

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра Матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри М та ЛВ
к.т.н., доц. Олександр КУЗИК
(прізвище та ініціали)
« ____ » _____ 2026__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:

**«Проектування і розрахунок
електричної печі опору періодичної
дії для деталей із сталі 20Х»**

**«Design and calculation of an electric
resistance furnace of periodic action
for parts made of steel 20X»**

Виконав: здобувач вищої освіти 4-го курсу
групи МЗ-23мбз

Дмитро Андрушко

(прізвище та ініціали)

ОПП «Прикладне матеріалознавство
та інжиніринг»

спеціальності G8 «Матеріалознавство»

Керівник роботи:

к.т.н., доц.

Олександр СКРИПНИК

(прізвище та ініціали)

Рецензент:

к.т.н., доц.

(прізвище та ініціали)

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет

Механіко-технологічний

Кафедра

Матеріалознавства та ливарного виробництва

Рівень вищої освіти

перший (бакалаврський)

Галузь знань

G Інженерія, виробництво та будівництво

Спеціальність

G8 Матеріалознавство

Освітньо-професійна

Прикладне матеріалознавство та інжиніринг

програма

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри М та ЛВ

Олександр КУЗИК

« ____ » _____ 2026 ____ р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Андрушко Дмитро Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проектування і розрахунок електричної печі опору
періодичної дії для деталей із сталі 20Х
2. Керівник роботи: к.т.н., доц. Олександр СКРИПНИК
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "13" 03 2026 року № 169-02
3. Строк подання роботи до захисту 17.06.2026
4. Вихідні дані до роботи – завдання на бакалаврську роботу,
– матеріали переддипломної практики;
– державні стандарти та технічні нормативи
5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Конструктивні особливості стаціонарного піскомета, устрій
стаціонарного піскомету та технічний опис системи, розрахунок основних
технологічних та конструктивних параметрів проектуємої машини, розрахунок на
міцність вузлів та деталей стаціонарного піскомету, правила
безпеки
6. Перелік графічного матеріалу: _____
 1. Кронштейн (лист 1)
 2. Електрична піч опору періодичної дії (лист 2)

7. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Проектування змішувача	Скрипник О. В.		

8. Дата видачі завдання 10.03.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Обґрунтування вибору матеріалу деталі та опис його властивостей	25.03.2026	
2	Аналіз конструкції деталі і технологічних умов на відливки	1.04.2026	
3	Термічна обробка деталі «Кронштейн»	9.04.2026	
4	Тепловий розрахунок електричної печі опору	15.04.2026	
5	Розрахунок та конструювання нагрівальних елементів	21.04.2026	
6	Визначення орієнтовного терміну служби нагрівача	7.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки	17.05.2026	
8	Оформлення презентації роботи	25.05.2026	
9	Здача роботи на кафедрі та перевірка наявності запозичень	10.06.2026	

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026__ р.

Керівник роботи _____ (Олександр СКРИПНИК)
(підпис)

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2026__ р.

Здобувач вищої освіти _____ (Дмитро АНДРУШКО)
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка викладена на 40 с., 6 рис., 5 табл., 16 джерел.

У бакалаврській роботі детально розглянуто процес термічної обробки виливків типу «Кронштейн», який включає:

- аналіз конструкції деталі - визначення властивостей та вимог до якості виробу;
- розрахунок корисної та встановленої потужності печі;
- розрахунок теплових втрат через багат шарову стінку;
- розрахунок та конструювання нагрівальних елементів, вибір матеріалу нагрівача;
- рекомендації щодо конструювання металевих нагрівачів, визначення допустимої питомої поверхневої потужності, розрахунок розмірів нагрівачів і орієнтовного терміну служби.

Об'єкт розробки – процес термічної обробки виливка з сталі 20Х «Кронштейн» масою 14,0 кг.

Предмет розробки – визначення технологічних параметрів, складання опису термічної обробки виливка та визначення основних параметрів електричної печі опору.

Результати проектування – спроектована електрична піч опору (ЕПО) періодичної дії, що дозволяє гнучко регулювати температурні режими і розраховано час технологічного циклу для нагрівання завантаження (садки) до 800 °С який становить приблизно 3,42 години, при цьому перепад температур між поверхнею та віссю заготовок не перевищує 12 °С;

Результати розробки можуть бути рекомендовані для впровадження при термічної обробки сталевих виливків середньої складності в умовах мілкосерійного та одиничного виробництва.

**ВИЛИВОК, САДКА, ЕЛЕКТРИЧНА ПІЧ ОПОРУ, ЧАС
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЦИКЛУ, ТЕПЛОВІ ВТРАТИ ЧЕРЕЗ**

БАГАТОШАРОВЕ ФУТЕРУВАННЯ СТІН, ПОТУЖНІСТЬ ПЕЧІ, ФЕРРОНІХРОМ

ABSTRACT

The explanatory note comprises 40 pages, 6 figures, 5 tables, and 16 references. This bachelor's thesis provides a detailed examination of the heat treatment process for "Bracket"-type castings, which includes:

- analysis of the part's design-determining the product's properties and quality requirements;
- calculation of the furnace's effective and rated power;
- calculation of heat losses through a multilayer wall;
- calculation and design of heating elements, selection of heater material;
- recommendations for the design of metal heaters, determination of the permissible specific surface power, calculation of heater dimensions and estimated service life.

Development Object – the heat treatment process of a 20X steel casting "Bracket" weighing 14,0 kg.

Development Subject – determination of process parameters, preparation of a heat treatment specification for the casting, and determination of the main parameters of the electric resistance furnace.

Design results: a designed intermittent-operation electric resistance furnace (ERF) that allows for flexible adjustment of temperature regimes, and the calculated process cycle time for heating the charge (load) to 800 °C, which is approximately 3.42 hours, while the temperature difference between the surface and the axis of the castings does not exceed 12 °C;

The results of this development can be recommended for implementation in the heat treatment of medium-complexity steel castings in small-batch and single-piece production.

**CASTING, BATCH, ELECTRIC RESISTANCE FURNACE, PROCESS
CYCLE TIME, HEAT LOSS THROUGH MULTILAYER WALL LINING,
FURNACE POWER, FERRONICHROME**

ЗМІСТ

	стр
ВСТУП.....	7
1 Обґрунтування вибору матеріалу деталі та опис його властивостей.....	10
2 Аналіз конструкції деталі і технологічних умов на відливоч.....	12
3 Термічна обробка деталі «Кронштейн».....	13
4 Тепловий розрахунок електричної печі опору.....	14
4.1 Розрахунок корисної потужності.....	17
4.2 Визначення встановленої потужності.....	20
4.3 Розрахунок теплових втрат.....	20
5 Розрахунок та конструювання нагрівальних елементів.....	25
5.1 Вибір матеріалу нагрівача.....	25
5.2 Рекомендації щодо конструювання металевих нагрівачів.....	26
5.3 Визначення допустимої питомої потужності нагрівача.....	26
5.4 Розрахунок розмірів нагрівачів.....	32
5.5 Визначення орієнтовного терміну служби нагрівача.....	34
ВИСНОВКИ.....	36
ЛІТЕРАТУРА.....	38
ДОДАТКИ.....	40

ВСТУП

Електричні печі опору (ЕПО) є фундаментом сучасної термічної обробки та ливарного виробництва. Їхня роль у забезпеченні високої якості металопродукції, точності температурних режимів та екологічності виробничих процесів робить їх незамінними як у великосерійному машинобудуванні, так і в інструментальних цехах [1].

В основі роботи електричних печей опору лежить закон Джоуля-Ленца. Теплова енергія виділяється при проходженні електричного струму через провідник з високим електричним опором (нагрівальний елемент). Кількість теплоти Q , що виділяється, визначається за формулою:

$$Q = I^2 R t \quad (1.1)$$

де I - сила струму;

R - опір провідника;

t - час проходження струму.

На відміну від паливних печей, де тепло передається продуктами згоряння, в ЕПО теплообмін відбувається переважно випромінюванням та конвекцією. Це дозволяє досягти високої рівномірності температурного поля навколо виробу, що є критичним для запобігання термічним напруженням та деформаціям у відповідальних деталях.

Електричні печі опору класифікують за декількома ознаками, які визначають їхнє технологічне призначення [2]:

1. за режимом роботи:

а. періодичної дії (садочні) - камерні, шахтні, ковпакові. Використовуються для термічної обробки одиничних або дрібносерійних партій (відпал, гартування, нормалізація);

б. безперервної дії (методичні) - конвеєрні, штовхальні, роликові. Оптимальні для масового виробництва, де необхідна стабільна продуктивність та автоматизація циклу;

2. за температурним режимом:

а. низькотемпературні (до 600 °С) - для відпуску та сушіння;

б. середньотемпературні (600...1250 °С) - найпоширеніші для більшості сталей та чавунів;

с. високотемпературні (понад 1250 °С) - для спікання порошкових матеріалів та плавки тугоплавких сплавів;

3. за атмосферою в робочому просторі:

а. з повітряним середовищем;

б. із захисною або контрольованою атмосферою (ендогаз, екзогаз, азот) для запобігання окисленню та знеуглецюванню поверхні;

с. вакуумні печі.

Порівняно з газовими або мазутними печами, ЕПО мають ряд стратегічних переваг, а саме:

– точність регулювання, тобто можливість підтримки температури з точністю до $\pm 1-2$ °С за допомогою ПД-регуляторів;

– чистота процесу - відсутність продуктів згоряння дозволяє отримувати виливки та деталі з високою якістю поверхні;

– автоматизація, що дозволяє легко інтегруватися в цифрові системи управління виробництвом і протоколювати кожен цикл обробки;

– екологічність - мінімальні викиди в атмосферу та кращі умови праці для персоналу.

Останнім часом у зв'язку з бурхливим розвитком металургії велике значення набуває термічна обробка сталей, яка вимагає дуже точної витримки заданого температурного режиму та високого ступеня рівномірності нагріву виробів, регулювати цей режим і забезпечувати його рівномірність в електричній печі можна набагато легше і точніше, ніж у паливній.

Для проведення такого режиму термообробки відмінно підходять електропечі муфельного типу. Головною особливістю таких печей є наявність так званого муфеля, який захищає матеріал, що обробляється і є головним робочим простором муфельної печі [3].

Електричні печі опору є складними теплотехнічними агрегатами, розвиток яких спрямований на підвищення енергоефективності та впровадження нових композитних матеріалів. У контексті підготовки фахівців-металургів та машинобудівників, глибоке розуміння процесів теплопередачі та конструкції ЕПО є ключовим для проектування технологічних ліній з мінімальним браком та високою продуктивністю.

1 Обґрунтування вибору матеріалу деталі та опис його властивостей

Для виготовлення деталі «Кронштейн» використовуємо сталь 20Х (ДСТУ 7806:2015) [4]. Ретельний аналіз фізико-механічних властивостей та хімічного складу сплаву дозволив зробити оптимальний вибір, що забезпечує високу якість та тривалий термін служби деталей. Детальні характеристики сталі 20Х наведено в таблицях 1.1, 1.2 та 1.3.

Таблиця 1.1 - Фізичні властивості сталі 20Х за ДСТУ 7806:2015

Марка сталі	Густина, ρ , кг/м ³	Лінійна усадка, ϵ , %	Ударна в'язкість, КСУ Дж/м ²	Модуль пружності під час розтягування, $E \times 10^{-5}$ МПа	Питома теплоємність, c , в інтервалі температур від 20 °С до 200 °С включно, Дж/(кг·К)	Коефіцієнт лінійного розширення, α , в інтервалі температур від 20 °С до 200 °С включно, $\alpha \times 10^{-6}/K$	Коефіцієнт теплопровідності, λ , за 20 °С, Вт/(м·К)
сталь 20Х	7850	2,0 – 2,2	не менше 78	2,1	470 - 490	12,6	47 - 52

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сталі 45Л за ДСТУ 7806:2015

Сплав	Межа міцності на розрив σ_r , МПа	Відносне подовження, %	Твердість за Брінеллем, НВ	Твердість за Роквеллом, НРС, після гаартування
сталь 20Х: – після відпалу – після покращення	440 – 500 ≥ 780	12 – 15	цеменація + гартування 200 – 280 покращення 200 - 240	58 – 62 20 – 30

Таблиця 1.3 – Хімічний склад сталі 20Х за ДСТУ 7806:2015

Елементи	C, %	Si, %	Mn, %	S, %	P, %	Cr	Ni	Cu
В межах	0,17 - 0,23	0,17 - 0,37	0,40 - 0,70	до 0,035	до 0,035	0,70 – 1,00	до 0,30	до 0,30
Середнє	0,20	0,27	0,55	-	-	0,85		

Сталь 20Х - це конструкційна легована хромиста сталь, яка широко використовується в машинобудуванні для виготовлення деталей, що працюють в умовах тертя та зносу під високим тиском. Завдяки збалансованому хімічному складу, вона поєднує в собі добру пластичність серцевини та високу твердість поверхні після хіміко-термічної обробки [5]. Ферит має низьку міцність, але порівняно пластичний. Цементит має високу твердість, але крихкий. Тому зі

зростанням вмісту вуглецю збільшуються твердість і міцність і зменшуються в'язкість і пластичність сталі.

Маркування «20X» вказує на те, що сталь містить приблизно 0,20 % вуглецю та близько 1 % хрому. Кожен елемент відіграє критичну роль у формуванні характеристик сплаву..

Вуглець є головним елементом, що визначає міцність та твердість сталі. Вміст вуглецю на рівні 0,20% забезпечує структуру, що складається з фериту та перліту у відпаленому стані. Така кількість вуглецю дозволяє сталі залишатися достатньо пластичною та придатною для зварювання. Проте головна особливість сталі 20X - це можливість цементації (науглецювання поверхні). Низький вміст вуглецю в основі гарантує високу в'язкість серцевини, що важливо для деталей, які піддаються ударним навантаженням.

Хром є основним легуючим елементом у цій марці. Хром сприяє подрібненню зерна та уповільнює розпад аустеніту під час охолодження. Це зміщує С-подібні криві вправо на діаграмі ізотермічного розпаду, що підвищує прогартуваність. Хром утворює стійкі карбіди $(Cr, Fe)_7C_3$, які значно підвищують твердість та зносостійкість поверхні. Він також підвищує межу текучості та корозійну стійкість у порівнянні з вуглецевими аналогами (наприклад, сталлю 20) [6].

Марганець дезоксидує сталь та зв'язує шкідливу сірку в сульфіді марганцю (MnS). Він підвищує міцність сталі, майже не знижуючи її пластичність. Разом із хромом марганець сприяє глибшому гартуванню деталей.

Кремній використовується як розкислювач при виплавці. Він розчиняється у фериті, зміцнюючи кристалічну решітку, що підвищує пружні властивості та опірність деформації.

У сталі 20X нікель присутній як технологічна домішка. Навіть у малих кількостях він дещо підвищує пластичність та в'язкість при низьких температурах (холодостійкість).

Сірка (S) та Фосфор (P) - вміст цих елементів обмежений до 0,035 %. Сірка викликає червоноламкість (крихкість при гарячій обробці). Фосфор призводить до

холодноламкості (крихкості при низьких температурах) через сегрегацію по межах зерен.

Структура сталі 20X динамічно змінюється залежно від етапу обробки [7]:

1. початковий стан - ферито-перлітна суміш;
 2. після цементації - поверхневий шар насичується вуглецем до 0,8...1,0 %.
- Після гартування поверхня перетворюється на високовуглецевий мартенсит із включеннями карбідів хрому, що забезпечує твердість близько 58...62 HRC.
3. структура серцевини - залишається низьковуглецевою (троостит або ферито-мартенситна суміш), що забезпечує ударну в'язкість $KCU \approx 800$ кДж/м².

Хімічний склад сталі 20X робить її ідеальним матеріалом для цементованих деталей. Хром забезпечує необхідну глибину гартування та зносостійкість карбідної фази, тоді як низький вміст вуглецю гарантує надійність деталі під динамічними навантаженнями.

2 Аналіз конструкції деталі і технологічних умов на відливок

Відливок відноситься до XI класу точності за ГОСТ 26645 – 85, виготовляється із сталі 20X за ДСТУ 7806:2015 [4]. Різностінність не більше 3 мм, короблення не більше 2 мм, перекис по роз'єму до 2 мм. На оброблених поверхнях допускаються одиничні раковини довжиною не більше 1/3 кола, шириною не більше 5 мм, або мілкі раковини найбільшим розміром 3 мм в кількості не більше 5 штук. На необроблених поверхнях допускаються одиничні раковини розміром не більше 9 мм, глибиною не більше 4 мм і в кількості не більше 8 штук на поверхню. У місцях спряження стержня і форми допускається присутність кільцевих заусениць довжиною до 1,5 мм.

Деталь "Кронштейн" представляє собою частину пристрою, який призначено для транспортування важких вантажів. Маса деталі 14 кг, габаритні розміри 402 × 180 × 100 мм, твердість 200...240 НВ.

Оброблюваними поверхнями являються посадкові місця на вал. Інші поверхні не оброблюються. Даний відливок є технологічним. Зовнішні поверхня

відливка представляє собою прямолінійні контури, зчленовані плавними переходами, які забезпечують деяку деформацію відливка при його усадці під час охолодження у формі і зниження залишкових напружень в місцях спряження прямолінійних ділянок. Відливок має два стержня, немає з'ємних частин, роз'єм моделі і форми один.

3 Термічна обробка деталі «Кронштейн»

Оскільки сталь 20Х (конструкційна легована хромиста сталь) має низький вміст вуглецю (0,17...0,23 %), вона добре зварюється і обробляється, але без хіміко-термічної обробки не має високої твердості тому піддається комбінованому зміцненню [8].

Основними етапами термічної обробки є:

1. цементация (хіміко-термічна обробка). Це основний процес для сталі 20Х. Деталі нагрівають у середовищі із значним вмістом вуглецю (твердому або газовому карбюризаторі) до температур 900...950 °С. Метою етапу є насичення поверхневого шару вуглецем до концентрації 0,8...1,0 %, в результаті чого формується надзвичайно твердий шар товщиною від 0,5 до 1,5 мм залежно від часу витримки. Швидкість формування поверхневого шару зазвичай складає 0,1 мм за годину;
2. гартування. Після цементации сталь 20Х обов'язково піддається гартуванню. Існує два підходи до гартування:
 - а. безпосереднє гартування - охолодження прямо з температури цементации (застосовується рідко, бо призводить до росту зерна).
 - б. гартування з повторним нагрівом - деталь охолоджують після цементации, а потім знову нагрівають до 800...850 °С і швидко охолоджують у маслі. Охолодження в маслі є обов'язковим для сталі 20Х, щоб уникнути деформацій та тріщин, які можуть виникнути при охолодженні у воді;
3. низький відпуст - завершальний етап, який проводиться при температурі 150...200 °С. Мета даного етапу - зняття внутрішніх напружень, що виникли під

час гартування, при збереженні максимальної твердості. Після низького відпуску поверхнева твердість становить 58...62 HRC, а серцевина залишається достатньо міцною та пластичною (близько 30...40 HRC). Тривалість низького відпуску 1,5...2,5 години.

Деталь «Кронштейн» не піддається інтенсивному зносу, але потребує покращення загальних характеристик. В цьому випадку застосовуємо покращення (гартування з високим відпуском), що забезпечує стабільний комплекс міцності та пластичності [9].

Нижче наведено опис режиму покращення, який включає:

1. режим гартування - температура нагріву 800...880 °С, охолодження в масло (для запобігання деформаціям та тріщинам) або в воду. Час виходу на температуру нагріву становить близько 3,4...3,5 години. Після досягнення заданої температури по всьому перерізу деталі витримуються 30...40 хвилин (для повної аустенітизації);
2. режим високого відпуску при температурі нагріву 550...600 °С. Метою високого відпуску є отримання структури сорбіту відпуску, зняття внутрішніх напружень. Охолоджують відливки на повітрі або мастило. При високому відпуску час витримки має бути тривалим для стабілізації структури. Для деталей типу «Кронштейн» він становить 1,5...2,5 години після досягнення температури в камері печі.

Графік термічної обробки деталі «Кронштейн» наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Графік термічної обробки деталі «Кронштейн»

Операція	Температура, °С	Час нагріву, хв	Час витримки, хв	Середовище охолодження
Гартування	870 ± 10	~210	40	мастило
Відпуск	580 ± 20	~120	120	повітря

4 Тепловий розрахунок електричної печі опору

Мета теплового розрахунку електричних печей опору - визначення оптимальних параметрів (енергетичних, геометричних, економічних) при яких забезпечується проведення заданого технологічного процесу. За результатами

розрахунку вибирають конструкцію футерування печі, визначають встановлену потужність печі, обчислюють теплові втрати печі.

Завершують тепловий розрахунок обчисленням продуктивності печі, питомої витрати електроенергії та теплового ККД. Продуктивність садових (періодичних) ЕПО:

$$G = \frac{M}{t_{ц}} \quad (4.1)$$

де G - продуктивність печі, кг/с;

M - маса одноразового завантаження (садки), кг;

$t_{ц}$ - час технологічного циклу, с.

Час циклу визначається за формулою:

$$t_{ц} = t_{н} + t_{зав} + t_{охол}, \quad (4.2)$$

де $t_{н}$ - час нагрівання;

$t_{зав}$ - час завантаження та вивантаження;

$t_{охол}$ - час на охолодження.

Для матеріалу деталі (сталь 20Х) приймаємо $\lambda = 30$ ккал/м·год °С, $c = 0,16$ ккал/кг °С, $\gamma = 7850$ кг/м³ [10], звідси коефіцієнт температуропровідності виробу:

$$a = \frac{\lambda}{c \gamma} \quad (4.3)$$

$$a = \frac{30}{0,16 \cdot 7850} = 0,0239 \text{ м}^2 \text{ год}$$

При нагріванні заготовок в печі при її температурі 850 °С, коефіцієнт теплопередачі буде становити $\alpha_{850} = 140$ ккал/м² год °С [11].

Визначаємо критерій Біо:

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} R \quad (4.4)$$

$$Bi = \frac{140}{30} 0,25 = 1,17$$

До кінця нагрівання, коли температура поверхні досягне 800 °С температурний критерій буде становити:

$$\Theta = \frac{t_{\text{нечі}} - t_{\text{нов}}}{t_{\text{нечі}} - t_0} \quad (4.5)$$

$$\Theta = \frac{850 - 800}{850 - 20} = 0,06$$

За графіком для розрахунку нагріву поверхні заготовки визначаємо критерій Фур'є:

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2} \quad (4.6)$$

При $Fo = 1,4$ час нагрівання визначається із співвідношення:

$$\tau = \frac{FoR^2}{a} \quad (4.7)$$

$$\tau = \frac{1,4 \cdot 0,0625}{0,0239} = 3,42 \text{ год}$$

Такому критерію Фур'є відповідає $\Theta_{\text{центр}} = \frac{t_{\text{нечі}} - t_{\text{центр}}}{t_{\text{нечі}} - t_0} = 0,075$

Звідки:

$$t_{целмп} = t_{нач} - (t_{нач} - t_0) \Theta_{целмп} \quad (4.8)$$

$$t_{целмп} = 850 - (850 - 20) 0,075 = 788 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Перепад між температурами поверхні та осі заготовок через 3,42 год з початку нагрівання становить 12 °С.

Таким чином, час технологічного циклу складає:

$$t = 600 + 13300 + 10800 = 24720 \text{ c} = 6 \text{ год } 52 \text{ хв}$$

В садці розташовано 4 відливки загальною масою $M = 4 \cdot 14 = 56 \text{ кг}$

Звідси, продуктивність печі:

$$G = \frac{56}{24720} = 2,26 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$$

4.1 Розрахунок корисної потужності

Теплоту $Q_{зав}$ розраховують виходячи з термодинаміки процесів, що відбуваються при термообробці завантаження. У разі коли функціональна залежність теплоємності від температури не відома, можна приблизно прийняти:

$$Q = M c_c (T_n - T_k), \quad (4.9)$$

$$c_c = \frac{1}{2} (c_k - c_n), \quad (4.10)$$

де c_c - середня теплоємність завантаження, Дж/кг·К;

c_n - теплоємність завантаження Дж/кг·К за $T_n = 298 \text{ К}$;

c_k - теплоємність завантаження Дж/кг·К за $T_k = 1073 \text{ К}$.

$$c_c = \frac{1}{2}(1859 - 473) = 693 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

$$Q_{зав} = 56 \cdot 693(1073 - 298) = 30,076 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Для розрахунку відповідної потужності $N_{зав}$ (потужність, необхідна для нагрівання завантаження та проходження фізико-хімічних процесів) необхідно знати час нагрівання завантаження t_n до заданої температури, тоді:

$$N_{зав} = \frac{Q_{зав}}{t_n} \quad (4.11)$$

$$N_{зав} = \frac{30,076 \cdot 10^6}{13320} = 2258 \text{ Вт}$$

Знаючи питому витрату електроенергії, можна оцінити енергетичну ефективність процесу:

$$q_{эф} = \frac{N_{зав}}{G}, \quad (4.12)$$

де $q_{эф}$ - питома витрата електроенергії, Дж/кг.

$$q_{эф} = \frac{2258}{2,26 \cdot 10^{-3}} = 0,99 \text{ МДж}$$

Теплота, необхідна для прогрівання допоміжних елементів:

$$Q_{дон} = M_{дон} c_i (T_k - T_n), \quad (4.13)$$

де $M_{\text{дон}}$ - маса допоміжного елемента, кг;

$c_i = 0,001$ Дж/кг К [12] - усереднена теплоємність i -го елемента,.

Як допоміжний матеріал виступає підкладка під оброблюваний виріб.

Розміри: довжина $a = 550$ мм, ширина $b = 550$ мм, висота $h = 25$ мм, $\rho = 3100$ кг/м³.

Об'єм допоміжного матеріалу:

$$V = a \cdot b \cdot h = 0,55 \cdot 0,55 \cdot 0,015 = 0,0045 \text{ м}^3$$

Маса допоміжного матеріалу:

$$M_{\text{дон}} = \rho V = 3100 \cdot 0,0045 = 14,1 \text{ кг}$$

Тоді:

$$Q_{\text{дон}} = 14,1 \cdot 0,001(1073 - 298) = 10,9 \text{ Дж}$$

$$N_{\text{дон}} = \frac{10,9}{13320} = 0,82 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$$

В результаті для корисної теплоти та потужності маємо:

$$Q_{\text{нов}} = Q_{\text{зав}} + Q_{\text{дон}} \quad (4.14)$$

$$N_{\text{нов}} = N_{\text{зав}} + N_{\text{дон}} \quad (4.15)$$

$$Q_{\text{нов}} = 30,076 \cdot 10^6 + 10,9 \approx 30,076 \text{ МДж}$$

$$N_{\text{нов}} = 2258 + 0,82 \cdot 10^{-3} \approx 2258 \text{ Вт}$$

4.2 Визначення встановленої потужності

Встановлена потужність N_y - це споживана електропіччю потужність, взята із запасом, що враховує «старіння» нагрівачів і можливе тимчасове падіння напруги в мережі:

$$N_y = k_3 N_{\text{вум}} , \quad (4.16)$$

де k_3 - коефіцієнт запасу потужності, $k_3 = 1,2 \dots 1,4$ [12] для ЕПС періодичної дії.

$$N_{\text{вум}} = N_{\text{зав}} + N_{\text{дон}} + N_{\text{втр}} \quad (4.17)$$

$$N_{\text{вум}} = 2258 + 0,82 \cdot 10^{-3} + 2561 \approx 4819 \text{ Вт}$$

Тоді встановлена потужність:

$$N_y = 1,3 \cdot 4819 = 6265 \text{ Вт}$$

4.3 Розрахунок теплових втрат

При розрахунку потужності, необхідної для компенсації теплових втрат ЕПС, приймають, що піч працює в тепловому режимі, коли теплові потоки постійні в часі. Зазвичай обмежуються розрахунками втрат теплоти через стінки печі N_{ϕ} :

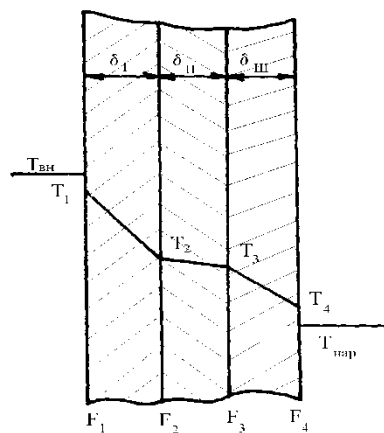
$$N_{\text{втр}} = k'_3 N_{\phi} , \quad (4.18)$$

де k'_3 - коефіцієнт запасу.

Коефіцієнт запасу на невраховані втрати потужності, наприклад, «старіння» футерування, втрати через нещільність футерування, через шви, короткі теплові замикання приймають рівним 1,2...1,4.

Розрахунок теплових втрат через стіни печі зводиться до вирішення задачі теплопередачі через багат шарову плоску або циліндричну поверхню.

Для плоскої стінки, що має, наприклад, три шари теплоізоляції, приймемо такі позначення (рис.1).



$T_{вн}$ - температура всередині печі, T_i - температура на поверхні і теплоізолюючого шару, $T_{зов}$ - температура зовні печі, δ_j - товщина j шару теплоізоляції, F_i - площа і поверхні теплоізолюючого шару

Рисунок 4.1 – До розрахунку теплових втрат через тришарову стінку печі

Рівняння теплопередачі має вигляд:

$$N_{\phi} = \frac{T_{вн} - T_{зов}}{\frac{1}{\alpha_{вн} F_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1 F_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 F_2} + \frac{1}{\alpha_{зов} F_3}}, \quad (4.19)$$

де $\alpha_{вн}$, $\alpha_{зов}$ - коефіцієнт тепловіддачі внутрішнього (I) та зовнішнього (III) шарів, відповідно, Вт/м²·К;

λ_j - коефіцієнт теплопровідності j шару, Вт/м·К;

F_j - усереднена площа j шару, м².

Так як λ залежить від температури матеріалу футеровки, то в рівняння підставляють усереднений коефіцієнт, взятий для середньої температури шару,

наприклад, для III шару $T_{III} = \frac{T_3 + T_4}{2}$. Поверхню F_j беруть як середнє квадратичне площ поверхні j шару, наприклад, $F_{III} = \sqrt{F_3 F_4}$. N_ϕ розраховується окремо для кожної стінки печі, потім їх складають та отримують сумарну N_ϕ для печі.

Розрахунок футеровок проводять методом послідовних наближень [13]:

- а) задаємо кількість шарів, їх товщину та матеріал футерування, геометричні розміри печі та внутрішнього простору, температуру всередині печі (або на внутрішній поверхні футерування - T_1) та температуру зовні;
- б) довільно задаються значеннями температур на поверхнях і теплоізолюючих шарів T_i ;
- в) розраховуємо F_j або H_j та T_j ;
- г) за довідковими даними на підставі обраної T_j визначається λ_j ;
- д) за рівнянням (1.20) розраховуємо N_ϕ ;
- е) перевіряються значення температур T_i , розв'язуємо обернену задачу по окремих шарах футерування:

$$T_1 = T_{\text{вн}} - \frac{N_\phi}{\alpha_{\text{вн}} F_1}, T_2 = T_1 - \frac{N_\phi \delta_1}{\lambda_1 F_1}, T_3 = T_2 - \frac{N_\phi \delta_2}{\lambda_2 F_2}, T_{\text{зов}} = T_3 - \frac{N_\phi}{\alpha_{\text{зов}} F_3} \quad (4.20)$$

ж) порівнюємо отримані значення T_i із заданими на початку розрахунку. Якщо ці величини збігаються із достатньою точністю, то розрахунок вважається закінченим. У разі розбіжності, задаємо нові T_i та розрахунок повторюємо.

– Для горизонтальної стінки, яка звернена до гори - $T_{\text{вн}} = 1123$ К, $\lambda_1 = 1,16$ Вт/м·К, $T_{\text{зов}} = 333$ К, $\lambda_2 = 0,035$ Вт/м·К, $\delta_1 = 0,065$ м, $\delta_2 = 0,035$ м, $F_1 = 0,36$ м², $F_2 = 0,53$ м², $F_3 = 0,64$ м², $\alpha_{\text{вн}} = 60$ Вт/м²·К, $\alpha_{\text{зов}} = 14,5$ Вт/м²·К.

Тоді:

$$N_{\phi 1} = \frac{1123 - 333}{\frac{1}{60 \cdot 0,36} + \frac{0,065}{1,16 \cdot 0,36} + \frac{0,035}{0,035 \cdot 0,53} + \frac{1}{14,5 \cdot 0,64}} = 359,66 \text{ Вт}$$

Перевірка температур:

$$T_1 = 1123 - \frac{359,66}{60 \cdot 0,36} = 1106 \text{ K}$$

$$T_2 = 1106 - \frac{359,66 \cdot 0,065}{1,16 \cdot 0,36} = 1050 \text{ K}$$

$$T_3 = 1050 - \frac{359,66 \cdot 0,035}{0,53 \cdot 0,035} = 371,76 \text{ K}$$

$$T_{\text{зов}} = 371,76 - \frac{359,66}{14,5 \cdot 0,64} = 333 \text{ K}$$

– Для вертикальних стінок (4 штуки) - $\alpha_{\text{вн}} = 56,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, $\alpha_{\text{зов}} = 12,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$,

$$N_{\phi 2} = N_{\phi 3} = N_{\phi 4} = N_{\phi 5}.$$

Тоді:

$$N_{\phi 2} = \frac{1123 - 333}{\frac{1}{56,2 \cdot 0,36} + \frac{0,065}{1,16 \cdot 0,36} + \frac{0,035}{0,035 \cdot 0,53} + \frac{1}{12,2 \cdot 0,64}} = 355,86 \text{ Вт}$$

Перевірка температур:

$$T_1 = 1123 - \frac{355,86}{56,2 \cdot 0,36} = 1105 \text{ K}$$

$$T_2 = 1105 - \frac{355,86 \cdot 0,065}{1,16 \cdot 0,36} = 1050 \text{ K}$$

$$T_3 = 1050 - \frac{355,86 \cdot 0,035}{0,53 \cdot 0,035} = 378,56 \text{ K}$$

$$T_{зоб} = 378,56 - \frac{355,86}{12,2 \cdot 0,64} = 333 \text{ K}$$

– Для горизонтальної стінки, яка звернена донизу - $\alpha_{гн} = 55,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, $\alpha_{зоб} = 9,9 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Тоді:

$$N_{\phi_6} = \frac{1123 - 333}{\frac{1}{55,6 \cdot 0,36} + \frac{0,065}{1,16 \cdot 0,36} + \frac{0,035}{0,035 \cdot 0,53} + \frac{1}{9,9 \cdot 0,64}} = 351,07 \text{ Вт}$$

Перевірка температур:

$$T_1 = 1123 - \frac{351,07}{55,6 \cdot 0,36} = 1105 \text{ K}$$

$$T_2 = 1105 - \frac{351,07 \cdot 0,065}{1,16 \cdot 0,36} = 1051 \text{ K}$$

$$T_3 = 1051 - \frac{351,07 \cdot 0,035}{0,53 \cdot 0,035} = 388,4 \text{ K}$$

$$T_{зоб} = 388,4 - \frac{351,07}{9,9 \cdot 0,64} = 333 \text{ K}$$

Знайдені значення температури та задані збігаються в межах норми.

Загальні втрати теплоти через стінки печі:

$$\sum N_{\phi_{заг}} = N_{\phi_1} + N_{\phi_2} + N_{\phi_3} + N_{\phi_4} + N_{\phi_5} + N_{\phi_6} \quad (1.22)$$

$$\sum N_{\phi_{заг}} = 359,66 + 4 \cdot 355,86 + 351,07 = 2134,17 \text{ Вт}$$

Потужність, необхідна для компенсації теплових втрат ЕПС:

$$N_{\text{впр}} = 1,2 \cdot 2134,17 \approx 2561 \text{ Вт}$$

5 Розрахунок та конструювання нагрівальних елементів

5.1 Вибір матеріалу нагрівача

Ферроніхром - це спеціалізований прецизійний сплав на основі нікелю та хрому з суттєвим вмістом заліза. Він поєднує в собі високий електричний опір та хорошу жаростійкість, будучи при цьому більш економічно доступною альтернативою класичним ніхромам за рахунок заміщення частини дорогого нікелю залізом [14].

Найбільш поширеними марками ферроніхрому згідно з ДСТУ 8923:2019 є X15H60 та X20H80 (хоча остання ближче до чистого ніхрому, залізо в ній також присутнє в обмеженій кількості) [15].

Типовий склад ферроніхрому - нікель (Ni) 55...61 %, хром (Cr) 15...18 %, залізо (Fe) залишок $\approx 20...25$ %, марганець (Mn) до 1,5%, кремній (Si) до 1,1 %.

Завдяки своїй структурі (твердий розчин хрому та заліза в нікелі), ферроніхром має наступний набір характеристик:

- високий питомий електричний опір. Становить приблизно 1,0...1,2 Ом·мм²/м, що дозволяє використовувати його як нагрівальний елемент;
- жаростійкість. Сплав здатний працювати тривалий час при температурах до 1000...1100 °С без значного руйнування та окислення;
- механічна міцність. Має високу границю міцності при розтягуванні та добру пластичність, що дозволяє виготовляти з нього дріт тонкого перерізу або стрічку;
- корозійна стійкість. Високий вміст хрому сприяє утворенню захисної оксидної плівки на поверхні.

Температура плавлення ферроніхрому в середньому 1350...1400 °С.

Рекомендовані та максимально допустимі температури нагрівача з ферроніхрому наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 - Рекомендовані та максимально допустимі температури нагрівача

Матеріал нагрівача	Рекомендована температура, °С		Максимально допустима температура, °С	
	Безперервний режим роботи	Переривчастий режим роботи	Безперервний режим роботи	Переривчастий режим роботи
Ферроніхром Х15Н60	950	900	1050	1000

5.2 Рекомендації щодо конструювання металевих нагрівачів

Дротові зигзагоподібні нагрівачі (рис. 2.1) рекомендують кріпити в спеціальних керамічних плитках (при $d = 4-7$ мм), або підвішувати на металевих жаростійких або керамічних гачках (штирях), якщо $d > 7$ мм.

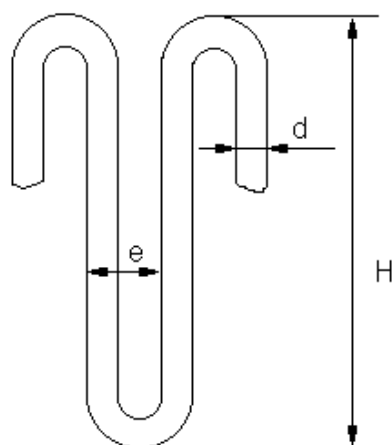


Рисунок 5.1 - Дротовий зигзагоподібний нагрівач

Висота зигзагу дротяного нагрівача $H = 0,3$ м. Дріт виконаний зі сплаву Ст-Ні. Нагрівач розташовується на дверцятах печі та на трьох його бічних стінах.

5.3 Визначення допустимої питомої потужності нагрівача

Одним із ключових параметрів при проектуванні електропечей опору є питома поверхнева потужність W (поверхнєве навантаження). Дана величина визначає тепловий потік, що випромінюється одиницею площі нагрівача, і безпосередньо впливає на його стаціонарну температуру та експлуатаційний ресурс у заданих технологічних умовах.

Для оцінки ефективності та теплової напруженості реальної конструкції використовують порівняння з теоретичною моделлю - ідеальним нагрівачем (W_{id}).

Концепція ідеального нагрівача базується на таких допущеннях:

1. геометрія. Система розглядається як дві суцільні, паралельні та нескінченні площини (нагрівач та об'єкт нагріву/завантаження);
2. теплообмін. Передача енергії здійснюється виключно шляхом випромінювання;
3. ізоляція. Футерування печі вважається ідеальним і таким, що не бере участі в активному теплообміні (адіабатні умови).

Таким чином, розрахунок фактичного значення W відносно W_{id} дозволяє врахувати коефіцієнт ефективності випромінювання та визначити допустимі межі термічного навантаження для обраного сплаву (наприклад, ферроніхром).

Для запропонованого нагрівача рівняння теплопередачі:

$$W_{id} = c_0 \varepsilon_{np} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_z}{100} \right)^4 \right], \quad (5.1)$$

де $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ [16] - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

ε_{np} - наведений ступінь чорноти системи нагрівач-завантаження;

T_n - температура нагрівача, К;

T_z - температура завантаження, К.

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_z} + \frac{1}{\varepsilon_n} - 1}, \quad (5.2)$$

де ε_z - ступінь чорноти матеріалу завантаження $\varepsilon_z = \varepsilon_n$;

$\varepsilon_n = 0,8$ [16] - ступінь чорноти матеріалу нагрівача.

Для того, щоб розрахувати W_{id} при відомій температурі завантаження печі, необхідно задатися температурою нагрівача. Зазвичай T_n беруть на 50...100 градусів вище за температуру T_z .

Звідси:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8} - 1} = 0,67$$

$$W_{id} = 5,67 \cdot 0,67 \left[\left(\frac{1133}{100} \right)^4 - \left(\frac{1073}{100} \right)^4 \right] = 12243,82 \text{ Вт/м}^2$$

На відміну від теоретичної моделі ідеального нагрівача, реальний електронагрівальний елемент характеризується нерівномірним розподілом теплових потоків. Це зумовлено тим, що лише частина енергії випромінюється безпосередньо на об'єкт нагріву (виріб). Решта променистої енергії потрапляє на сусідні ділянки самого нагрівача або на футерування печі, що призводить до явища взаємного екранування.

Для врахування цих втрат у розрахунках використовують поняття умовної ефективної поверхні (F_{ef}), яка завжди менша за повну геометричну площу нагрівача (F_n).

Ключові чинники, що визначають ефективність випромінювання:

1. геометричний фактор. Частина променів перехоплюється сусідніми витками зигзага або спіралі;
2. участь футерування. Тепло, що потрапляє на футерування, частково поглинається, а частково відбивається назад на нагрівач, підвищуючи його власну температуру;
3. корекція потужності. Через обмежену ефективну поверхню допустима питома потужність реального нагрівача (W_d) повинна бути скоригована відносно потужності ідеального нагрівача (W_{id}).

Зв'язок між цими величинами визначається через коригувальні коефіцієнти:

$$W_d = W_{id} \cdot \alpha_{ef} \cdot \alpha_z \cdot \alpha_c \cdot \alpha_p, \quad (5.3)$$

де α_{ef} - коефіцієнт ефективності випромінювання даної системи нагрівача;

α_z - коефіцієнт кроку;

α_c - коефіцієнт, що враховує залежність W від наведеного коефіцієнта випромінювання C_{np} ;

α_p - коефіцієнт, що враховує вплив розмірів садка.

Коефіцієнт α_{ef} характеризує інтегральну здатність системи нагрівачів передавати тепло випромінюванням за умови максимально щільного їх розміщення. Це значення визначається конструктивними обмеженнями (мінімально допустимими відстанями між витками), що запобігають електричному пробію або локальному перегріву. Для дротяного зигзага з відносною відстанню $e/d = 2,75$ значення коефіцієнта становить $\alpha_{ef} = 0,68$. Це означає, що через ефект взаємного екранування ефективність випромінювання становить лише 68 % від потужності одиночного вільного провідника.

Коефіцієнт кроку α_z є функціональною залежністю, що враховує вплив геометричних параметрів розміщення нагрівача на його питому поверхневу потужність. Він залежить від безрозмірних відношень e/d - для дротяних нагрівачів круглого перерізу, e/b та t/d - для стрічкових або специфічних конфігурацій.

Для практичних розрахунків значення α_z визначаються за емпіричними графіками (рис. 5.2), що дозволяє коректувати поверхневу потужність залежно від обраного кроку намотки або зигзага [13].

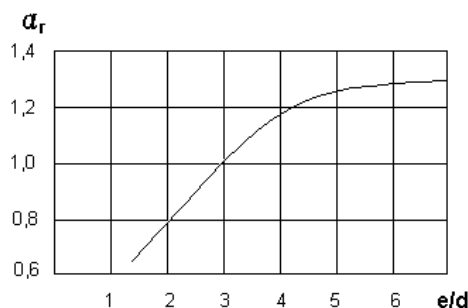


Рисунок 5.2 - Значення α_z для дротяного зигзагоподібного нагрівача

При проектуванні складних термічних систем часто застосовують методи аналогії. Зокрема, розрахунок систем паралельно розташованих стрижнів, а також нагрівання виробів, розміщених всередині спіральних елементів, здійснюється за

методикою, аналогічною до розрахунку дротяних зигзагоподібних нагрівачів (із використанням графічних залежностей α_s). Такий підхід базується на тому, що ключовим фактором впливу на питому потужність є геометричне екранування витків, тоді як інші другорядні параметри мають неістотний вплив на точність результатів і в інженерних розрахунках ними нехтують

Для коректного визначення теплової напруженості вводиться коефіцієнт α_c , який враховує залежність питомої поверхневої потужності від наведеного коефіцієнта випромінювання системи (c_{np}). Для системи, коли завантаження знаходиться всередині замкнутої випромінюючої поверхні:

$$c_{np} = \frac{5,67}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{F_s}{F_{cm}} \left(\frac{1}{\varepsilon_n} - 1 \right)}, \quad (5.4)$$

де $F_s = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 1 = 1 \text{ м}^2$ - площа поверхні завантаження, яка звернена до нагрівача;

$F_{cm} = 0,308 \cdot 0,3 \cdot 4 = 0,3698 \text{ м}^2$ - площа поверхні стін камери печі, зайнята нагрівачами.

Коефіцієнт α_p враховує вплив розмірів завантаження на величину питомої поверхневої потужності. Значення цього коефіцієнта визначають як функцію відношення F_s/F_{cm} (рис. 5.3). У разі коли $F_s/F_{cm} > 0,8$, поправку розмір завантаження не вносять (тобто $\alpha_p = 1$) [13].

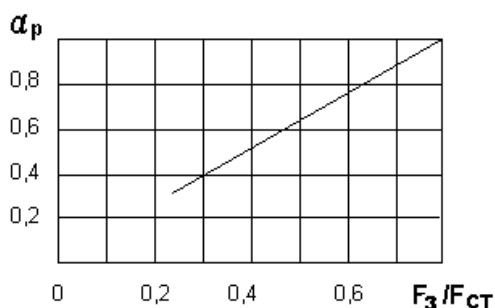
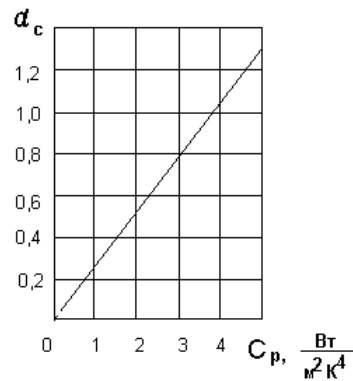


Рисунок 5.3 – Залежність α_p від F_s/F_{cm}

Залежність α_c від c_{np} показано рис. 5.4.

Рисунок 5.4 - Залежність α_c від c_{np}

При $F_3 = 1 \text{ м}^2$ $\alpha_{ef} = 0,68$, $\alpha_z = 0,88$, $\alpha_c = 0,8$ $F_{cm} = 0,3698 \text{ м}^2$ $\varepsilon_3 = \varepsilon_n = 0,8$ величина

F_3/F_{cm} дорівнює:

$$\frac{F_3}{F_{cm}} = \frac{1}{0,37} = 2,7$$

Тоді:

$$c_{np} = \frac{5,67}{0,8 + 2,7 \left(\frac{1}{0,8} - 1 \right)} = 2,95 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

$$W_\delta = 12243,82 \cdot 0,68 \cdot 0,88 \cdot 0,8 \cdot 1 = 5861,36 \text{ Вт/м}^2$$

Результатом проведеного теплотехнічного розрахунку є значення гранично допустимої питомої поверхневої потужності W_δ . Дана величина визначає максимальний тепловий потік, який здатна забезпечити обрана конструкція нагрівальних елементів без ризику термічного руйнування матеріалу (ферроніхром).

Розрахована потужність випромінюється з повної геометричної поверхні нагрівача F_n і перебуває у прямій залежності від його геометричних та електричних характеристик.

5.4 Розрахунок розмірів нагрівача

При проектуванні нагрівачів, що працюють у високотемпературному режимі (понад 600 °С), розрахунок базується на наступних фізичних передумовах:

- припускається, що вся електрична потужність N_y , яку піч споживає з мережі, повністю перетворюється на теплову енергію в нагрівальних елементах. При цьому робоча напруга U вважається стабільною:

$$N_y = \frac{U^2}{R} \quad (5.5)$$

- нагрівач має фіксовану довжину l та сталий поперечний переріз S . Питомий електричний опір матеріалу ρ приймається незмінним для заданого температурного режиму. Опір провідника розраховується за формулою:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (5.6)$$

- оскільки при температурах вище 600 °С перенесення тепла відбувається переважно випромінюванням, енергія передається від поверхні нагрівача F_n до виробів та футеровки печі. Ключовим показником ефективності є питома поверхнева потужність W [13]:

$$W = \frac{N_y}{F_n} \quad (5.7)$$

Для практичного визначення розмірів нагрівача (дроту або стрижня) діаметром d необхідно встановити взаємозв'язок між його геометричними та електричними характеристиками.

Виходячи з наведених вище формул, для круглого перерізу:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho N_y^2}{\pi^2 U^2 W}} \quad (5.8)$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{N_y U^2}{4\pi\rho W^2}} \quad (5.9)$$

$$M = \rho_n l \frac{\pi d^2}{4}, \quad (5.10)$$

де M - маса нагрівача, кг;

$\rho_n = 8300$ кг/м³ [16] - густина матеріалу нагрівача;

$\rho = 1,3 \times 10^{-6}$ Ом·м [16] - опір матеріала нагрівача;

$N_y = 6265$ Вт - встановлена потужність;

$U = 220$ В - робоча напруга;

$W_\delta = 5861,36$ Вт/м² - питома потужність нагрівача.

Таким чином:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \cdot 6265^2}{3,14^2 \cdot 220^2 \cdot 5861,36}} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{6265 \cdot 220^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \cdot 5861,36^2}} = 73,52 \text{ м}$$

$$M = 8300 \cdot 73,52 \cdot \frac{3,14 \cdot (4,17 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 8,08 \text{ кг}$$

$$R = 1,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{73,52}{3,14 \cdot (4,17 \cdot 10^{-3})^2} = 1,38 \text{ Ом}$$

5.5 Визначення орієнтовного терміну служби нагрівача

У процесі тривалої експлуатації електричні нагрівачі піддаються термічній деградації («старінню»), що виявляється у зміні їхніх геометричних та електрофізичних параметрів. Основним чинником цього процесу є поверхневе окислення металу, яке призводить до поступового зменшення корисної площі поперечного перерізу провідника та, як наслідок, до необхідності його заміни.

Припускаючи, що швидкість окислення $v_{ок}$ є константою в часі, динаміку деградації нагрівача круглого перерізу можна описати безрозмірним коефіцієнтом n , який визначає відношення площі окисленого шару до початкової площі перерізу:

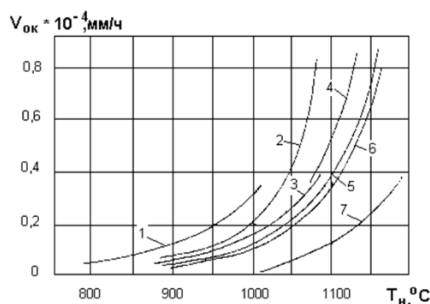
$$n = \frac{4v_{ок}t(d - v_{ок}t)}{d^2} \quad (5.11)$$

де n - відношення площі перерізу окисленого шару до початкової площі перерізу нагрівача;

t - час роботи нагрівача.

$$n = \frac{4 \cdot 0,09 \cdot 10^{-4} \cdot 25220 (4,17 - 0,09 \cdot 10^{-4} \cdot 25220)}{4,17^2} = 0,205$$

Швидкість окислення $v_{ок}$ для деяких сплавів наведено на рис. 2.5.



1 - X15H60, 2 - X25H20, 3 - X15H60-H, 4 - X20H80T3A, 5 - X20H80T,
6 - X20H80, 7 - X20H80-H

Рисунок 5.5 - Залежність швидкості окислення від температури нагрівача для різних сплавів

Виходячи з цієї умови, розрахунковий термін служби нагрівача t_c визначається як час роботи до моменту досягнення коефіцієнтом n граничного значення 0,2. Вирішуючи рівняння (5.11) відносно t_c при $n = 0,2$, отримуємо формулу для визначення ресурсу роботи нагрівального елемента.

$$t = \frac{0,5d(1 - \sqrt{1 - 0,2})}{v_{ок}} \quad (5.12)$$

$$t = \frac{0,5 \cdot 4,17(1 - \sqrt{1 - 0,2})}{0,09 \cdot 10^{-4}} = 24600 \text{ год}$$

ВИСНОВКИ

На основі проведених розрахунків та проектування електричної печі опору для термічної обробки деталей із сталі 20Х можна зробити наступні висновки:

1. спроектована піч належить до типу камерних електричних печей опору (ЕПО) періодичної дії, що дозволяє гнучко регулювати температурні режими;
2. розрахований час технологічного циклу для нагрівання завантаження (садки) до 800 °С становить приблизно 3,42 години, при цьому перепад температур між поверхнею та віссю заготовок не перевищує 12 °С;
3. продуктивність печі визначена виходячи з маси одноразового завантаження (4 виливки) та тривалості циклу;
4. визначено корисну потужність ($N_{зав}$), необхідну для безпосереднього нагрівання деталей та допоміжних елементів (підкладки);
5. встановлена потужність печі (N_y) розрахована з урахуванням коефіцієнта запасу (1,2...1,5 для печей періодичної дії), що дозволяє компенсувати можливе падіння напруги в мережі та поступове «старіння» нагрівальних елементів;
6. проведено розрахунок теплових втрат через багатопарове футерування стін, поду та склепіння печі за методом послідовних наближень, що підтвердило ефективність обраної теплоізоляції;
7. як матеріал нагрівачів обрано ферроніхром марки Х15Н60, який має високий питомий електричний опір та здатність працювати при температурах до 1000...1100 °С;
8. розраховано геометричні параметри дротових зигзагоподібних нагрівачів: визначено необхідний діаметр дроту (d) та його загальну довжину (l) для забезпечення встановленої потужності при робочій напрузі 220 В;
9. визначено допустиму питому поверхневу потужність (W_d), яка враховує ефекти екранування та взаємне розташування нагрівача і завантаження;
10. термін служби нагрівачів обмежений процесом їхнього «старіння» (окислення), що призводить до зменшення площі поперечного перерізу;

11. критичним показником для заміни елемента прийнято втрату 20 % початкової площі перерізу ($n = 0,2$).

Загалом, спроектована установка забезпечує необхідну рівномірність нагріву та точність підтримки температурних режимів, що є критичним для запобігання термічним напруженням у деталях із сталі 20Х.

ЛІТЕРАТУРА

1. Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей X міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 24 - 25 листоп. 2021.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2021. Т. 2. – 152.
2. Металургійна теплотехніка. У 2-х томах. 2. Конструкція та робота. Підручник для вищих навчальних закладів / Кривандін В. А., Неведомська І. Н., Коахідзе В. В та інш. - М.: Металургія, 1986. – 692 с.
3. Електротермічні установки: Навчальний посібник / Б. А. Сокунов, Л. С. Грובה. - Єкатеринбург: ДВНЗ ВПО УГТУ - УПІ, 2004. – 122 с.
4. ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови. – Введ. 2016–30–06. – К.: Технічний комітет зі стандартизації «Чавун, прокат листовий, прокат сортовий термозміцнений, вироби для рухомого складу, металеві вироби, інша продукція з чавуну та сталі» (ТК 4), 2016. – 8 с.
5. Сологуб М. А., Рожнецький І. О., Нікоз О. і та ін. Технологія конструкційних матеріалів. - Київ: Вища школа, 2002. – 356 с.
6. Попович Василь. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: підручник для студ. техн. спец. вищ. навч. закл. / Василь Попович, Віталій Попович. - Львів: Світ, 2006. – 624 с.
7. Матеріалознавство: навч. посібник / В. І Бузило, В. П. Сердюк, А. В. Яворський, О. А. Гайдай. - Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – 243 с.
8. Гуляєв А. П. Металознавство. Підручник для вищих навчальних закладів. - М.: Металургія, 1986. – 544 с.
9. Лахтін Ю.М., Арзамасов Б.Н., Хіміко-термічна обробка металів / Ю.М. Лахтін, - М.: Металургія, 1985. – 256 с.
10. Довідник сталей і сплавів / В. Г. Сорокін, А. В. Волоснікова, С. А. Вяткін та ін.; За загальною редакцією В. Г. Сорокіна. - М.: Машинобудування, 1989. – 640 с.
11. Довідник сталей і сплавів / За ред. А. С. Зубченка. - М.: Машинобудування, 2003. – 784 с.

12. Промислові печі: навчальний посібник для студентів вищих технічних навчальних закладів енергетичного профілю, а також для фахівців у галузі промислової теплоенергетики / Ю.С. Зайцев, О.В. Філіп'єв; загальна редакція О.В. Філіп'єва. – Харків: ХДПУ, 1998. – 548 с.
13. Свенчанський А.Д. Електричні промислові печі. Ч. 1. Електричні печі опору. - М.: Енергія, 1975. – 382 с.
14. Електротехнічні матеріали: довідник / В. Б. Березин [та ін.]. - Третє видання, доповнене та перероблене. - М.: Енергоатоміздат, 1983. - 504 с.
15. ДСТУ 8923:2019 Чавун, сталь, феросплави, хром та марганець металеві. Загальні вимоги до методів аналізування – Введ. 2021-01-01. – К.: Технічний комітет стандартизації «Стандартизація методів визначення хімічного складу матеріалів металургійного виробництва» (ТК 3), 2016. – 7 с.
16. Теплотехніка металургійного виробництва. Т. 1. Теоретичні основи: Навчальний посібник для вищих навчальних закладів / Кривандін В. А., Арутюнов В. А., Белоусов В. В. та ін. – М.: МІСІС, 2002. – 608 с.

ДОДАТКИ