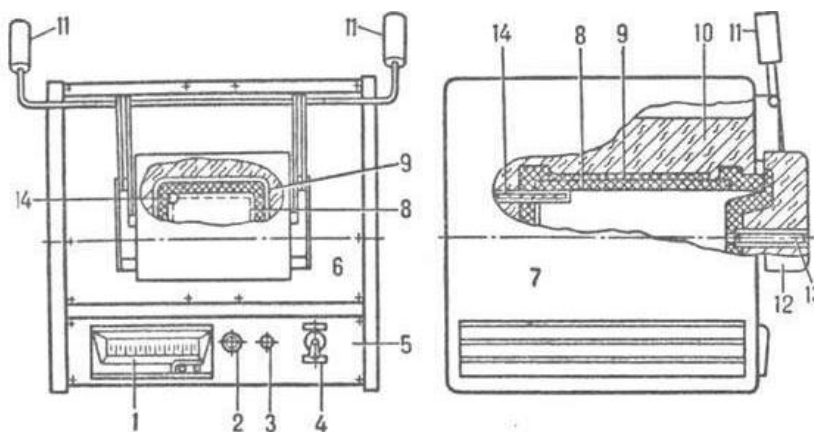


Рисунок 1.14 – Схема муфельної печі

Після аналізу типу печей була обрана електрична муфельна піч, оскільки вона має такі переваги:

- малі розміри та вага;
- наявність матеріалів при використанні;
- низька вартість комплектуючих;
- легкий та зрозумілий принцип роботи;
- високий ресурс;
- легка в обслуговуванні;
- тиха робота;
- робочі температури з широким діапазоном;
- можливість використовувати у лабораторії.

1.4 Аналіз аналогічних конструкцій

За способом укладання заготовок муфельні печі поділяють на вертикальні завантажувальні (рис. 1.1 5а) і горизонтальні завантажувальні (рис. 1.15 б). Їх принципи роботи схожі, але вертикально завантажувальна піч легша для обробки кераміки, тому вона дуже популярна серед художників-керамістів. Використання муфельної печі з горизонтальним завантаженням зручніше для роботи з металами та для дослідницьких робіт. При роботі з розплавленими металами робити завантаження та вивантаження тиглів є зручнішим.



а



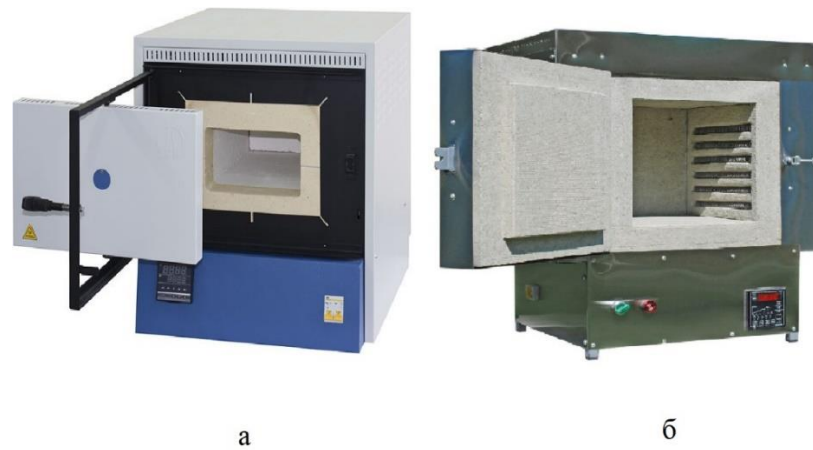
б

а) муфельна піч з вертикальним завантаженням;

б) муфельна піч з горизонтальним завантаженням.

Рисунок 1.15 – Печі з різними типами завантаження

Розглянемо муфельні печі подібної конструкції. На рис. 1.16 показано два типи муфельних печей. Нагрівальний елемент розташований всередині муфелю (рис 1.16 а) та з розташуванням нагрівального елемента на зовнішніх стінках муфельної печі (рис. 1.16 б). На рис. 1.16 а зображено лабораторну муфельну піч ЛФ-7/11-В2, вона має керамічну муфельну камеру та нагрівальний елемент на зовнішній стінці, що виготовлений із фехралі марки Х23Ю5Т. Об'єм камери складає 7 л., витримує температуру до 1100 °С, потужність складає 3.3 кВт. Вона також має терморегулятор, кнопки керування температурою, дисплей з підсвічуванням. На рис. 1.16 б зображено муфельну піч МПК-27-1300 призначена вона для термічної обробки керамічних та порцелянових виробів. Муфельна камера виготовлена з ШВП плит. Розташований всередині нагрівальний елемент виготовлений з фехралі марки Х23Ю5Т. Об'єм муфельної камери складає 27 л. Піч здатна працювати при температурі до 1300 °С. Управляється терморегулятором ОВЕН ТРМ251. Для управління температурним режимом має кнопки та дисплей з підсвіткою. Номінальна потужність печі 3.5 кВт [13], [14].



- а) розташування нагрівальних елементів на зовнішніх стінках муфелю;
 б) розташування нагрівальних елементів всередині муфелю.

Рисунок 1.16 – Розташування нагрівальних елементів

Приведені муфельні печі сильно відрізняються своєю будовою. Дуже важливу роль відіграє розташування нагрівального елемента. При розміщенні спіралі в середині муфеля контролювати температуру дуже складно, оскільки термопара нагрівається від спіралі, і це в свою чергу дає стрибки температур. Виміряти точну поточну температуру в камері стає складно. Якщо спіраль розташована по зовнішній стороні муфеля, футеровка печі розігрівається рівномірно разом із муфелем. Таким способом розміщення нагрівального елемента можна досягти рівномірного нагріву та вимірювання температури. Точне вимірювання температури знадобиться для правильно проведених дослідів.

1.5 Висновки до розділу

У даному розділі було розглянуто актуальність лиття у виробництві радіоелектронної техніки, порівняно лиття із штамповкою і фрезеруванням. Проаналізовано види лиття та методи плавки чорних та кольорових металів. Для розробки було обрано конструкцію електричної муфельної печі та проведено аналіз аналогічних конструкцій із виділенням переваг та недоліків.

Аналізуючи типи печей було обрано конструкцію з розміщенням нагрівального елемента по зовнішній стороні муфелю.

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МУФЕЛЬНОЇ ПЕЧІ

2.1 Аналіз та розробка структурної схеми

Структурна схема муфельної печі наведена на рис. 2.1, яка складається з плати управління на програмній оболонці IDE (Integrated development environment). Плата управління Arduino Uno містить прошивку, тобто програмний код, який спеціально розроблений для регулювання температури муфельної печі. Блок-схема складається з таких елементів: блок живлення Arduino Uno, плата управління Arduino Uno, кнопка 1, кнопка 2, кнопка 3, LCD-дисплей і модуль I2C для індикації, індикатор, твердотільне реле, термопара, нагрівальний елемент.

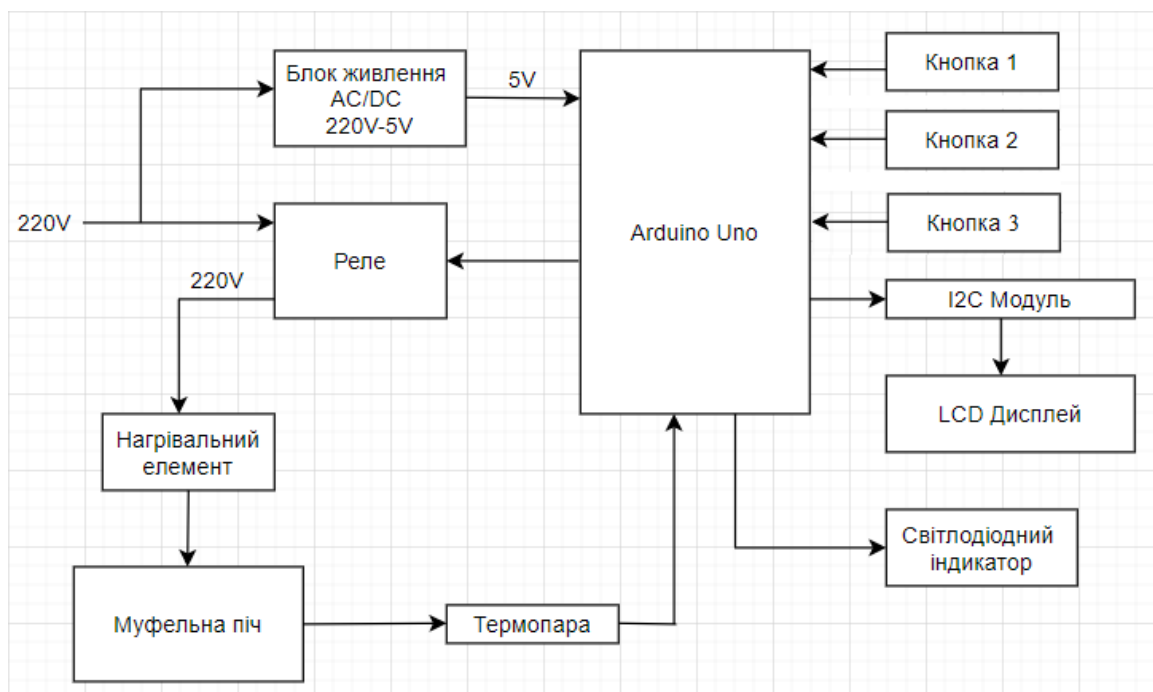


Рисунок 2.1 – Структурна схема

Розроблена система живиться від джерела живлення 220 В. Нагрівальний елемент підключається до джерела живлення через реле. Реле керується платою

управління, з одного боку, і відключає ланцюг, керований Arduino, з іншого боку. Для системи велике значення має достовірність інформації що приходить від термопари. Достовірність інформації від термопари дуже важлива для системи. Ця інформація визначає ефект нагріву. Термопара підключається до мікросхеми перетворювача сигналів MAX6675. Після того, як MAX 6675 перетворить сигнал, цей цифровий сигнал подається на плату керування Arduino Uno. Виведення інформації реалізується на дисплей LCD 1602 через зручний для підключення модуль I2C. Дві кнопки використовуються для регулювання температури, а третя кнопка використовується для вибору режиму. Коли ми встановлюємо потрібну температуру, Arduino спочатку отримує дані від термопари та аналізує їх. Якщо поточна температура нижча за встановлену, плата управління буде посилати сигнали на реле через різні проміжки часу для досягнення рівномірного нагріву печі та точного вимірювання температури в середині печі. Коли на твердотіле реле поступає сигнал від плати керування, воно замикає або розмикає ланцюг, тим самим періодично нагріваючи нагрівальний елемент. Для інформації світлодіод засвітиться, коли ланцюг замикається.

2.2 Розрахунок параметрів нагрівального елемента

Нагрівальний елемент є найважливішим елементом в печі, а матеріал з якого виготовлений нагрівальний елемент повинен відповідати багатьом вимогам.

– Технічні характеристики – матеріали повинні мати високу зварюваність і високу пластичність, оскільки з цих матеріалів виготовляють різноманітні складні форми нагрівальних елементів, а також дротів і стрічок;

– жароміцність та термостійкість – метал повинен бути стійким до газової корозії та мати опір при високій температурі;

– високий питомий електричний опір – чим вище значення опору, тим більше можна нагріти матеріал, і тим менша його довжина потрібна. Чим більше діаметр нагрівального дроту, тим довший термін його служби.

– знижений температурний коефіцієнт опору – цей фактор дуже важливий при виборі матеріалів. Низький коефіцієнт означає, що навіть при нагріванні матеріалу зміна його опору незначна.

Для виготовлення нагрівальних елементів найбільше підходять такі матеріали, як ніхром і фехраль. У свою чергу, вони дуже популярні. Використовується для виготовлення нагрівачів з використанням нікель-хромових сплавів, що містять від 55% до 78% нікелю (Ni), від 15% до 23% хрому (Cr), 1,5% марганцю (Mn) та іншого заліза (Fe). Використовуйте наступні марки нікель-хромового сплаву X20H80-найпопулярнішої марки нікель-хромового сплаву, який містить 20% хрому (Cr) і 78% нікелю (Ni). Сплав має питомий опір 650 Ом/мм², робочу температуру 1100°C, температуру плавлення до 1300°C. X15H60 містить нікелю (Ni) 60%, хрому (Cr) 15%, заліза (Fe) 24%. Сплав має питомий опір 675 Ом/мм² і температуру плавлення 1390°C. X15H60-H і X20H80-H мають однакову марку, але -H означає нікель-хромовий сплав з додаванням цирконію (Zr). Використовується для виготовлення фехралю з питомим опором 675 Ом/мм² і температурою плавлення 1390°C. До його складу входять такі елементи, як хром (Cr), алюміній (Al), залізо (Fe) і нікель (Ni), що не перевищує 0,6%. Якщо фехраль містить менший відсоток нікелю, він дешевший, ніж ніхром. Використовуються марки, такі як X23Ю5Т, що містить заліза (Fe) від 69% до 72%. X27Ю5Т, де від 65% до 68% відповідно. X23Ю5, що містить хрому (Cr) від 21,5% до 23,5% , алюмінію (Al) від 4,6% до 5,3% заліза та нікелю (Ni) не більше 0,6%, (Fe) 70%. X15Ю5 містить хром (Cr) від 13,5% до 15,5%, алюмінію (Al) від 4,5% до 5,5%, нікель (Ni) приблизно 0,6%, заліза (Fe) приблизно 77% [11].

Переваги ніхрому:

- відмінні механічні властивості при будь-якій температурі;
- хороша обробка та пластичність;
- має відмінну зварюваність;
- немагнітний;
- не старіє.

Переваги фехралю:

- фехраль Х23Ю5Т має кращу термостійкість ніж ніхром. Дріт товщиною 6 мм працює при 1400°C;

- ціна нижче ніж ніхром, оскільки містить невелику кількість дорогого нікелю;

- володіє більшими показниками опору і резистивного нагріву.

Недоліки ніхрому:

- робоча температура нижче за фехраль;

- він дорожчий за фехраль завдяки основному компоненту нікель має високу вартість.

Недоліки фехралю:

- під час роботи, нагрівачі виготовлені з фехралі будуть подовжуватися;

- сплав магнітний, оскільки містить залізо. Фехраль іржавіє у вологому середовищі.

При розрахунку нагрівача електричної печі слід враховувати наступні вихідні дані:

- обсяг робочого простору печі;

- потужність нагрівача;

- максимальна температура яка потрібна для здійснення технологічного процесу: гартування, відпуск, спікання та плавлення.

При аналізі вибору матеріалу нагрівального елемента було обрано фехраль марки Х23Ю5Т, оскільки матеріал має найкращі експлуатаційні характеристики, які повністю відповідають умовам технічного завдання. Вартість дроту нижча, ніж у нікель-хромового сплаву, робоча температура вище, опір вище, а термостійкість краще. Тому цей матеріал більш надійний. Нагрівальний елемент буде виготовлений з фехралі марки Х23Ю5Т. Оскільки нагрівальний елемент буде встановлений з зовнішньої сторони муфелю, то для рівномірного нагріву необхідно провести розрахунок об'єму муфеля зовні. Провели вимір розмірів сторін, та отримали: ширина 200 мм, висота 130 мм та довжина 300мм [12]. Використаємо формулу для розрахунку об'єму:

$$V = H \cdot D \cdot L, \quad (2.1)$$

де H – висота;

D – ширина;

L – довжина.

Тоді отримуємо:

$$V = 130 \cdot 200 \cdot 300 = 7800000 \text{мм}^2 = 7,8 \text{ літрів.}$$

Далі для розрахунку надаємо вихідні дані:

– потрібна потужність печі $P = 2500 \text{ Вт} = 2.5 \text{ кВт}$;

– максимальна температура, до якої необхідно нагрівати нагрівальний елемент $1000 \text{ }^\circ\text{C}$;

– напруга $U = 220 \text{ В}$.

Далі використовуючи закон Ома, розраховуємо силу струму. Сила струму рахується за такою формулою:

$$I = \frac{P}{U}. \quad (2.2)$$

Тоді отримуємо:

$$I = \frac{2500}{220} = 11,363 \text{ А.}$$

Отримавши 11,363 А, можна сказати, що цього значення цілком достатньо для лабораторних робіт. Далі потрібно провести розрахунок опору нагрівального елемента.

Опір розраховується за такою формулою:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (2.3)$$

де U – напруга;

I – сила струму.

Тоді отримуємо:

$$R = \frac{220}{11,363} = 19,361 \text{ Ом.}$$

Струм відіграє ключову роль у виборі діаметру нагрівального дроту, використаємо табл. 2.1, в якій показано опір фехралю марки Х23Ю5Т в 1 метрі.

Таблиця 2.1 – Опір в 1 метрі дроту

Діаметр, мм	Опір 1 метра, Ом
1,5	0,815
1,6	0,706
2,0	0,452
2,5	0,289
3,0	0,201

Продовження таблиці 2.1

Діаметр, мм	Опір 1 метра, Ом
3,5	0,147
4,0	0,113

Оскільки через нагрівач з опором 19,361 Ом буде протікати струм 11,363 А, необхідно підібрати діаметр дроту. Вирішено, що необхідний діаметр дроту становить 1,6 мм, оскільки дріт такого діаметру легше обробляється, і не буде досить крихким. Далі необхідно розрахувати, скільки метрів дроту буде необхідно використати. Враховуючи, що підключення однофазне, скористаємося формулою:

$$L_{\text{др}} = \frac{R}{\rho}, \quad (2.4)$$

де $L_{\text{др}}$ – довжина дроту;

R – опір нагрівального елемента;

ρ – номінальне значення опору дроту на 1 метр згідно ГОСТ 12766.1-90, (Ом/м).

Тоді отримуємо:

$$L_{\text{др}} = \frac{19,361}{0,706} = 27,423 \text{ м.}$$

Підрахувавши, скільки метрів дроту буде необхідно, розрахуємо довжину дроту, що буде необхідною для одного витка. Модель муфельної камери показано на рис. 2.2, вона неправильної форми.

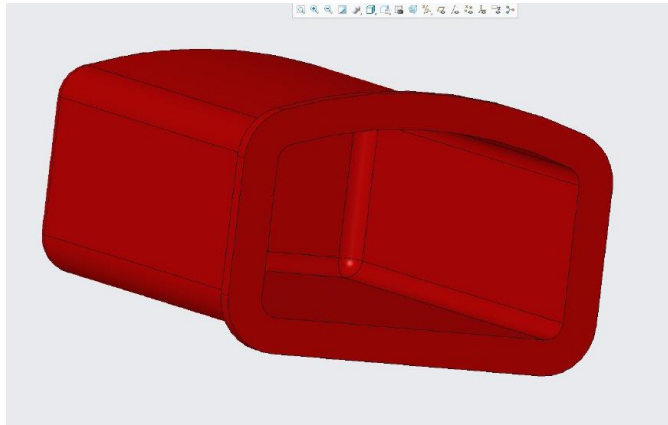


Рисунок 2.2 – Модель муфеля

Для точного розрахунку було створено модель, що зображена на рис. 2.3.

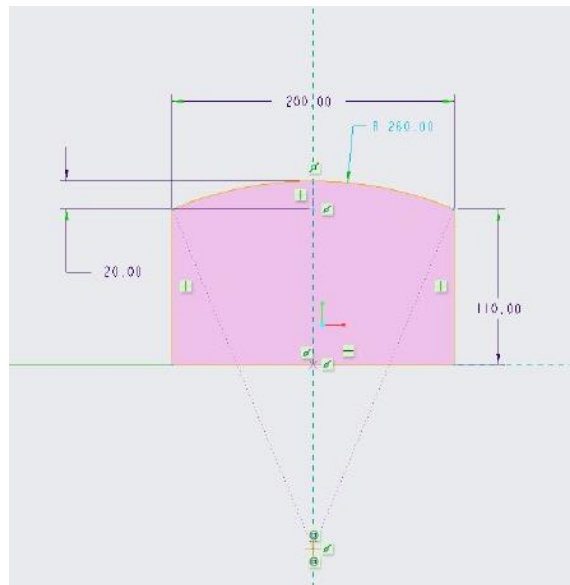


Рисунок 2.3 – Модель для розрахунку

Оскільки муфель печі неправильної форми, а також має випуклу форму згори, провели розрахунок довжини одного витка за формулою:

$$L_B = 2b + a + R \cdot \frac{\alpha\pi}{180}, \quad (2.5)$$

де L_B – довжина витка;
 b – висота стінок муфеля;
 a – ширина муфеля;
 R – радіус кола;
 α – кут.
Тоді отримуємо:

$$L_B = 2 \cdot 110 + 200 + 260 \cdot \frac{46 \cdot 3,14}{180} = 628 \text{ мм.}$$

Так як витки дроту покривають муфельну камеру зигзагоподібно, схема намотки зображена на рис. 2.3. Довжина одного витка склала 628 мм.

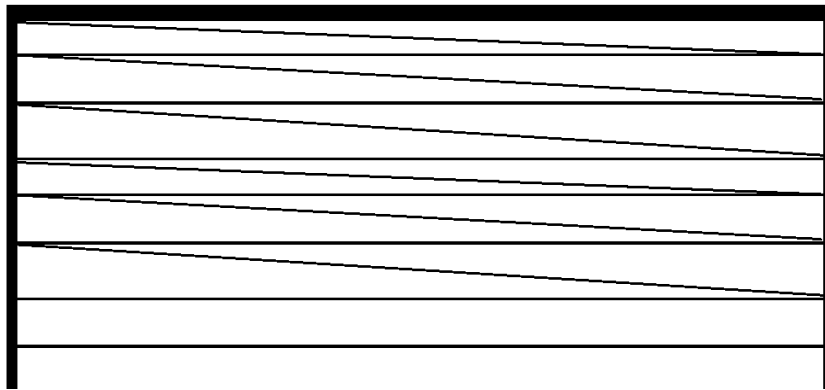


Рисунок 2.4 – Схема намотки дроту

Отримавши довжину одного витка, необхідно розрахувати, скільки витків дроту ми зможемо пройти з необхідним кроком. Маючи муфель із довжиною 300 мм, на який необхідно витратити 27,423 м дроту, і знаючи що один виток має довжину 628 мм, використаємо формулу для розрахунку

$$n = \frac{L_{\text{др}}}{L_B}. \quad (2.6)$$

Тоді отримаємо:

$$n = 43.$$

Всього буде намотано 43 витка дроту. Потім розраховуємо крок намотки дроту за формулою:

$$k = \frac{L - (1,6 \cdot n)}{n}, \quad (2.7)$$

де k – крок намотки;
 L – довжина камери;
 $1,6$ – діаметр дроту мм²;
 n – кількість витків.

Тоді отримаємо:

$$k = \frac{300 - (1,6 \cdot 43)}{43} = 5,376 \text{ мм.}$$

Отримавши крок 5,376 мм, ще потрібно врахувати, скільки дроту буде витрачено на крок за яким буде виконана намотка, та додаємо ще приблизно 5 мм та перевіряємо за допомогою теореми Піфагора

$$h_1 = \sqrt{200^2 + 5^2}. \quad (2.8)$$

Тоді отримаємо:

$$h_1 \approx 200 \text{ мм.}$$

Отримане значення 200 мм відповідає ширині муфеля розміром 200 мм. Після розрахунку обрано дріт фехраль марки Х23Ю5Т, діаметром 1,6 мм, та довжиною 27,423 м. Крок укладання дроту складає $\approx 5,5$ мм, і буде розміщено всього 43 витки, довжина одного витка ≈ 630 мм.

2.3 Розробка електричної частини

2.3.1 Вибір елементів

Муфельна піч повинна працювати під управлінням плати. Було проаналізовано види плат управління. Плати управління Arduino є доступними та популярними, вони призначені для створення різноманітних систем автоматизації. Завдяки великій кількості бібліотек, що існують, можна підключати різноманітні датчики та модулі. Простота в написанні коду програми (скетчу) також грає велику роль. Для управління роботи муфельної печі було обрано Arduino Uno (рис 2.5). Ця плата управління має високий потенціал, що знадобиться в майбутньому [22].



Рисунок 2.5 – Arduino Uno

В якості реле, було обрано напівпровідникове твердотіле реле Fotek SSR – 40 DA (рис 2.6), у порівнянні зі звичайними електромагнітними, воно є безшумним. В електромагнітному реле в процесі подачі струму управляючим засобом на котушку, з'являється електромагнітне поле, і контактна рейка притягується, тим самим утворюючи іскри під час контакту. Це унеможливило використання електромагнітних реле у вибухонебезпечних середовищах. В твердотілих реле іскри не виникають, тому що воно працює на транзисторах, симисторах, тиристорах та внаслідок чого під час перемикання іскри не виникають. Твердотіле реле не має механічного зносу і як наслідок, має більший термін експлуатації.



Рисунок 2.6 – Твердотіле реле

FOTEK SSR – 40 DA це однофазне реле з діапазоном робочої напруги від 24 до 380 Вольт і змінним струмом до 40 А. Сигнал управління подається від 3 до 32 Вольт, а постійний струм становить 7,5 мА, що дає можливість подавати керуючі сигнали з плати управління.

Для вимірювання температури в муфелі використовується модуль, що складається з термопари ТХА (тип-К) і перетворювача сигналів МАХ6675. Термопара виготовлена з двох дротів хромель – алюмель, що поміщені в керамічний захисний чохол (рис 2.7 а). Вона здатна витримувати до 1300 °С. На одному кінці термопари є металевий спай, що вимірює температуру. Якщо місце спаю нагрівати, то під дією теплової ЕРС по дротах буде протікати струм. Цей струм буде прийматися перетворювачем для термопари МАХ6675 (рис 2.7 б), який виводить цифровий сигнал, що подається на плату керування.



а) термопара ТХА; б) перетворювач МАХ6675.

Рисунок 2.7 – Модуль для вимірювання температури

Плата управління виводить інформацію на модуль, що складається з РК-дисплею LCD 1602 та I2C адаптеру (рис 2.8). Дисплей може відображати 16 символів в строку та 2 символи у стовбець. Він доступний, недорогий, має яскраве підсвічування, що дуже підходить для відображення необхідної інформації, а саме: поточної температури в муфелі, заданої температури та інформації, яка показує чи працює нагрівальний елемент в даний час. I2C адаптер

необхідний для скорочення 16 виводів з дисплею до 4 з яких 2 це живлення, він припаюється до дисплею щоб не займати вільні піни на платі керування.



а



б

а) дисплей LCD 1602; б) I2C адаптер.

Рисунок 2.8 – Дисплейний модуль

2.3.2 Виготовлення макету

Використано циліндричний металевий корпус, що встановлений на металеву підставку.

Оскільки корпус повинен мати гарний естетичний вигляд та при роботі його поверхня не повинна псуватись від високих температур, його було пошліфовано та пофарбовано термостійкою фарбою.

Муфель, що був взятий зі старої муфельної печі ПМ-8, виготовлений із жаростійкої кераміки але він мав недоліки у вигляді тріщин. Тріщини дають неможливість досягти якісної теплоізоляції, а кераміка може тріснути при роботі при високих температурах. При ремонті потрібний спеціальний жаростійкий клей. Його використовують для ремонту та виготовлення муфельних печей. Розрахований він витримувати до 1400 °С, і відповідає умовам технічного завдання. Щілини були заповнені клеєм та просушені.

Після висихання муфельної камери, було намотано дріт з фехралі марки Х23Ю5Т з діаметром 1.6 мм (рис 2.9). Дротяну обмотку необхідно робити дуже обережно, без перекосів. Для кращої теплопровідності дроти повинні розташовуватися близько до муфельної камери.



Рисунок 2.9 – Фехралева обмотка

Щоб не допустити зміщення обмотки при її розширенні, щоб не виникло короткого замикання і не вигоріти обмотку, необхідно щільно укріпити витки за допомогою суміші із жаростійкого клею та шматочків пічного фетру. Додали шматки фетру до жаростійкого клею, отримали необхідну консистенцію. Покриття буде дуже надійним, завдяки сполучним шматкам фетру, та при нагріві дріт не буде зміщуватися.

Після того, як муфельна камера висухла при кімнатній температурі, її було розміщено на електроплиті, та проводили сушку ще кілька годин, для того, щоб зайва волога випарувалася. Для підтримки температури в камері необхідно зробити якісне утеплення. Після аналізу типу ізоляції, вибрано керамічне волокно (фетр). У порівнянні з іншими утеплювачами цей матеріал новий, сучасний і технологічний. Фетр має наступні переваги:

- стійкість до хімічних рідин, олів і води;
- витримує температуру до 1600 °С та не горить;
- низька теплоємність;
- низька теплопровідність;
- довгий термін експлуатації.

Інші теплоізоляційні матеріали, такі як базальтова вата (до 500 °С), шлаковата (до 600 °С), скловата (до 700 °С), сипучий вермікуліт (до 1200 °С), керамзит (плавиться при 1300 °С), приведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Термостійкість теплоізоляційних матеріалів

№	Вид матеріалу	Термостійкість, °С
1	Базальтова вата	500 °С
2	Шлаковата	600 °С
3	Скловата	700 °С
4	Вермікуліт	1200 °С
5	Керамзит	1300 °С
6	Керамоволокно	1600 °С

Наступним етапом є установка муфельної камери в корпус, теплоізоляція керамоволокном. Для кращої теплоізоляції є необхідним щільно утрамбовувати, заповнити усі пусті місця фетром. Фетр відмінно обробляється, ріжеться канцелярським ножом. Проведено теплоізоляцію фетром (керамоволокном).

Для того, щоб легко встановити LCD1602 і кнопки управління в печі, було вирішено зробити 3D-модель панелі (рис. 2.10) і роздрукувати її на 3D-принтері.

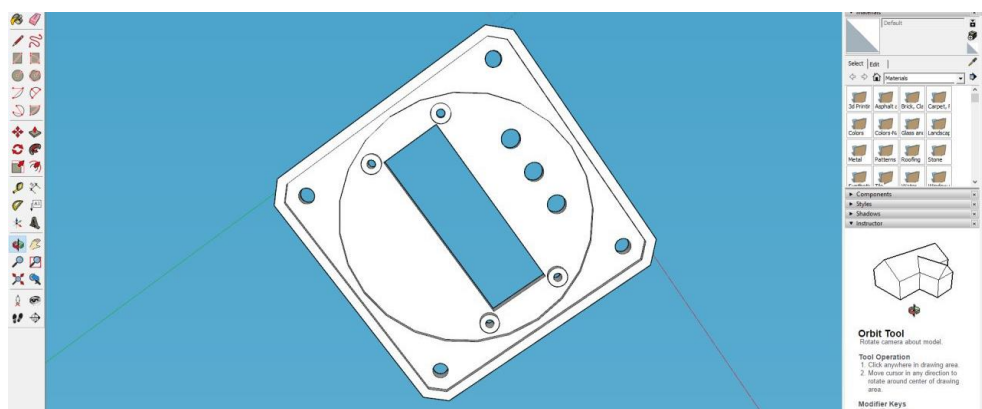


Рисунок 2.10 – Модель панелі

Модель у форматі STL надсилається в програму нарізки, а отриманий G-код надсилається до принтеру та друкується

Обробили надруковану панель за допомогою наждачного паперу та пофарбували для гарного зовнішнього вигляду, встановили елементи LCD дисплей, три кнопки. Панель та світлодіодний індикатор встановили у кронштейн печі (рис.2.11). Панель встановлена на передній стороні за допомогою чотирьох гвинтів М3. Світлодіодний індикатор встановлений з передньої сторони, закріплений за допомогою гвинтів М2.



Рисунок 2.11 – Встановлені світлодіодний індикатор та панель

На дні корпусу є металева кришка, на неї встановлено електричну частину. На ній розташовано твердотільне реле, блок живлення, плата управління. До мережі 220 В підключається блок живлення, а плата управління підключена до блоку живлення через порт USB 5 В 1А. Виводи GND світлодіодного індикатора, дисплея та кнопок – підключені до блока живлення. До підставки на чотири гвинти М4 закріплено металеву кришку з електричною частиною.

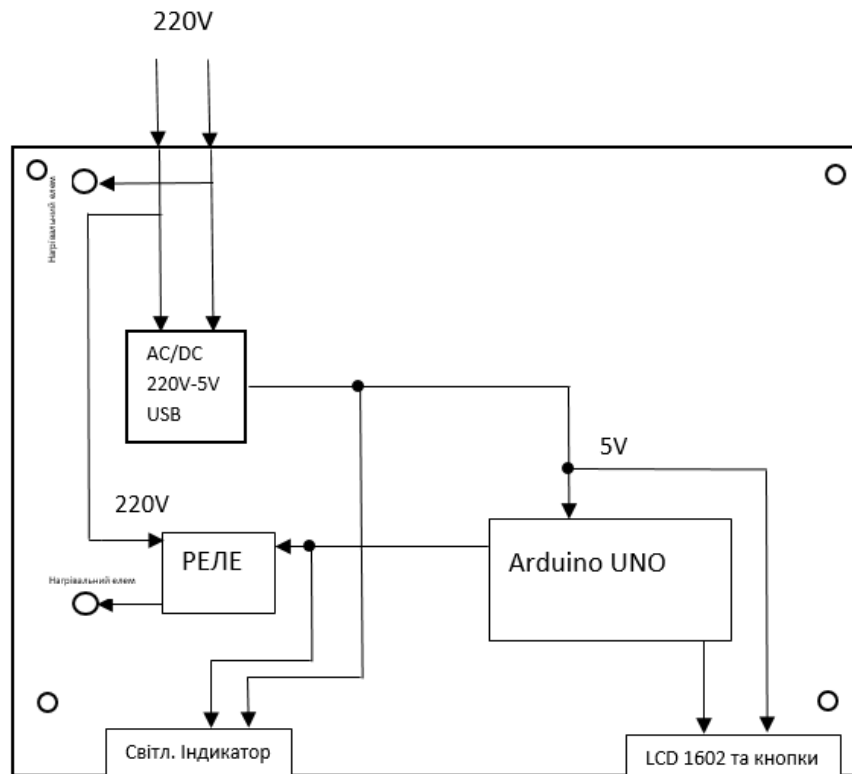


Рисунок 2.12 – Схема розташування елементів

2.4 Розробка програмної частини

Алгоритм роботи скетчу наведено у програмній частині. Відповідно до ТЗ є необхідним реалізація автоматизованого контролю, регулювання температури. За допомогою EEPROM необхідно реалізувати запам'ятовування введених даних при вмиканні печі, це – встановлена температура, гістерезис, поточна температура у камері. Програмний код наведено далі.

```
#include <max6675.h> // Бібліотека для роботи з перетворювачем температури
```

```
#include <LiquidCrystal.h> // Бібліотека для роботи з дисплеєм LCD 1602
```

```
#include <Wire.h> // Бібліотека для роботи з дисплеєм через I2C
```

```
#include <EEPROM.h> // Бібліотека для роботи з енергонезалежною пам'яттю
```

```
int thermoDO = 5; // Підключення піна DO до піна 5
```

```
int thermoCS = 6; // Підключення піна CS до піна 6
```

```
int thermoCLK = 7;// Підключення піна CLK до піна 7
double t_c,t_sum,t_iz; задаємо змінні для коректного отримання
температури
```

```
byte erom2,erom3,erom4; змінні для роботи з EEPROM
```

```
int kn1,kn2,t_reg,sh,sh1,gis; змінні для роботи з кнопками
```

```
long w; змінна для роботи з EEPROM
```

Далі у циклі описано роботу з кнопками для регулювання температури. Щоб встановити необхідну температуру, спочатку потрібно дочекатися, поки засвітиться меню reg, а потім необхідно затиснути кнопку, яку підключено до піну A0. Встановлюємо температуру утримуючи кнопку для регулювання, натиснувши кнопку підключеної до піна 12, приходиться низький рівень сигналу та реалізується збільшення температури. Кнопка що підключена до 11 піна, при її натисканні приходиться низький рівень сигналу та виставляється зменшення температури. На дисплей виводиться вся інформація про регулювання температури.

```
void loop(){
if(analogRead(A0)>600){kn1++;delay(300);}if(kn1==3){kn1=0;}// меню
if(kn1==1){ // меню регулювання температури
if(digitalRead(12)==LOW){sh++;if(sh<=10){t_reg++;}if(sh>10&&sh<=100)
{t_reg=t_reg+10;}}else{sh=0;}//Зчитування низького рівня сигналу піну 12
if(digitalRead(11)==LOW){sh1++;if(sh1<=10)
{t_reg--;}if(sh1>10&&sh1<=100)
{t_reg=t_reg-10;}}else{sh1=0;}//Зчитування низького рівня сигналу піну 11
lcd.setCursor(0,0); // вивід інформації на екран
lcd.print("reg = ");lcd.print(t_reg);lcd.print((char)223);
lcd.print("C");delay(200);
if(t_reg<=0){t_reg=0;}if(t_reg>=1000){t_reg=1000;}
erom2=t_reg/100; // записування до EEPROM
erom3=t_reg-((t_reg)/100)*100;w=0;}
if(kn1==2){ // меню гістерезис
```

```

if(digitalRead(3) == LOW){gis=gis+1;} // збільшення гістерезису на 1 градус
if(digitalRead(2) == LOW){gis=gis-1;} // зменшення гістерезису на 1 градус
if(gis>=10 || gis<0){gis=0;}
lcd.setCursor(0,0); // вивід інформації на екран
lcd.print("gis = ");lcd.print(gis);lcd.print((char)223);lcd.print("C");delay(300);
  erom4=gis;w=0;}
if(kn1==0){w++;if(w==1){EEPROM.update(2,erom2);
EEPROM.update(3,erom3);EEPROM.update(4,erom4);}// запис до EEPROM
lcd.setCursor(0,0); // вивід інформації на екран
lcd.print("T = ");lcd.print(t_iz,1);lcd.print((char)223);lcd.print("C ");
lcd.setCursor(0,1);lcd.print("reg=");
lcd.print(t_reg);lcd.print(" gis=");lcd.print(gis);
for(int i=0;i<5;i++)
  {t_c=thermocouple.readCelsius();
  t_sum=t_sum+t_c; delay(200);}
  t_iz=t_sum/5;t_sum=0;}
if(t_reg >= t_iz + gis){digitalWrite(13,HIGH);} // Відкриття реле
if(t_reg <= t_iz - gis){digitalWrite(13,LOW);} // Закриття реле
lcd.clear();} Очищення екрану

```

2.5 Керування роботи муфельної печі

На рис. 2.13 приведено робочий дисплей. На ньому на першій строчці зображено поточну температуру в камері $T = 199.9$ °C. На другій строчці зображено встановлена температура reg (регулювання) = 200 °C. Відповідно до ТЗ мінімальне та максимальне значення встановлюється від 1 °C до 1000 °C. Щоб увійти до меню налаштувань, необхідно натиснути та утримувати центральну зелену кнопку, її розташовано інтуїтивно. Натиснувши та утримуючи кнопку меню – регулюємо температуру за допомогою кнопок, які розміщені праворуч та ліворуч від центральної. Ліва синя кнопка (холодний колір) необхідна для

зменшення температури та значення гістерезису, та права червона (гарячий колір) для збільшення температури та значення гістерезису. Меню регулювання температури зображено на рис. 2.14 та меню налаштування порогу гістерезису (gis) зображено на рис. 2.15.



Рисунок 2.13 – Робочий дисплей



Рисунок 2.14 – Меню встановлення робочої температури



Рисунок 2.15 – Меню встановлення порогу гістерезису

Для управління та для нормального утримання температури реалізовано гістерезис. Задаються значення від 1 °С до 10 °С, цього є цілком достатньо.

Наприклад, якщо встановлено температуру (reg) на 300 °С, то піч нагріється до 309 °С завдяки встановленого шагу гістерезису 9 °С та вимкнеться. Весь наступний час піч буде холонуть та почне нагріватись, коли температура в камері буде менше заданих 300°С, тобто при 299 °С. Підтримка температури буде проводитись в діапазоні значень 299 °С – 309 °С. Графік зображено на рис. 2.16. При досягненні високих температур, цей інтервал у 10 °С підтримує стабільність температурного режиму, та ніяк не впливає на нього.

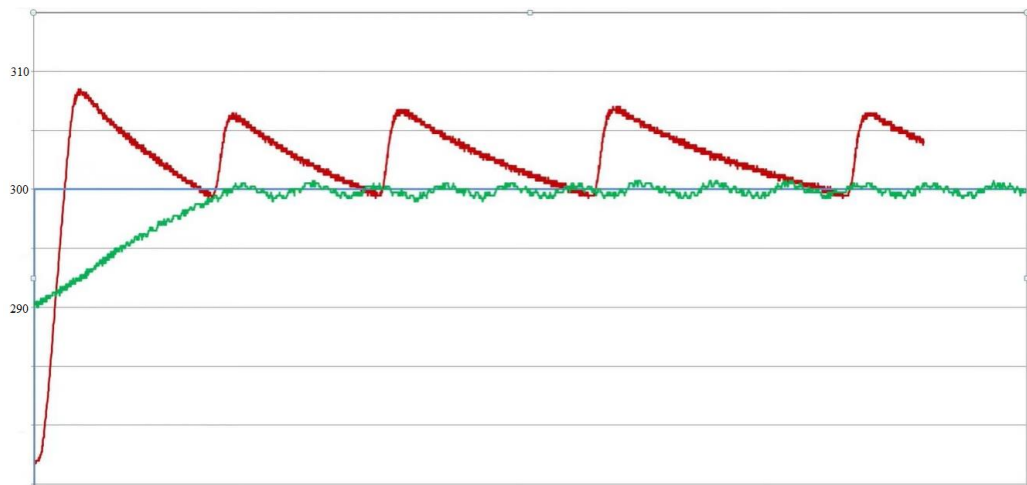


Рисунок 2.16 – Гістерезис температури

2.5 Висновки до розділу

В даному розділі було розроблено структурну схему муфельної печі та описано її роботу. Проаналізовано види матеріалів що використовуються для виготовлення нагрівальних елементів, за перевагами та недоліками було обрано необхідний матеріал для його виготовлення. Проведено розрахунок об'єму камери печі, розрахунок необхідної довжини нагрівального елемента та метод намотки. Проаналізовано види плат управління, обрано плату Arduino Uno завдяки високому потенціалу. Було обрано твердотіле реле, термопару та дисплей з I2C адаптером. Виготовлено макет печі із використанням кращих матеріалів. Розроблено програмний код для управління піччю та описано керування її роботою. Для стабільності підтримки температури було реалізовано гістерезис.

3 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ЛИВАРНИХ ВИРОБІВ

3.1 Види дефектів лиття

Усі дефекти що існують можна умовно поділити на видимі та невидимі. Усі видимі дефекти є можливість виявити при зовнішньому огляді або за допомогою інструментальних засобів наприклад за допомогою рентгенівської дефектоскопії. Тобто усі дефекти що можна побачити зовнішнім оглядом або за допомогою засобів є видимими. Невидимі дефекти не можуть бути виявлені за допомогою зовнішнього огляду або за допомогою деяких засобів. Ці дефекти можна виявити лише після механічної обробки, або в процесі експлуатації, тесту литої деталі.

Існує декілька груп дефектів, а саме невідповідність по геометрії, по розміру і масі відливку відносно заданих розмірів, дефекти поверхні, об'ємні дефекти у тілі відливку, що порушують її несущість. Невідповідність хімічного складу (включення) та структури відливку.

Невідповідність геометричних розмірів відливку може бути наслідком неправильно визначеної усадки при виготовленні модельного комплекту, а також через неточну збірку форми. Запобігти таких дефектів можна за допомогою переробки модельного комплекту, та покращенням точності збірки форм.

Невідповідність маси відливку найчастіше виникає теж через невідповідність розмірів, а збільшення маси можливе через деформацію форми при заливці рідким металом.

Спай (рис. 3.1 а) та недолив (3.1 б) утворюються від потоків металу, що не злилися, втратили рідкотічність до заповнення всієї форми. Такі потоки виходять при заливанні форми недостатньо прогрітим металом, через живильники малого перерізу, при надмірно вологій формувальній суміші (в тонкостінних виливках).



а) спай; б) недолив.

Рисунок 3.1 – Дефекти спай та недолив

Затоки на виливку зображено на рис. 3.2, вони виникають зазвичай по роз'єму форми внаслідок зношеності опок, їх короблення, а також через погане кріплення форми.



Рисунок 3.2 – Затоки на виливку

Перекіс (рис. 3.3) у відливках утворюється при недбалому складанні форми в результаті зміщення напівформи або неправильного центрування опок, через знос втулок і штирів, невідповідності знакових частин стрижня на моделі і в стрижневому ящику. Виливок виходить зі зміщеними частинами.

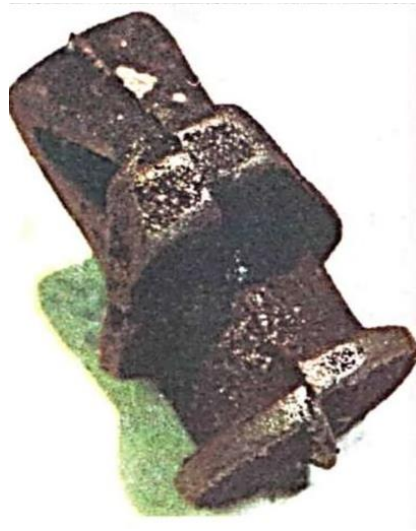


Рисунок 3.3 – Перекіс

Пригар – міцне з'єднання поверхні виливків з формувальною або стрижневою сумішшю утворюється внаслідок недостатньої вогнетривкості формувальних матеріалів, їх засміченості шкідливими домішками, поганій якості ливарних фарб, недостатнього ущільнення форми, зображено на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Пригар

Гарячі тріщини (рис. 3.5) виникають у виливках при високій температурі металу, що заливається, підвищеній усадці виливки, неправильній конструкції ливникової системи і прибутків, при поганій податливості стрижня форми, неправильній конструкції ливникової системи і прибутків, при поганій податливості стрижня і форми, неправильній конструкції відливків, нерівномірному охолодженні що викликають внутрішні напруги у виливку, а

також при відхиленнях хімічного складу металу від заданого. Гарячі тріщини мають темну окислену поверхню.



Рисунок 3.5 – Гарячі тріщини

Холодні тріщини (рис. 3.6) можуть бути наслідком як нерівномірної усадки окремих частин виливка, так і просто механічних пошкоджень при вибиванні та очищенні. Холодні тріщини мають світлу металеву не окислену поверхню. Для усунення холодних тріщин необхідно забезпечувати рівномірне охолодження виливки у тонких та потовщених місцях.



Рисунок 3.6 – Холодні тріщини

Газові раковини – порожнечі в тілі виливки, що мають чисту та гладку поверхню (рис 3.7). Вони бувають відкриті (зовнішні) або закриті (внутрішні) і виникають при надмірній газотвірності та недостатній газопроникності

формування суміші, поганої вентиляції форми та стрижня або неправильної її будови, низькій температурі металу, що заливається, погано просушеної форми і стрижня, високому вмісту газів у металі, неправильному підводу металу та ін. Встановлення цих причин знижує можливість утворення газових раковин.



Рисунок 3.7 – Газові раковини

Пісочні раковини (рис. 3.8) виникають внаслідок низької міцності та вологості формувальної суміші, недостатньої поверхневої міцності стрижня, слабкого ущільнення та поганої продувки форми стисненим повітрям перед її збиранням; крім того, окремі грудки і піщинки змиваються струменем металу під час заливання і заносяться у виливок. Цей дефект можна усунути нормальним ущільненням форми, ретельним її продуванням перед складанням, ретельним оздобленням ливникової воронки; не слід допускати тривалого вистоювання форми перед заливкою.

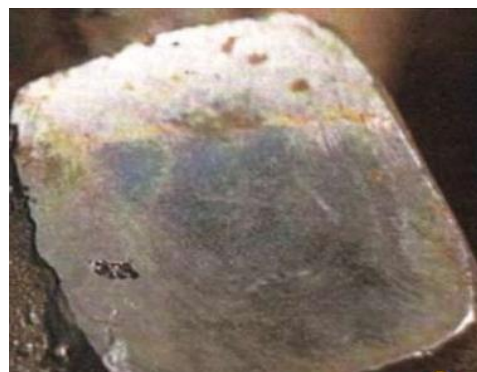


Рисунок 3.8 – Пісочні раковини

Шлакові включення (рис. 3.9) можуть знаходитися всередині тіла виливку або на її поверхні. Шлакові раковини (включення) завжди повністю або частково заповнені шлаком, що потрапляє у виливок під час заливання металу у форму. Вони утворюються внаслідок недостатньо ретельного очищення розплаву від шлаку в ковші, низької вогнетривкості футерування ковшів і неправильної конструкції ливникової системи.

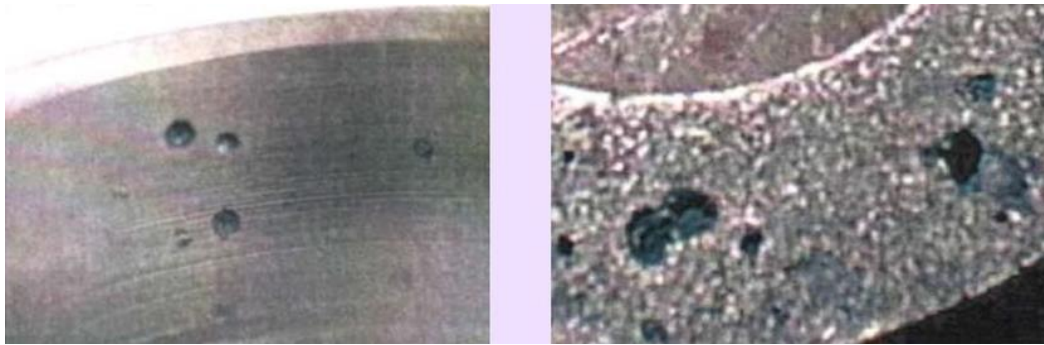


Рисунок 3.9 – Шлакові включення

Усадкові раковини (рис. 3.10) виникають внаслідок недостатнього живлення масивних вузлів виливки, нетехнологічної конструкції виливків, неправильної установки ливників і прибутків, заливки надмірно перегрітим металом, а також підвищеної усадки. Усадочні раковини мають неправильну форму і шорстку поверхню, здебільшого окислену.



Рисунок 3.10 – Усадкові раковини

Рихлість та усадочна пористість у виливках (рис. 3.11) утворюються при недостатньому живленні виливки рідким металом у процесі кристалізації, а також у потовщених місцях виливки. Для виключення місцевої рихлості рекомендують у потовщених місцях виливки ставити холодильники, змінювати конструкцію виливка, вирівнювати товщину її стінок.



Рисунок 3.11 – Рихлість та пористість

Невідповідність хімічного складу металу виливків заданому може статися внаслідок неправильного зважування шихтових матеріалів, змішування різних сортів матеріалів, неправильного ведення процесу плавки. Щоб усунути дефект за хімічним складом, необхідно контролювати вихідні шихтові матеріали, суворо дотримуватись порядку їх зважування, стежити за ходом плавки.

Невідповідність (погіршення) механічних властивостей виливків спостерігається зазвичай при невідповідності хімічного складу та структури металу до заданих параметрів.

3.2 Аналіз параметрів що впливають на виникнення дефектів.

Автоматизацію процесу роботи електричної муфельної печі слід розглядати за двома методами її використання, а саме – плавка металів для їх подальшого лиття, термічна обробка металів та їх сплавів. Для плавки основних

металів що будуть використовуватись у подальших дослідах необхідно привести температурні параметри. Основними матеріалами є олово, свинець, цинк, алюміній, срібло, золото, мідь. Їх температуру плавки приведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Температура плавки основних матеріалів

Матеріал	Температура плавки
Олово	+232 °C
Свинець	+327 °C
Цинк	+420 °C
Алюміній	+660 °C
Срібло	+960 °C
Золото	+1063 °C
Мідь	+1083 °C

Для лиття металів найбільш важливими параметрами також є температура кінцевого нагріву та профіль нагріву. Профіль нагріву повинен бути ступінчатий, поступовий. Така діаграма нагріву є дуже важливою, так як при різкому нагріві матеріал буде складно нормально прогріти завдяки тому що датчик температури встановлений всередині муфелю та вимірює температуру камери а не самого матеріалу. Також при різкому нагріві датчик температури може некоректно фіксувати температуру і через це можливе виведення печі з ладу. Тому для проведення експериментів доцільним є ступінчатий профільний нагрів та витримка на певній температурі для нормального прогріву матеріалу та більш адекватного виміру температури. Усе це необхідно закласти до програмного забезпечення муфельної печі. Існують такі види термічної обробки металів як гартування, відпал, відпуск, нормалізація.

Гартуванням називають нагрів до високої температури, витримки і швидкого охолодження (у воді, мінеральній оліві та інших охолоджувачах). Гартування сталей забезпечує приріст твердості, виникнення внутрішніх напружень, зменшення пластичності. Твердість збільшується у зв'язку з

виникненням таких структур: сорбіт, троостит, мартенсит. Практично загартуванню піддаються середньо- і високовуглецеві сталі. Для гартування сталей дуже важливим є температура нагріву та ступеневий профіль нагріву а також подальший контроль охолодження в деяких охолоджувальних рідинах.

Відпал – вид термообробки, який полягає в нагріванні матеріалу до температури вище критичної точки, тривалій витримці за цієї температури і подальшому повільному охолодженні.

Відпуском називають нагрівання до температури нижчої за 700°C , витримання та повільне охолодження на повітрі. Розрізняють три види відпуску: низький (нагрівання до температури 200°C ; середній ($300^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$); високий ($500 - 700^{\circ}\text{C}$). Після відпуску певною мірою зменшується твердість і внутрішні напруження, збільшується пластичність і в'язкість сталей. До цього приводить зміна структур після відпуску. Чим вища температура відпуску, тим менша твердість відпущеної сталі і тим більша її пластичність та в'язкість.

Відпуск, в основному, проводять після загартування для зняття внутрішніх напружень. Низький відпуск застосовують при виготовленні різального інструменту, вимірювального інструменту, цементованих деталей; середній – при виробництві ковальських штампів, пружин, ресор; високий – для багатьох деталей, що зазнають дії високих напружень (осі автомобілів, шатуни тощо). Для відпуску край важливим також є діаграма поступового ступеневого охолодження для нормалізації кристалічної решітки матеріалу.

Нормалізацією називають нагрівання до високої температури, витримки і повільне охолодження на повітрі. Нормалізація доводить сталь до дрібнозернистої та однорідної структури. Твердість і міцність сталі після нормалізації вищі, ніж після відпалу.

3.3 Експериментальні дослідження

Для проведення дослідів по литтю металевих моделей є необхідним використання прототипів моделей, що були виготовлені за допомогою 3D-друку.

За наявності можливості, було використано лабораторний 3D-принтер та виготовлено моделі з PLA філаменту. Цей найпопулярніший вид пластику є досить дешевим та доступним у порівнянні з іншими пластиками. Він є екологічним, безпечним та не має неприємного запаху при використанні. PLA пластик починає плавитись при температурі 170° С, повністю згорає при 400° С. Ці параметри дозволяють виплавляти пластик з виготовленої форми без диму та запаху. Виготовлено модель, що зображена на рис. 3.12.



Рисунок 3.12 – Надрукована модель

Далі є необхідним виготовлення форми. Для цього використали формувальний жаростійкий гіпс марки ГВВС-16. Він у своєму складі має високоміцний гіпс (25–40%), вогнетривкі наповнювачі. Ця суміш є популярною у використанні у машинобудуванні, авіабудуванні а також у ювелірній промисловості. Ця суміш здатна витримувати температури до 1100 ° С без появи дефектів у вигляді тріщин. Згідно з інструкцією замішали гіпс та обмазали модель (рис 3.13), таким способом можна запобігти появи пазирів та точно заповнити усі елементи моделі.



Рисунок 3.13 – Загіпсована модель

Далі за допомогою формувальної суміші піску та рідкого скла було виготовлено ливникову воронку (рис. 3.14) та оболонку гіпсової форми для того, щоб був рівномірний розподіл температури та при заливанні розплавленого металу при стрибку температури не з'явилося дефектів у вигляді тріщин.



Рисунок 3.14 – Ливникова воронка

Прогріли форму разом з ливниковою воронкою та розташували воронку на заливній формі, помістили у відро з піском (рис 3.15). Пісок рівномірно утримує температуру та сповільнює час застигання рідкого металу, тим самим дозволяє запобігти утворенню дефектів як усадка.



Рисунок 3.15 – Форма з ливниковою воронкою

Відходи алюмінію у вигляді обрізків було використано для лиття. Розплавлюємо їх у сталюму тиглі при температурі $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, так як алюміній різносортовий та деякі шматки можуть не розплавитись (рис 3.16).

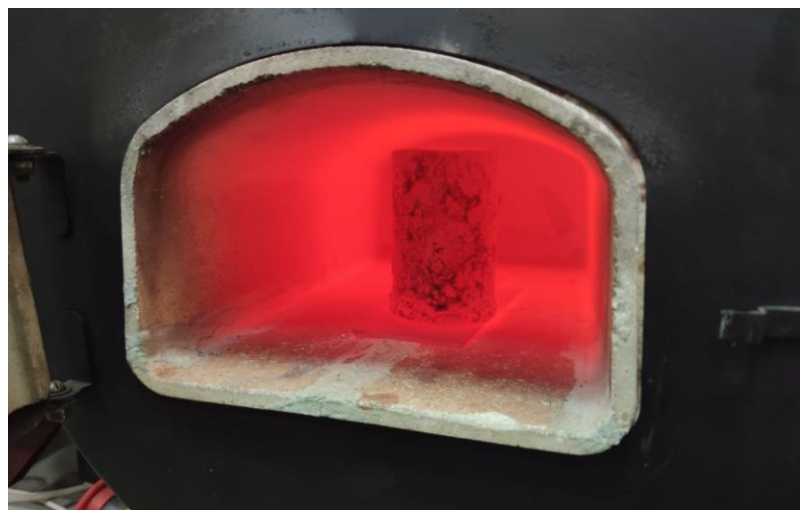


Рисунок 3.16 – Плавка

Діставши тигель з розплавленим металом зібрали шлакові відходи сталеву ложку та залили рідкий метал у підготовлену форму. Через 10 хвилин, після того як алюміній застиг дістали форму з піску, охолонувшу форму помістили у відро з водою та роздробили форму, отримали вилівок фігури що зображений на рис. 3.17.



Рисунок 3.17 – Виливок фігури

Відрізавши ливниковий канал стало помітно, що завдяки використанню різносортового алюмінію та добре зібраному шлаку, без використання борної кислоти отримали міцний відливок без утворення пористості. Поверхню зрізу зображено на рис. 3.18.

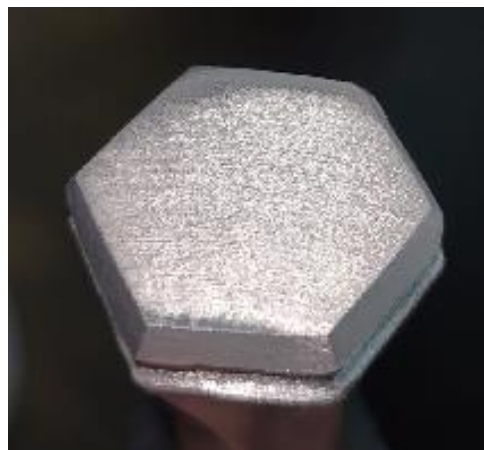


Рисунок 3.18 – Поверхня зрізу

При огляді моделі було виявлено такі дефекти як недолив, спай та пригар. Недолив (рис. 3.19 а) і спай (рис. 3.19 б) виникають через те, що розплавлений метал був недостатньо прогрітий та не мав рідкотічності. Через це, отриманий недолив можна виправити лише повторним литтям із підвищеною температурою розплаву. Спай можливо приховати за допомогою механічної обробки.



а

б

а) недолив; б) спай.

Рисунок 3.19 – Дефекти спай та недолив

Пригар, що зображено на рис. 3.20 утворився через недостатнє ущільнення форми. Пластиковий прототип покривався гіпсом згори до низу, і через деякий час гіпс почав твердіти, втратив рідкотічність та не заповнив елементи моделі. Для запобігання такого дефекту необхідно робити суміш гіпсу та води більш рідкою та швидко покривати модель.



Рисунок 3.20 – Пригар

На рис. 3.21 зображено модель після механічної обробки. Отриманий вилівок має гарну якість поверхні.



Рисунок 3.21 – Модель після обробки

Метод виготовлення прототипів з пластику а потім їх виплавлення є доцільним лише для одноразового виготовлення деталі. Виготовлення таких деталей партією буде дорогим, тому що пластик неможливо використати повторно. Тому для виготовлення партій можна використати наступний метод. Надрукувавши прототип можна виготовити силіконову форму, в яку заливається модельний віск. Восківка витягується та гіпсується, виготовляється форма та ливники. Із форми виплавляється віск та збирається в окрему ємність, його можна використовувати багаторазово. Отриману форму просушують від воску та проводять подальше лиття. Використання силіконової форми є багаторазовим, так як і воску. Але такий метод виготовлення є дорогим як для одноразового через високу вартість модельного силікону. За цим методом виготовили модель. Надрукували прототип та помістили його у силікон, після затвердіння вийняли прототип. На рис. 3.22 а зображено силіконову форму та восківку на рис. 3.22 б.



а

б

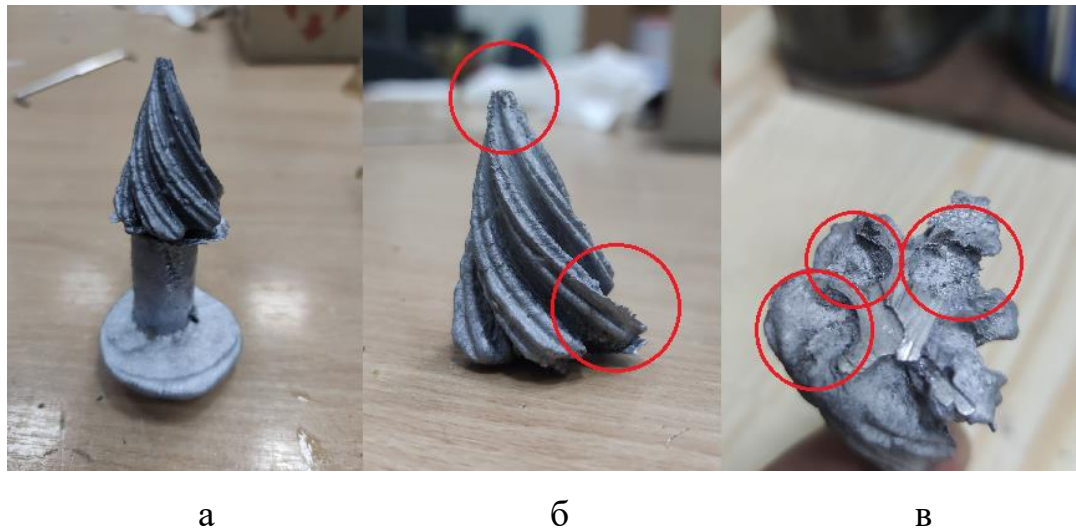
а) силіконова форма; б) восківка.

Рисунок 3.22 – Форма та восківка

Отриману восківку було щільно покрито гіпсом, заформовано у суміш піску та рідкого скла, поміщено форму з ливниковою воронкою у відро з піском (рис 3.23). Залили розплавлений алюміній та отримали виливок що зображено на рис. 3.24 а.



Рисунок 3.23 – Форма із ливниковою воронкою



а) вилита фігура; б) тріщини, недоливи; в) усадкові раковини та пори.

Рисунок 3.24 – Фігура з дефектами

На рис. 3.24 а зображено фігуру після вилучення її з форми та відрізано ливарний канал. Помітно, що фігура має велику кількість дефектів, а саме тріщини, недоливи на верхівці та внизу (рис. 3.24 б), це пов'язано із тим що розплав видався не достатньо рідкотічним та не заповнив усі дрібні деталі. Окремо можна сказати що поверхня зовні та всередині має усадкові раковини та великі пори, це є наслідком того що розплав при застиганні мав велику кількість пузирів. Велика кількість пузирів пов'язана з тим, що при виплавці восківки рідкий віск пропитався у гіпсову оболонку, була проведена недостатня просушка форми. Тому, при заливанні рідкого металу від високої температури розплаву віск почав кипіти та утворювати пузири, окрім того через різкий перепад температури утворилися тріщини. Проаналізувавши результат можна сказати, що форму необхідно якісно просушувати при вищій температурі та більшим проміжком часу до повного випаровування воску. Окрім цього є необхідним або підвищення температури розплаву, або додавання спеціальних домішок у розплав, наприклад борну кислоту, вона забезпечить більшу рідкотічність розплаву та виведе всі шлакові утворення на поверхню. Таким самим методом було відлито ще одну деталь, її зображено на рис. 3.25.



Рисунок 3.25 – Відливок деталі

При огляді деталі наслідки ті ж самі, а саме погана рідкотічність розплаву та погана якість поверхні через закипання воску. При відрізі ливнику стало помітно що деталь має непогану якість всередині, але на поверхні, що контактувала з формою має газові раковини (рис. 3.26).



Рисунок 3.26 – Газові раковини

3.4 Висновки до розділу

У розділі було проведено аналіз видів дефектів лиття та параметрів що впливають на їх виникнення. Проаналізовано методи термообробки металів та проведено експериментальні дослідження з технологією лиття по виплавлюваних моделях, виготовлено декілька виливків. Проведено огляд та дефектовку виливків, проаналізовано дефекти та чинники що вплинули на їх появу та що є необхідним для уникнення цих дефектів лиття.

4 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ НАГРІВОМ МУФЕЛЬНОЇ ПЕЧІ

4.1 Аналіз вимог до режимів нагріву

Розроблена конструкція муфельної печі дозволяє проводити плавку металів з температурою плавка до 1100 °С. Таким чином даному діапазону температур відповідають наступні основні метали (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Діапазон температур

Назва матеріалу	Латинське позначення	Температура	
		Плавки	Кипіння
Олово	Sn	232 °С	2600 °С
Свинець	Pb	327 °С	1750 °С
Цинк	Zn	420 °С	907 °С
Алюміній	Al	660 °С	2519 °С
Срібло	Ag	960 °С	2180 °С
Золото	Au	1063 °С	2660 °С
Мідь	Cu	1083 °С	2580 °С

Одним із важливих недоліків муфельної печі є інерційність нагріву її внутрішньої області. Тобто датчик вимірювання температури проводить вимір із деяким «запізненням» та реальна температура внутрішньої області перевищує температуру на датчику в процесі нагріву муфельної печі. Таким чином існує достатньо велика вірогідність перегріву нагрівального елемента та футеровки печі при плавці таких металів як срібло, золото, мідь, що може призвести до виведення із ладу усієї печі. Це пов'язано із тим, що для плавки даних металів необхідна температура близька до допустимої. Також не бажано встановлювати температуру

при плавці навіть при значеннях достатньо нижчої за критичну. Так як знижена температура зменшує рідкотічність розплавленого матеріалу, а підвищена – збільшує усадку в процесі лиття.

Таким чином для рішення задачі автоматизації системи управління нагрівом муфельної печі необхідним є вирішення кількох наступних задач:

- провести аналіз існуючих методів вимірювання температури;
- провести експериментальні дослідження інерційності використовуваної термопари;
- розробити алгоритм управління нагрівом муфельної печі, що знижує вплив інерційності системи вимірювання температури.

4.2 Аналіз методів вимірювання температури

Вимірювання – процес отримання інформації, що полягає у порівнянні дослідним шляхом вимірюваних та відомих величин або сигналів, виконання необхідних логічних операцій та подання інформації у зручній для сприйняття та передачі формі. До технічних вимірів відносять виміри, вироблювані за допомогою робочих засобів з метою контролю параметрів, управління процесами, отримання фактографічного матеріалу, діагности і тому подібне. До спільних вимірів відносять одночасні виміри декількох неоднорідних величин для встановлення залежності між ними. Шукані величини при сукупних і спільних вимірах визначаються з систем рівнянь, що зв'язують значення визначуваних величин зі значеннями величин, отриманих при прямих або непрямих вимірах. Прикладом методу спільного виміру є визначення значення параметрів R_0 , а β у залежності опору термоперетворювача від температури

$$R_T = R_0 (1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2). \quad (4.1)$$

При цьому здійснюються прямі виміри трьох значень температури T_1 , T_2 , T_3 . Потім з рішення системи рівнянь отримують значення R_0 , α і β .

$$R_{T1} = R_0 (1 + \alpha \cdot T_1 + \beta \cdot T_1^2);$$

$$R_{T2} = R_0 (1 + \alpha \cdot T_2 + \beta \cdot T_2^2);$$

$$R_{T3} = R_0 (1 + \alpha \cdot T_3 + \beta \cdot T_3^2).$$

Засобами вимірів називають пристрої або комплекси технічних пристроїв, що призначені для вимірів, мають нормовані технічні характеристики, що зберігають одну або декілька відтворних впродовж певного часу одиниць фізичних величин. Вони включають: заходи, вимірювальні прилади, вимірювальні установки, вимірювально-обчислювальні комплекси, вимірювальні перетворювачі, вимірювальні пристрої, вимірювальне приладдя і засоби порівняння. Вимірювальні перетворювачі – засоби, призначені для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки і зберігання, але не сприйнятою безпосередньо спостерігачем. Перетворювана величина називається вхідною, а результат перетворення – вихідною величиною; співвідношення між ними задають функцією перетворення. Перетворювачі по виконуваних функціях і місці у вимірювальному ланцюзі діляться на первинних (перетворюють вимірювану величину в інформативний сигнал відповідно до закладеного в І принципі дії властивістю; термоелектричні, індукційні, п'єзоелектричні); передавальні (перетворюють вимірювану в сигнал, зручний для передачі і прийому) і проміжні(перетворення сигналів у форму і вид, зручний для організації роботи вимірювальних приладів, систем, комплексів і пристроїв).

Для виміру температури в металургії найпоширенішими стали термоелектричні термометри, працюючі в інтервалі температур від, – 200 °С до 2500 °С і вище. Цей тип пристроїв характеризують висока точність, і надійність, можливість використання в системах автоматичного контролю і регулювання параметра, що значною мірою визначає хід технологічного процесу в металургійних агрегатах.

Системи управління муфельною піччю для плавки легкоплавких металів виробів забезпечують стабілізацію і регулювання температури усередині печі, тобто є по суті регуляторами температури.

Нині промисловий регулятор температури печі опору [16] виконується у вигляді набору наступних функціональних елементів(рис. 4.1) :

- задаючого пристрою ЗП що служить для ручного або автоматичного введення заданого значення регульованої температури;
- обчислювального пристрою ОП, що виконує функції порівняння дійсного та заданого значення температури та виробляє необхідний закон регулювання;
- виконавчого елемента (регулятора потужності) РП, що змінює потужність, що вводиться в піч;
- датчика температури печі ДТ.

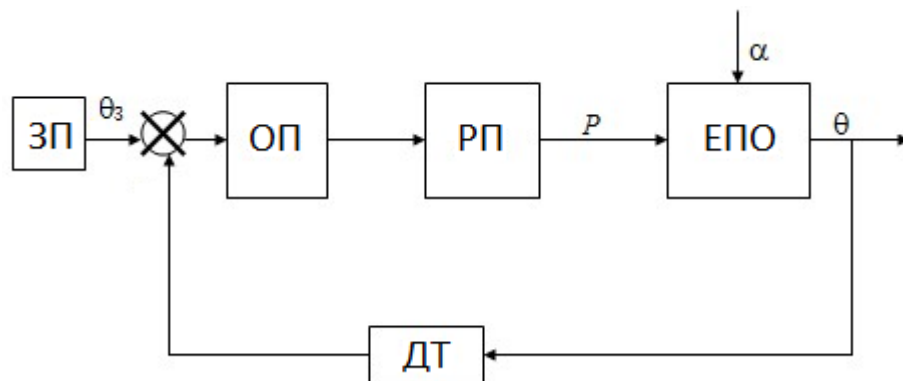


Рисунок 4.1 – Функціональна схема регулювання температури муфельної печі

На рис. 4.2 представлено структурну схему безперервного регулювання температури з ПД-законом регулювання.

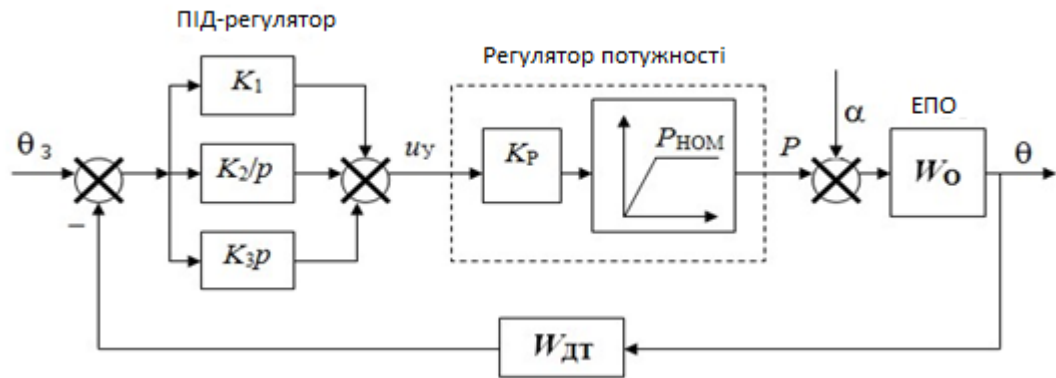


Рисунок 4.2 – Структурна схема системи безперервного регулювання температури муфельної печі з ПІД-законом регулювання

Незважаючи на те, що муфельна піч є складним неоднорідним об'єктом управління, регулятор температури зазвичай виконується одноканальним, тобто містить один виконавчий елемент – тиристорний регулятор напруги, один регулюючий (обчислювальний) пристрій – спеціалізований програмований контролер (регулятор температури) і один датчик температури [15]. У той самий час неоднорідність ЕПО як об'єкта управління виявляється у тому, що він включає у собі кілька взаємозалежних умов теплопередачі елементів із різними теплотехнічними параметрами.

Таке уявлення муфельної печі як об'єкта керування при дослідженні, проектуванні та налаштуванні регулятора температури дозволяє вирішувати ряд завдань, що не потребують високої точності підтримання температури на тиглі. Однак, з підвищенням вимог до точності та якості регулювання температури, особливо у складних та прецизійних технологічних процесах, виникає необхідність урахування розподілу температур усередині печі. Очевидно, що такий аналіз може бути здійснений лише на основі деталізованого уявлення ЕПО як неоднорідного об'єкта управління [17].

Спрощене уявлення муфельної печі у вигляді однорідного теплотехнічного елемента створює певні проблеми при проектуванні та налаштуванні регулятора температури. Зокрема, одним із невирішених питань можна вважати вибір місця встановлення датчика температури всередині печі, а також критеріїв оцінки вибору бажаного, з погляду технології, місця встановлення датчика температури.

Вирішення цієї задачі при використанні традиційної спрощеної моделі ЕПО неможливе.

Технологічний процес термообробки металевих виробів вимагає забезпечення високої рівномірності нагріву в робочій камері печі. При цьому нерівномірний розподіл температури викликає необхідність зниження в цілому швидкості нагріву та охолодження з тим, щоб температурні криві, що розрізняються в окремих частинах печі, не призводили до неоднорідності прогріву тигля та руйнування футерування печі. Однак, збільшення часу технологічного процесу призводить до зниження продуктивності та економічної ефективності установки.

Одним із методів підвищення рівномірності нагріву в муфельній є розділ нагрівального блоку на теплові зони. Теплова зона є ділянкою печі з незалежним живленням та апаратурою для включення, управління та регулювання температури. У класичному виконанні, кожна теплова зона ЕПО включає тиристорний регулятор напруги, підключений до групи нагрівачів і з датчиком температури. При цьому регулювання температури кожної теплової зони забезпечується від окремого одноканального регулятора температури – програмованого контролера або одного багатоканального.

Однак, при такому способі підвищення рівномірності нагріву навіть при однаковому встановленню температури в кожному регуляторі може спостерігатися істотна різниця температур у різних теплових зонах у процесі нагрівання внаслідок відмінності теплових постійних часу, і потужностей, що вводяться в кожну з теплових зон.

Дослідження систем управління ЕПО, що знижують різницю температур різних теплових зон печі, за допомогою традиційної спрощеної моделі ЕПО неможливе.

Крім цього, матеріали нагрівачів для високотемпературних ЕПО накладають ряд особливостей на побудову системи живлення та управління, що призводить до необхідності розробляти уточнені моделі, що відображають ці особливості.

Традиційно регулятори температури у муфельній печі представляють у вигляді лінійної інерційної ланки першого порядку [15] з передавальною функцією

$$W_n(p) = \frac{k_n}{T_n p + 1} \quad (4.2)$$

де k_n – коефіцієнт передачі печі;

T_n – постійна часу печі.

Вхідною величиною для ЕПО як об'єкта управління виступає чинне значення надходить на нагрівачі потужності, що визначається як

$$P = U_n^2 / R_n, \quad (4.3)$$

де U_n – напруга, що надходить на нагрівачі печі (напруга на виході регулятора напруги);

R_n – електричний опір нагрівачів. Вихідною величиною печі є температура у місці установки датчика зворотний зв'язок (термопара).

Вираз (1.1) записується з урахуванням низки припущень. Передбачається, що нагрівальний елемент є однорідним, зосередженим та нескінченно тонким у теплотехнічному відношенні тілом, теплопередача здійснюється за рахунок теплопровідності, а коефіцієнти теплопровідності та теплоємності постійні та не залежать від температури.

Ці припущення є досить грубими, проте дозволяють отримати моделі елементів печі у формі, зручної для подальшого дослідження системи регулювання температури.

Таке уявлення муфельної печі, як об'єкта керування дозволяє вирішувати ряд завдань при моделюванні систем керування та регулятора температури. З урахуванням того, що налаштування параметрів регуляторів температури для кожної печі вручну трудомістка та фінансово-витратна операція. Це робить

доцільною розробку уточненої моделі печі, що враховує теплотехнічні параметри окремих елементів печі та зв'язку між ними.

Кожен елемент печі опору може бути графічно представлений як ланки рис. 3, на яке надходить керуючий вплив - потужність P_i (для нагрівача печі) або температура θ_{i-1} (для завантаження і теплоізоляції), інтегральний обурюючий вплив ΔP або $\Delta \theta$, що змінює керуючий вплив. Вихідною величиною є температура θ_i [15].

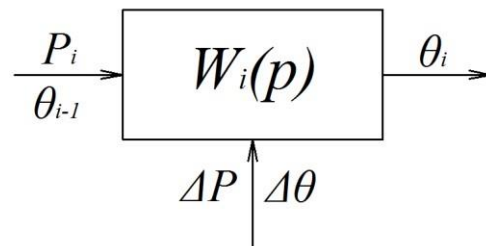


Рисунок 4.3 – Структурна схема елемента печі опору, як об'єкту управління

Використовуючи розглянутий вище традиційний підхід до опису печі як об'єкта управління стосовно кожного з виділених елементів печі, можна представити регулятор температури з урахуванням нелінійної характеристики регулюючого пристрою та узагальненої моделі печі, у вигляді структурної схеми (рис 4.4).

Наведена на рис. 4.4 структурна схема включає наступні блоки: електрична піч опору (ЕПО), що враховує неоднорідність печі, джерело живлення - регулятор напруги, регулюючий пристрій, що виробляє пропорційно-інтегрально-диференціальний закон управління і датчик зворотного зв'язку (термопара). Зазначена модель дозволяє досліджувати вплив зворотного зв'язку за температурою як від окремих елементів печі, так і від їх сукупності. Можливі способи впровадження зворотного зв'язку показані на рис. 4.4 штриховими лініями.

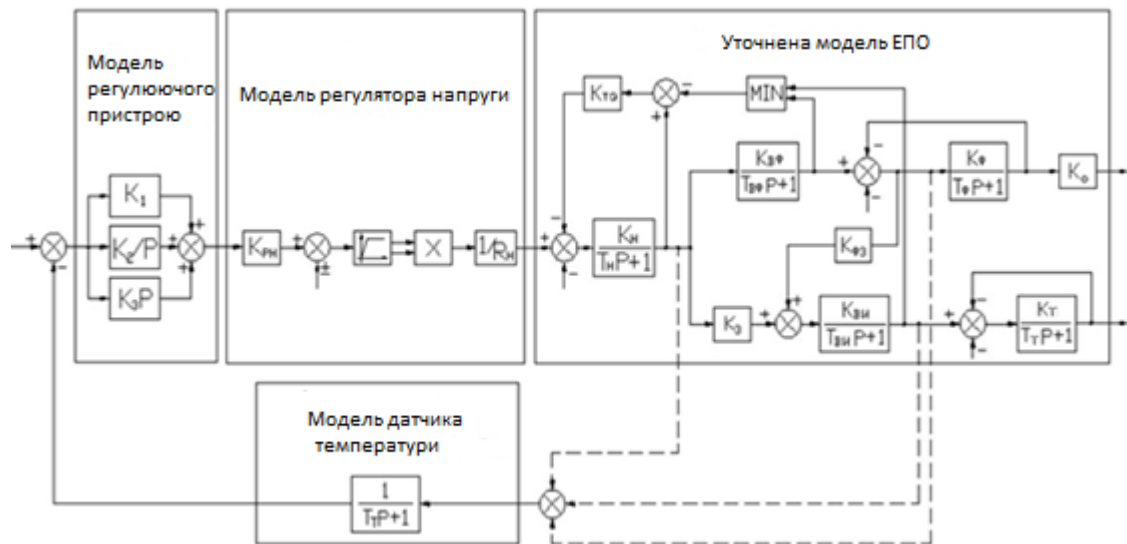


Рисунок 4.4 – Структурна схема регулятора температури, враховуюча неоднорідність муфельної печі як об'єкту управління та нелінійність характеристик регулюючих елементів

Модель печі включає в себе нагрівачі, представлені у вигляді інерційної ланки з передавальною функцією $k_n / (T_n p + 1)$, футеровку, що визначається охопленням негативним зворотним зв'язком інерційною ланкою з передавальною функцією $k_\phi / (T_\phi p + 1)$ і тигель з металом, також представлений у вигляді охопленого негативним зворотним зв'язком інерційної ланки з передатною функцією $k_T / (T_T p + 1)$. Повітряні проміжки між нагрівачем, футеровкою та тиглем також враховуються в моделі у вигляді інерційних ланок з передавальними функціями $k_{в\phi} / (T_{в\phi} p + 1)$, $k_{вн} / (T_{вн} p + 1)$.

Тепловіддача від кожуха печі до навколишнього середовища враховується в моделі безінерційним елементом з коефіцієнтом передачі k_o , на виході якого виробляється величина, пропорційна температурі кожуха печі Θ_k . Температура навколишнього середовища Θ_c враховується в моделі як вплив, що надходить на вхід ланки з передатною функцією $k_\phi / (T_\phi p + 1)$. Параметри елементів, що входять до моделі муфельної печі, розраховуються на основі законів теплопередачі, викладених у [18] або визначаються на основі експериментів.

Модель регулятора потужності представлена на схемі рис. 4.4 безінерційною ланкою з коефіцієнтом передачі тиристорного регулятора напруги $k_{рн}$ і нелінійної ланки типу «обмеження», що враховує, що значення

напруги на виході регулятора, що діє, завжди позитивно і не повинно перевищувати номінального значення. На відміну від загальноприйнятого уявлення регулятора потужності у вигляді лінійної ланки тут враховано, що регулятора потужності як такого в системі немає, оскільки регулювання потужності, що вводиться в піч, здійснюється регулятором напруги. Потужність, що вводиться в піч, визначається за допомогою блоку множення, на виході якого виробляється величина U^2 і ланки з коефіцієнтом передачі $1/R_n$. На виході ланки $1/R_n$ виробляється величина, пропорційна надходить на нагрівач потужності $P = U_n^2/R_n$.

Модель регулюючого пристрою, що реалізується в сучасних регуляторах температури у вигляді спеціалізованих мікропроцесорних контролерів, представлена у структурній схемі трьома паралельно з'єднаними ланками з передатними функціями відповідно $k_1, k_2/p$ і k_3p . Висока швидкодія мікропроцесорного контролера дозволяє знехтувати його інерційністю, зумовленою цифровою обробкою інформації.

Як наслідок з структурної схеми рис. 4.4, регулятор потужності, що використовується для живлення муфельної печі, є нелінійною системою регулювання, що впливає як на якість регулювання температури, так і на методи дослідження системи.

Модель регулятора температури муфельної печі у формі структурної схеми, представленої рис. 4.4, дозволяє проводити аналіз і синтез регулятора температури, розраховувати розподіл температур всередині печі, як у динаміці, і у статиці, і навіть здійснювати порівняння різних варіантів виконання регулятора температури.

Представлена на рис. 4.4 система є нелінійною і дозволяє отримати аналітичне рішення. На її дослідження доцільно використовувати чисельні методи структурного моделювання, розроблені для аналізу та синтезу систем автоматичного управління. Найбільш зручним в даний час можна вважати пакет прикладних програм Simulink Matlab/Simulink, який має велику бібліотеку

типових елементів і дозволяє проводити аналіз та синтез лінійних та нелінійних систем практично необмеженої складності.

За структурною схемою рис. 4.2 у середовищі Matlab/ Simulink була розроблена імітаційна модель системи регулювання температури, схема якої наведена на рис. 4.5.

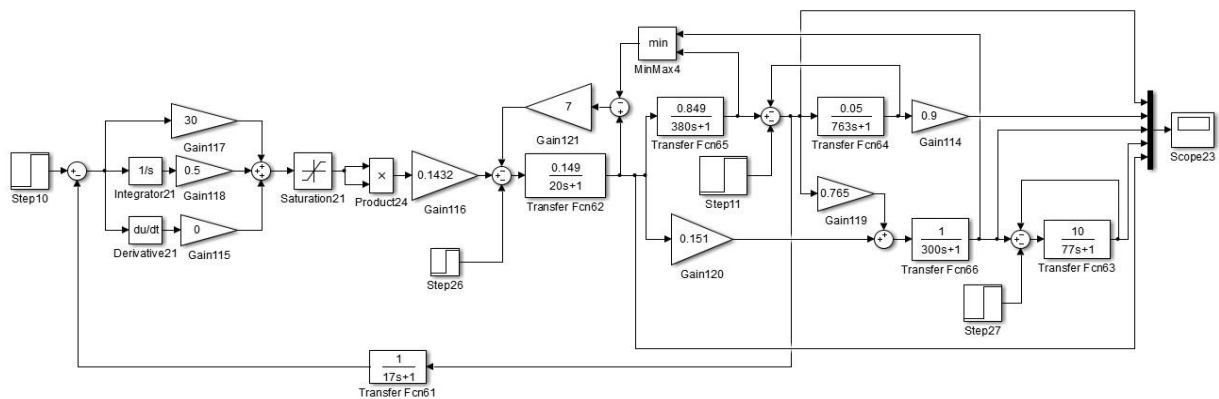


Рисунок 4.5 – Імітаційна модель регулятора температури муфельної печі у середовищі Matlab/Simulink

Імітаційна модель (рис. 4.5) дозволяє проводити дослідження системи регулювання температури так само, як і на реальному об'єкті, задаючи різні дії та варіюючи параметри елементів системи в бажаному діапазоні. Однак, функціональні можливості імітаційної моделі набагато ширші за реальну систему, оскільки дозволяють розраховувати величини, вимір яких неможливий при натурному експерименті. Імітаційну модель також зручно використовувати для ідентифікації об'єкта управління шляхом порівняння вихідних величин, розрахованих на моделі та отриманих експериментально.

На рис. 4.6 наведено часові діаграми, що ілюструють можливості запропонованої моделі. Для зручності аналізу отриманих залежностей зміни температури (нагрівача, виробу та футерування) під час розігріву печі характеристики виводяться на загальний віртуальний осцилограф *Scope1*, що дозволяє користувачу отримати єдину картину розподілу температури в просторі печі в динаміці.

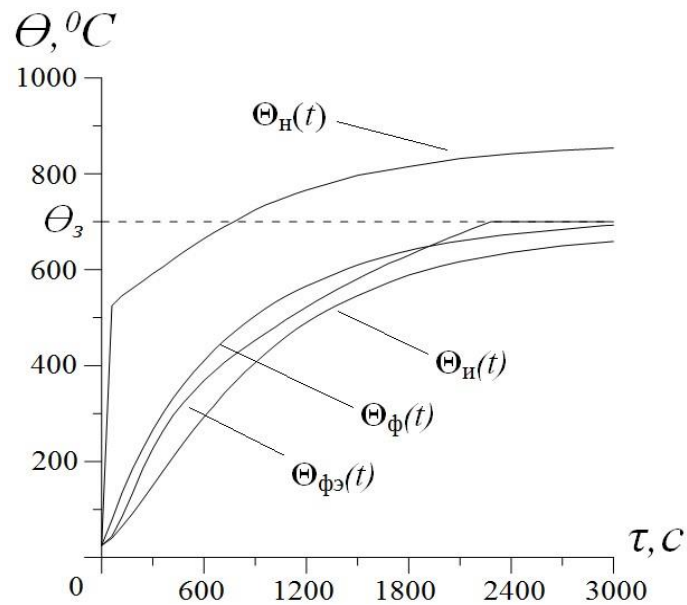


Рисунок 4.6 – Динамічні характеристики температури нагрівача, виробу та футерування , отримані на імітаційній моделі, та динамічна характеристика температури футерування, що отримана експериментально

Дослідження системи регулювання температури ЕПО з використанням імітаційної моделі (рис. 4.5) зручно проводити шляхом розрахунку перехідних функцій температури $\Theta(t)$ різних елементів печі при варіюванні параметрів елементів системи, керуючих та обурюючих впливів. Для ілюстрації методики дослідження системи з використанням імітаційної моделі на рис. 4.6 наведено осцилограми перехідних функцій температур футерування печі $\Theta_F(t)$, нагрівачів $\Theta_H(t)$, виробу $\Theta_H(t)$ та заданого значення температури $\Theta_3(t)$ при використанні як сигнал зворотного зв'язку температури футерування $\Theta_F(t)$. Також для порівняння наведена осцилограма температури футеровки $\Theta_{FЭ}(t)$, отримана експериментально для печі, параметри якої наведені нижче. Осцилограми, наведені на рис. 4.6, розраховувалися на імітаційній моделі рис. 4.5 при налаштуванні ПІД регулятора на близький до аперіодичного характеру перехідного процесу для розробленої муфельної печі, що має номінальну потужність $P_{ном} = 2,5$ кВт, номінальну температуру $\Theta_{ном} = 1100$ °С та об'єм робочої камери = 7,8 л. Задана робоча температура печі приймалася рівною $\Theta_3 = \Theta_{ном} = 700$ °С, що відповідає температурі необхідної для плавки алюмінію. Коефіцієнти теплопередачі між елементами печі та постійні часу розраховувалися за загальноприйнятою

методикою, викладеною у [19]. Експериментальна залежність була отримана пірометром Fluke 72 (рис. 4.7).



- а) встановлена температура;
 б) фактична температура футеровки печі;
 в) фактична температура тиглю.

Рисунок 4.7 – експериментальна залежність

Як впливає з аналізу наведених на рис. 4.6 залежностей, крива розігріву печі $\Theta_{\phi}(t)$, розрахована на моделі рис. 4.5, узгоджується з експериментальною $\Theta_{\phi e}(t)$, тобто. адекватно відбиває процеси, які у печі. Розбіжність залежностей зміни температур на окремих елементах печі наочно ілюструє переваги розробленої моделі, яка дозволяє оцінювати розподіл температур як у режимі, так і в динаміці.

Для правильної плавки металу є необхідним нагрівання його до температури плавки, утримання температури плавки на протязі деякого часу для повної плавки всієї маси, і знов нагрів до відповідної температури для досягнення більшої рідкотічності. Ідеальний графік, якого необхідно досягти зображено на рис. 4.8. На даний момент, проводячи експериментальні дослідження стало помітно, що піч не має досить рівномірного нагріву, фактичний нагрів зображено на рис. 4.9.

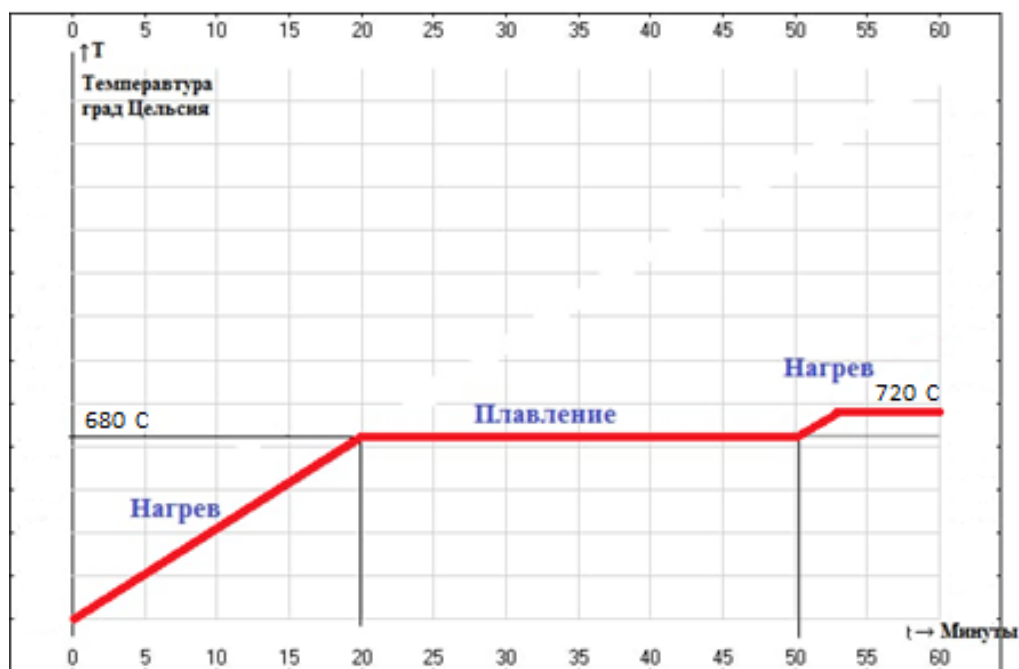


Рисунок 4.8 – Ідеальний графік нагріву

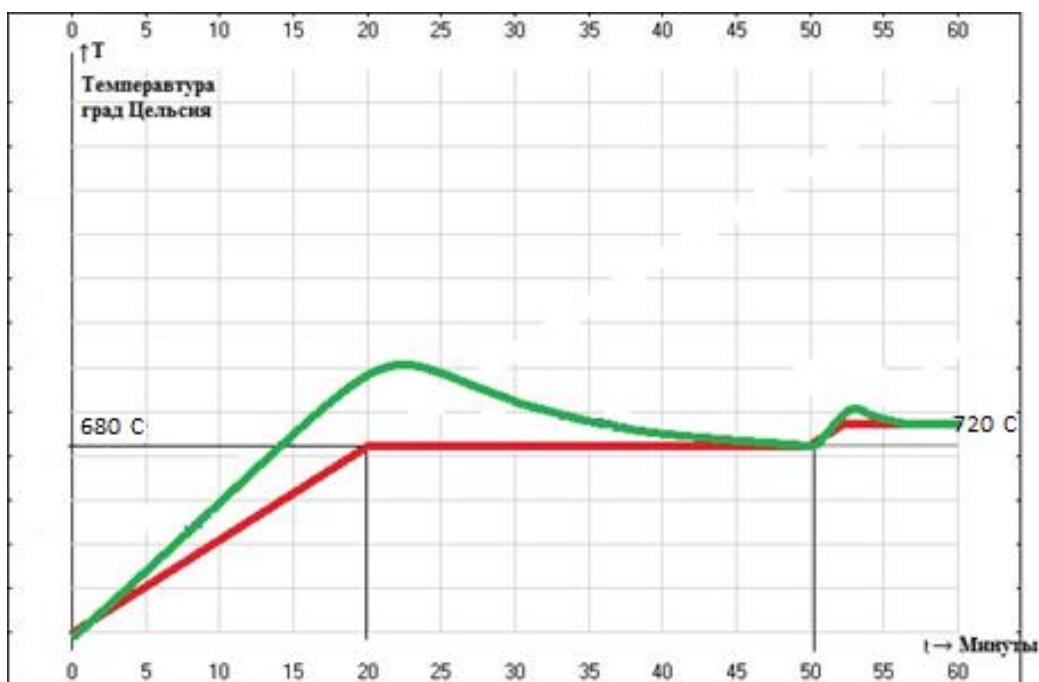


Рисунок 4.9 – Фактичний графік нагріву

Якщо проводити плавку металу, що має температуру плавки приблизною з максимально можливим, допустимим температурним режимом печі, то це буде небезпечно та призведе о виходу всієї конструкції з ладу. Згідно рис. 4.9 помітно, що на етапі нагріву до 680 °С, камера печі продовжує нагріватись, і досягає температури вище за допустиму. Потім температура в камері буде повільно

спадати на певному протязі часу та досягне необхідної температури. При наступному догріванні до 720 °С також буде перегрів. Виходячи з теоретичних та експериментальних досліджень та проведення математичного аналізу необхідно скоректувати графік нагріву муфельної печі таким чином, щоб максимально виключити можливість перегріву печі при роботі на високих температурах та виходу її з ладу. Для цього необхідно реалізувати нагрів за допомогою нерівномірних ступенів. Тобто перший нагрів виконується на 70 % від заданої температури та очікування 3 хвилини, другий на 90 % та очікування 3 хвилини третій на вже повний нагрів 100 % і очікування 10 хвилин для повного розплавлення металу, потім необхідно ще нагріти до 105 % для забезпечення кращої рідкотічності. Таким чином час нагріву трохи збільшується, але у цей час збільшується точність вимірюваної температури, через те що тигель та повітря у камері печі встигають достатньо нагрітись для плавки металу у тиглі. Ступені нагріву зображено на рис. 4.10.

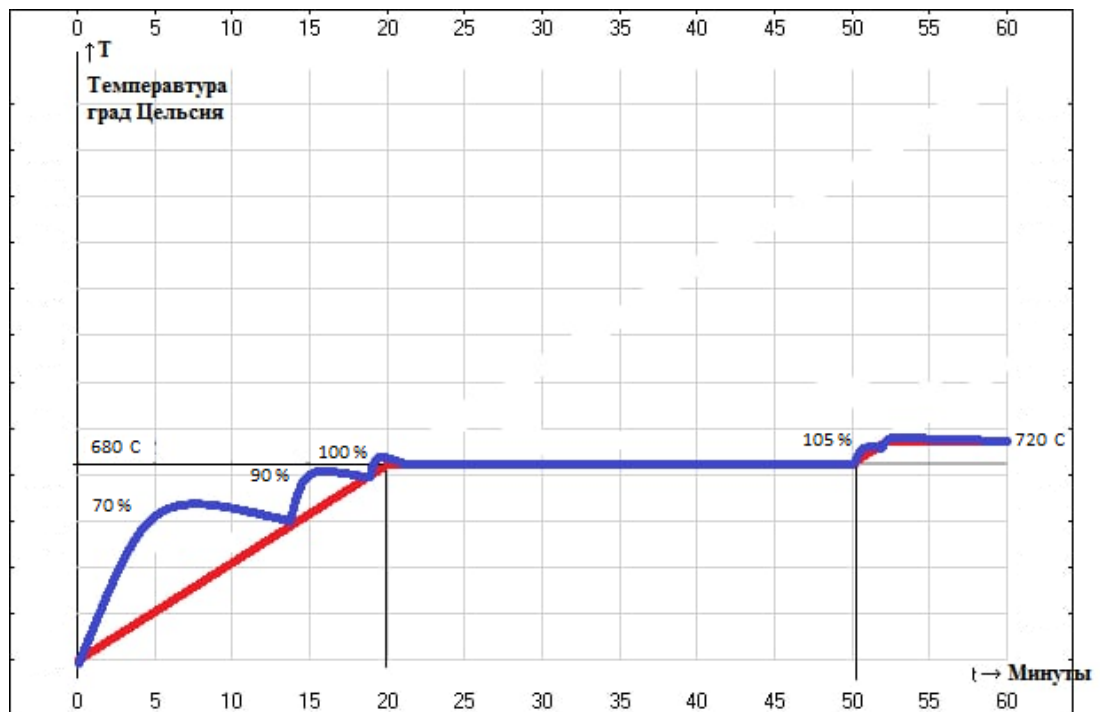


Рисунок 4.10 – Ступені нагріву

Для цього було додатково написано код, що дозволяє проводити ступінчатий нагрів для будь-якої встановленої температури, дотримуючись витримки часу, якого достатньо судячи з експериментальних робіт.

```

if t_c!=t_reg
  {(if (t_c<=t_reg * 0.70) {digitalWrite(13,HIGH)} //нагрів до 70%
  else if (t_c>=t_reg*0.70) {digitalWrite(13,LOW);delay 180000}) // досягло
необхідної температури, витримка 3 хвилини.
  (if(t_c<=t_reg * 0.90) {digitalWrite(13,HIGH)} //нагрів до 90%
  else if t_c>= t_reg * 0.90) {digitalWrite(13,LOW); delay 180000})// досягло
необхідної температури, витримка 3 хвилини.
  (if(t_c<= t_reg * 1) {digitalWrite(13,HIGH)} //нагрів до 100%
  else if t_c>=t_reg * 1) {digitalWrite(13,LOW); delay 600000}) // досягло
необхідної температури, очікування 10 хвилин.
  (if(t_c<= t_reg * 1.05) {digitalWrite(13,HIGH)} //нагрев до 105%
  else if t_c>=t_reg*1.05) {digitalWrite(13,LOW); delay 180000})// досягло
необхідної температури, витримка 3 хвилини.
};
lcd.setCursor(0,0);lcd.print("stup=");lcd.print(stup);lcd.print((char)223);
lcd.print("C");delay(300); erom5=stup;w=0;} } // виведення на дисплей.

```

4.3 Висновки до розділу

У розділі було проведено аналіз вимог щодо режимів нагріву та методів вимірювання температури. Через такий недолік як інерційність нагріву камери печі було прийнято рішення щодо реалізації правильного нагріву. Було розроблено алгоритм управління нагрівом муфельної печі. Для рішення задачі було додатково написано код, що дозволяє проводити ступінчастий нагрів для будь-якої встановленої температури для запобігання інерційності нагріву.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Установка для лиття та її автоматична система управління розроблялася у прибраному лабораторному приміщенні, з площею $\approx 43 \text{ м}^2$, об'ємом $\approx 130 \text{ м}^3$. Приміщення має двері, великі вікна, та штучне освітлення, якого достатньо для нормальних умов роботи. Схему приміщення наведено на рис. 5.1. У приміщенні є 9 розеток 220 В та 2 розетки 380 В. Також дотримані норми щодо пожежної безпеки, приміщення обладнане вогнегасником, пожежною ковдрою та піском.

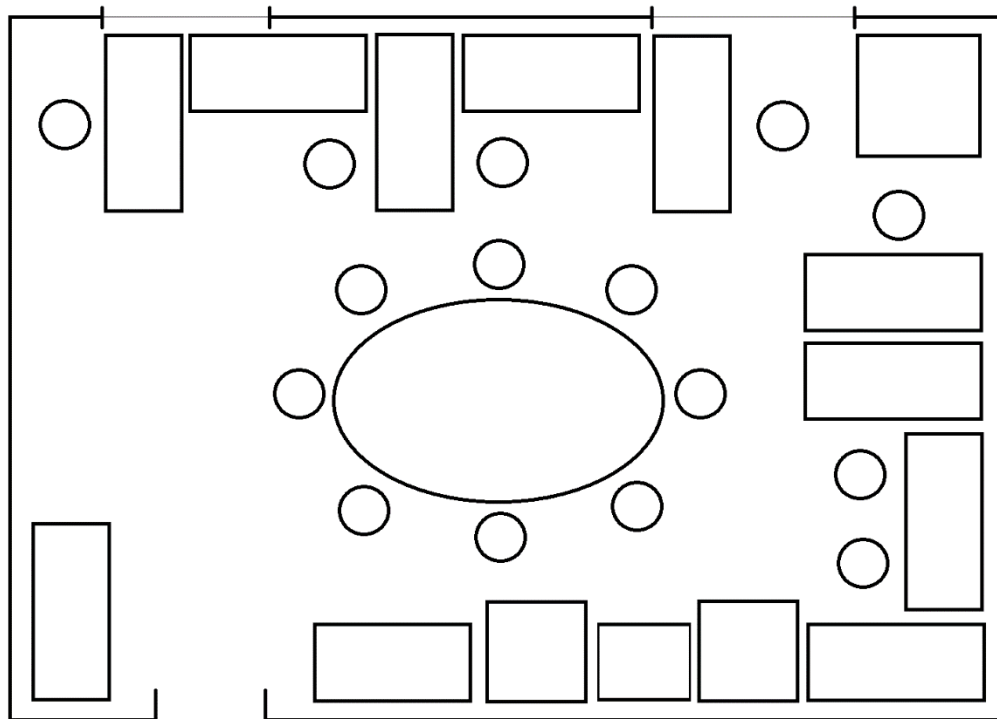


Рисунок 5.1 – Схема лабораторного приміщення

Розрахуємо параметри вентиляції [21], які є необхідними для приведенного приміщення. Відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 опалення, вентиляція та кондиціонування для механічної майстерні, необхідна швидкість повітрообміну складає 3-5 $\text{м}^3/\text{ч}$ [21]. Використаємо формулу для розрахунку мінімально необхідного повітрообміну для механічної майстерні, взявши коефіцієнт 3, об'єм приміщення 130 м^3 .

$$L = n \cdot V, \quad (5.1)$$

де L – необхідний повітрообмін в приміщенні;
 n – кратність повітрообміну;
 V – об’єм приміщення.

Тоді отримаємо:

$$L = 130 \cdot 3 = 390 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для людини, яка постійно перебуває в приміщенні достатній норматив – $60 \text{ м}^3/\text{ч}$, тобто у лабораторії постійно можуть перебувати 6 чоловік.

У табл. 5.1 наведено оцінку факторів виробничого середовища та факторів трудового процесу.

Таблиця 5.1 - Оцінка факторів виробничої середовища та трудового процесу

Фактори виробничого середовища і трудоного процесу	значення фактору (ГДК, ПДУ)		3 клас – небезпечні та шкідливі умови праці			Тривалість дії фактору, в% за зміну
	Норма	Факт	1 ст	2 в	3 в	
1	2	3	4	5	6	7
1. Освітленість: природне, %	> 1,2	1,5				87,5
штучне, Лк	300-500	335				87,5
2. Шум, дБ	50	50				87,5
3. Мікроклімат: – Температура повітря, °С	23 - 25	26	+			87,5
- Швидкість руху повітря, м/с	<0,1	0,1				87,5
- Відносна вологість,%	40-60	50				87,5
4. Неіонізуючі випромінювання: – Радіочастотного діапазону 6 Гц – 2 кГц, В/м	10	9				
– Радіочастотного діапазону 2 кГц – 400 кГц, В/м	1	1				
5. Рентгенівське випромінювання, мкР/год	100	14				87,5

Продовження таблиці 5.1

6. Атмосферний тиск, мм рт.ст.	760 ± 30	763				100
7. Тяжкість трудового процесу: – Дрібні стереотипні рухи кистей і пальців рук (кількість за зміну)	До 40000	35000				
– Робоча поза (перебування в похилому положенні протягом зміни)	Періодичне знаходження в незручній позі і / або у фіксованій позі до 25% часу зміни, знаходження в позі «стоячи» до 60% часу зміни	Періодичне перебування в незручній позі з незручним розташуванням кінцівок і фіксованій позі – стоячи				50
8. Напруженість трудового процесу – Інтелектуальні навантаження: 1) зміст роботи	Рішення простих альтернативних завдань згідно з інструкцією	Рішення складних завдань з вибором по відомим алгоритмом	+			10
2) розподіл функцій за ступенем складності завдання	Обробка, виконання завдання і його перевірка	Обробка, виконання завдання і його перевірка				87,5
3) характер виконуваної роботи	Робота за встановленим графіком з можливістю його коригування	Робота за встановленим графіком з можливістю його коригування				50

Продовження таблиці 5.1

– Навантаження на зоровий аналізатор: 1) розмір об'єкта відмінності в мм/% часу спостереження	5,0– 1,1 мм більше 50 % часу; 1,0 0,3 мм до 50 % часу; менше 0,3 мм до 25 % часу	5,0– 1,1 мм більше 50 % часу;	+			50
2) спостереження за екранами ВДТ, годин в зміну	2 – 3	5	+			62,5
– Навантаження на слуховий аналізатор (сприйняття мови або сигналів),%	Чіткість слів або сигналів 90–70%	90 %				90
9. Режим роботи – Фактична тривалість робочої зміни, годин	8–9	8				100
– Змінність роботи	Двозмінна робота (без нічної зміни)	Перша зміна				87,5
– Наявність регламентованих перерв і їх тривалість,% часу зміни	Перерви регламентовані, недостатньої тривалості: 3–7% від часу зміни	12,5 % – перерва				12,5
Загальна кількість факторів	22					

ВИСНОВКИ

В ході виконання атестаційної роботи згідно технічного завдання було розроблено автоматизовану систему керування лабораторної муфельної печі.

Головною метою роботи є розробка діючого макету з автоматизованою системою керування, за допомогою якого можна проводити термічну обробку та плавку термопластів та металів. Було проаналізовано літературу за темою роботи. Був проведений аналіз видів лиття, проаналізовано види печей що використовуються для плавки матеріалів. Проведено аналіз параметрів що впливають на якісні показники ливарних виробів та дефектів, що виникають під час лиття.

Було проаналізовано технічне завдання, що задає основні параметри для розробки печі, а саме: робоча температура установки 1100 °С, напруга живлення 220 В, 50 Гц, сила струму 12 А, потужність 2.5 кВт.

Були проведені розрахунки по вибору дроту для виготовлення нагрівального елемента.

Було проведено збірку нагрівальної системи, проведено теплоізоляцію. У якості плати керування було обрано Arduino Uno, твердотільне реле Fotek SSR-40 DA, дисплей для виводу інформації LCD 1602, та інші елементи системи.

Було розроблено програмне управління для плати керування Arduino для контролю та підтриманню необхідної температури до 1100 °С. Для підвищення точності підтримання необхідної температури використано модель гістерезису. Для правильної термообробки матеріалів було розроблено систему точного виміру температури та прошивку, що дозволять працювати із матеріалами у яких температура плавки граничить із максимально допустимою температурою роботи печі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Загальні методичні вказівки з дипломного проектування в університеті [Текст] / Упоряд.: П.С. Ковтун, З.В. Дудар, В.Я. Журавльов, О.С. Шкіль. - Харків: ХНУРЕ, 2015. – 44 с.
2. ДСТУ 3008:2015. Документація. звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст] – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.
3. Методичні вказівки з виконання та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка освітньої програми «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Н. П. Демська, Ю. М. Олександров, Р. В. Артюх, Є. А. Разумов-Фризьок. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 40 с.
4. Основи виробництва електронних апаратів [Текст] / Невлюдов І. Ш. – Харків: ХНУРЕ, 2005. – С. 7 – 16.
5. Види лиття [Електронний ресурс]; режим доступу (http://armalit1.ru/vidi_litwa.html); дата використання [10.05.2019].
6. Липницкий А. М. Литье под давлением, литье в металлические формы, литье в оболочковые формы [Текст] / А. М. Липницкий, И. В Морозов // Справочник рабочего-литейщика. – 1976. – С. 400 – 430.
7. Титов Н. Д. Литье по выплавляемым моделям [Текст] / Н. Д. Титов, Ю. А. Степанов // Технологии литейного производства. – 1974. – С. 438 – 439.
8. Могилев В. К. Центробежное литье [Текст] / В. К. Могилев, О. И. Лев / Справочник литейщика . – 1988. – С. 260 – 261.
9. Аналіз способів плавки металів [Електронний ресурс]; – Режим доступу https://studopedia.su/10_49264_sposobi-plavki-chernih-splavov.html; дата використання [10.05.2019].

10. Електрична муфельна піч [Електронний ресурс]; – Режим доступу <https://labor-snol.ru/news/shema-ustrojstva-elektricheskikh-mufelnyh-pechej>; дата використання [10.05.2019].

11. Значения электрического сопротивления [Електронний ресурс]; – Режим доступу: <https://provoloка-sv.com.ua/a185188-znacheniya-elektricheskogo-soprotivleniya.html> / - 30.05.20 р. – Загл. з екрану.

12. Расчет нагревателей [Електронний ресурс]; – Режим доступу: <https://atomsteel.com/heatingalloys/raschet-nagrevatelej.html> / - 30.05.20 р. – Загл. з екрану.

13. Печь муфельная [Електронний ресурс]; – Режим доступу: <http://www.tehno.com.ru/product.phtml?uid=B00120049006CB/> - 30.05.20 р. – Загл. з екрану.

14. Печь для обжига [Електронний ресурс]; – Режим доступу: <http://goncharное-delo.ru/internet-lavka/magazin/pech-dlya-obzhiga-delo-masterov-27-litrov-1300/> - 30.05.20 р. – Загл. з екрану.

15. Автоматическое управление электротермическими установками: учебник для вузов / А.М. Кручинин, К.М. Махмудов, Ю.М. Миронов и др.; под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

16. Нетушил А.В. Теория автоматического регулирования. – М.: Высшая школа, 2016, – 424 с.

17. Структурное моделирование тепловых процессов в электротермических установках: учебное пособие / В.В. Гоман, С.М. Мезенин, В.А. Прахт, С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов, С.А. Федореев; под общ. ред. Ф.Н. Сарапулова. – Екатеринбург: УГТУ_УПИ, 2009. – 343 с

18. Погребисский М.Я. Теплопередача в электрических печах сопротивления: учебное пособие/ М.Я. Погребисский, О.К. Киренская, Н.Г. Батов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 104 с.

19. Чередниченко В. С., Сеницын В. А., Алиферов А. И. и др.; под ред. В. С. Чередниченко, А. И. Алиферова. Теплопередача: учебн. Пособие для вузов. В 2 ч. – Ч. 2: Упражнения и задачи – 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 379 с.

20. Определение воздухообмена [Электронный ресурс]; – Режим доступа: <https://vents.ua/opredelenie-neobhodimosti-vozdushoobmena-pomesenij-rekomendacii-k-proektirovaniu/> – 03.06.20 р. – Загл. з екрану.

21. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Основи охорони праці та цивільний захист" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, В. А. Айвазов, О. В. Мамонтов, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 517 с.

22. Карпенко Д.В. Розробка конструкції та електроніки муфельної печі / Д. В. Карпенко // Виробництво & Мехатронні Системи 2021: матеріали V-ої Міжнародної конференції, 21-22 жовтня 2021 р.: тези доповідей [редкол. І.Ш. Невлюдов]. – Харків: [електронний друк]. – С. 90-93.

23. Невлюдов І. Ш., Разумов-Фризюк Є. А. / Regression analysis of the influence of 3D printing on product quality / І. Ш. Невлюдов, Разумов-Фризюк Є. А. // Theoretical and scientific bases of development of scientific thought : матеріали V-ої Міжнародної наукової конференції за новими тенденціями у науці та освіті. – Рим, Італія 16-19 лютого 2021 р. – 606 с.