

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 62-65

ПОГОДЖЕНО у ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
Директор ННІ Завідувач кафедри

Енергетики, автоматики і  
енергозбереження

Електротехніки, електромеханіки та  
електротехнологій

Каплун В.В.

Жильцов А.В.

” ” 2021 р.

” ” 2021 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему «Вдосконалення технологічного процесу термічної обробки  
металевих заготовок в індукційному нагрівачі безперервної дії»

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Орієнтація освітньої програми – освітньо-наукова

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи

К.Т.Н., доцент (науковий ступінь та вчене звання) (підпис) Березюк А.О. (ПІБ)

Нормоконтроль

К.Т.Н., доцент (науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Усенко С.М.

(ПІБ)

Виконав Філоненко В.В. (ПІБ студента)

КИЇВ – 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

електротехніки, електромеханіки та  
електротехнологій

д.т.н., професор ЖИЛЬЦОВ А.В.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ІПБ)

\_\_\_\_\_ 202\_ р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ  
Філоненку Вячеславу Володимировичу

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітня програма "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"  
Орієнтація освітньої програми – освітньо-наукова

Тема кваліфікаційної магістерської роботи: «Вдосконалення технологічного процесу  
термічної обробки металевих заготовок в індукційному нагрівачі безперервної дії»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «01» лютого 2021 р. № 175 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру до 15 листопада 2021

Вихідні дані до кваліфікаційної магістерської роботи:

- Правила улаштування електроустановок (ПУЕ).
- Правила будови електроустановок (електрообладнання спеціальних установок).
- Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.
- Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
- ДСТУ EN 169-2001. Засоби індивідуального захисту очей.
- ДСТУ 7239:2011. Національний стандарт України. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.
- ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- Аналіз існуючих систем з теплової обробки металів.
- Застосування електричного нагріву в технологічному процесі температурної обробки металевих заготовок.
- Аналіз електромагнітного і температурного полів при індукційному нагріві.
- Чисельний розрахунок електро-теплових полів індукційної установки для нагріву металевих заготовок.

Дата видачі завдання "01" лютого 2021 р.

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи \_\_\_\_\_ Березюк А.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Філоненко В.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

# РЕФЕРАТ

# НУБІП України

Магістерська робота: 77с., 25 рис., 39 джерел

**Об'єкт дослідження:** електромагнітні і теплові процеси в середині циліндричного індуктора з теплової обробки металевих циліндричних заготовок

# НУБІП України

**Предмет дослідження:** електротехнологічний комплекс із теплової обробки металевих циліндричних заготовок.

**Мета роботи:** розробити проект електротехнологічного комплексу для теплової обробки металу перед прокатом.

# НУБІП України

В кваліфікаційній магістерській роботі проаналізовано сучасні системи термічного впливу на металеві заготовки. В роботі розглянуто фізичні процеси та зміни властивостей металу при термічній обробці металевих заготовок. Також було проаналізовано сучасні методи електромагнітного та теплового розрахунків процесу індукційного нагріву металевих заготовок, на основі чого здійснено чисельний аналіз електро-теплових полів при індукційному нагріві металевих заготовок. Чисельний аналіз проведено в програмі Comsol Multiphysics, яка реалізована на основі методу скінченних елементів. В програмному середовищі побудовано розрахункову модель індукційного нагрівача безперервної дії за допомогою модуля *Heat Transfer Module* в розділі *General Heat Transfer*.

# НУБІП України

# НУБІП України

ЗМІСТ	
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ З ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ.....	8
1.1. Класифікація термічних установок для температурної обробки металів.....	8
1.2. Обробка заготовок прокатом.....	11
1.3. Класифікація нагрівальних печей прокатних цехів.....	12
1.3.1. Конструкції методичних печей.....	12
1.3.2. Вакуумні печі.....	13
1.3.3. Печі з крокуючими балками.....	14
1.3.4. Конструктивне виконання печей з крокуючим подом.....	15
РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАГРІВУ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК.....	16
2.1. Електричний нагрів металевих заготовок перед прокатом.....	16
2.2. Індукційний нагрів металевих заготовок.....	17
2.3. Види індукційних установок для термічної обробки металів.....	19
2.4. Види індукційних установок наскрізного нагріву циліндричних заготовок.....	24
2.5. Індукційні нагрівачі для наскрізного нагрівання.....	27
2.6. Аналіз процесів, що наводяться в заготовці.....	30
2.6.1. Ефект близькості.....	31
2.6.2. Зміна властивостей сталі в процесі нагрівання.....	32
2.6.3. Кільцевий ефект.....	35
2.6.4. Розподіл щільності струму в індукуючому провіді і заготовці.....	36
2.6.5. Вплив магнітопроводів на розподіл струму в провідниках.....	37
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО І ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛІВ ПРИ ІНДУКЦІЙНОМУ НАГРІВІ.....	42
3.1. Методи електромагнітного розрахунку процесу індукційного нагріву.....	42

3.2. Метод температурного розрахунку процесу індукційного нагріву.....	45
3.3. Застосування чисельних методів при розрахунку індукційного нагрівача.....	47
3.3.1. Вибір частоти.....	47
3.3.2. Тепловий розрахунок деталі під загартування.....	49
3.3.3. Електричний розрахунок індуктора.....	52
РОЗДІЛ 4 ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРО-ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ІНДУКЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАГРІВУ МЕТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК.....	58
4.1. Моделювання процесу індукційного нагріву за допомогою програмного забезпечення Comsol Multiphysics.....	58
4.1.1. Опис програмного забезпечення.....	58
4.1.2. Модулі та бібліотека Comsol Multiphysics.....	60
4.1.3. Короткі теоретичні відомості про моделювання індукційного нагріву в Comsol Multiphysics.....	61
4.2. Чисельне моделювання процесу індукційного нагріву труби перед прокатом.....	62
4.2.1. Моделювання електромагнітних полів.....	62
4.2.2. Моделювання температурних полів.....	67
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	72
5.1 Правила охорони праці під час термічної обробки металевих заготовок.....	72
5.1.1 Загальні положення.....	72
5.1.2 Вимоги до виробничого устаткування.....	74
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77

## ВСТУП

Індукційне нагрівання - популярний та інноваційний метод обробки металів із використанням струму високої частоти. В процесі індукційного нагрівання металів, нагрітих електромагнітним випромінюванням, виникає вихровий струм що нагріває метал за законом Джоуля-Ленца.

Котушка індуктора генерує змінне магнітне поле і діє як первинна обмотка імпульсного трансформатора. Матеріал розміщений усередині індуктора так, щоб між індуктивністю та металом був зазор. У цьому положенні він нагрівається і поводить себе як вторинна обмотка трансформатора.

Ефективність енергії від індуктора до нагрітого тіла залежить від величини повітряного проміжку між ними і зростає з його зменшенням. Глибина нагрівання металу збільшується із збільшенням питомого опору і зменшується зі збільшенням частоти сигналу.

Струм індуктивності коливається від сотень до тисяч ампер із середньою щільністю струму  $25 \text{ А/мм}^2$ . Втрати енергії чистої потужності в індукторі можуть досягати 20-30%. Електричні індукційні установки поділяються на плавильні, нагрівальні та гартувальні. Печі зазвичай працюють на промисловій частоті 50 Гц, на середній частоті 1 - 100 кГц, високої частоті понад сотні тисяч кГц.

Принцип індукційного нагріву порівняно простий, саме тому він активно використовується в промисловості. На сьогоднішній день майже немає жодної металургійної компанії, яка б не знала про переваги обладнання індукційного нагріву. Сфера застосування індукції є набагато більшою ніж тільки промисловими підприємствами, високочастотні струми активно використовуються для різного обладнання, але індукційне нагрівання набуло все більшого поширення в промисловості.

**Мета роботи:** розробити проект електротехнологічного комплексу для теплової обробки металу перед прокатом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі.

1) Провести аналіз сучасних систем із теплової обробки металів перед прокатом.

2) Дослідити основні принципи електричного нагріву в технологічному процесі температурної обробки металевих заготовок перед прокатом.

3) Проаналізувати електромагнітні і температурні поля при індукційному нагріві металевих заготовок.

4) Провести моделювання чисельним методом електромагнітних і температурних полів при індукційному нагріві металевих заготовок.

**Об'єкт дослідження:** електромагнітні і теплові процеси в середині циліндричного індуктора з теплової обробки металевих циліндричних заготовок.

**Предмет дослідження:** електротехнологічний комплекс із теплової обробки металевих циліндричних заготовок.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ З ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ

### МЕТАЛІВ.

#### 1.1. Класифікація термічних установок для температурної обробки металів.

Індукційні термічні установки можна розділити на два типи:

- Установки з магнітопроводом.
- Установки без магнітопровода.

Перший тип установок містить індуктор, укладений у метал, що створює особливий ефект, що підвищує щільність магнітного поля, тому нагрівання здійснюється якісно і швидко.

В установках без магнітопровода індуктор знаходиться зовні.

Індукційні термічні установки (печі) можна розділити на види, які мають свої особливості роботи та ознаки. Одні використовуються в промисловості, інші застосовуються в побуті, для приготування їжі.

*Вакуумні індукційні печі* - така піч призначена для плавки і лиття сплавів індукційним методом (рис. 1.1). Вона складається з герметичної камери, в якій розташована тигельна індукційна піч з ливарної форми. У вакуумі можна забезпечити вчинені металургійні процеси, отримувати якісні виливки. В даний час вакуумне виробництво перейшло на нові технологічні процеси з безперервних ланцюжків в вакуумному середовищі, яка дає можливість створювати нові вироби, і зменшувати витрати виробництва.

Принцип дії вакуумної печі полягає в тому, що в тиглі, що знаходиться у вакуумі за допомогою індуктора високої частоти плавлять тверду шихту і очищають рідкий метал. Вакуум створюється шляхом відкачування повітря насосами. При вакуумній плавці досягається велика зниження водню і азоту.





Рис. 1.1. Вакуумна індукційна піч

Канальні індукційні печі - прилад з електромагнітним сердечником широко застосовуються в ливарному виробництві для кольорових і чорних металів в якості роздавальних печей, міксерів. Змінний магнітний потік проходить по магнітопроводу, контуру каналу у вигляді кільця з рідкого металу. У кільці збуджується електричний струм, який розігріває рідкий метал. Магнітний потік утворюється первинною обмоткою, що працює від змінного струму. Щоб посилити магнітний потік, використовується замкнений магнітопровід, який виконаний з трансформаторної сталі. Простір печі з'єднується двома отворами з каналом, тому при наповненні печі рідким металом створюється замкнений контур. Піч не зможе працювати без замкнутого контуру. У таких випадках опір контуру великий і в ньому тече малий струм. Внаслідок перегріву металу і дії магнітного поля, яке прагне виштовхнути метал з каналу, рідкий метал в каналі постійно рухається. Так

як метал в каналі нагрітий вище, ніж у ванні печі, то метал постійно піднімається в ванну, з якої надходить метал з меншою температурою. Якщо метал злити нижче допустимої норми, то рідкий метал буде викидатися з каналу електродинамічною силою. У підсумку відбудеться мимовільне вимикання печі і розрив електричного контуру. Щоб уникнути таких випадків печі залишають деяку кількість металу в рідкому вигляді.

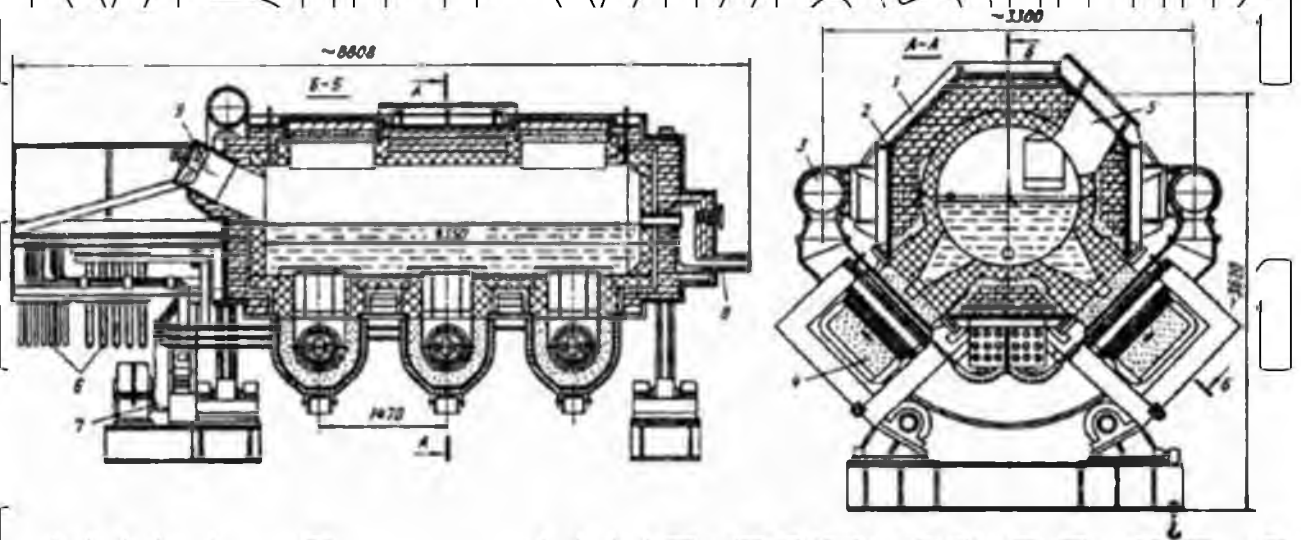


Рис. 1.3. Канальна індукційна піч.

Тигельні індукційні печі - основними компонентами тигельної печі є індуктор і генератор (рис. 1.3). Для виготовлення індуктора використовується мідна трубка у вигляді намотаних 8-10 витків. Форми індукторів можуть виконуватися різних видів. Цей вид печі найбільш поширений. В конструкції печі немає сердечника. Поширена форма печі являє собою циліндр з вогнестійкого матеріалу. Тигель знаходиться в порожнині індуктора. До нього підводиться живлення змінного струму. Найбільш поширені тигельні печі, в яких немає магнітопроводу. Його відсутність в печі призводить до того, що магнітний потік створений струмом промислової частоти, сильно розсіюється в просторі. Більш високі частоти слід використовувати для збільшення щільності магнітного поля в діелектричному тиглі для плавлення матеріалу. Вважається, що якщо ланцюг індуктора знаходиться в резонансі з частотою поточної напруги, а діаметр тигля порівнюється з довжиною хвилі

резонансу, в тиглі може бути зосереджено 75% енергії електромагнітного поля.



Рис. 1.3. Тигельна індукційна піч.

Дослідження показали, що для забезпечення ефективного плавлення металів у тигельній печі бажано, щоб частота представленої напруги індуктора була в 2-3 рази вище резонансної частоти. Тобто така піч працює на гармоніці другої або третьої частоти. Робота на цих більш високих частотах краще змішує сплав і покращує його якість. Режим, який використовує навіть більш високі частоти, в'ягої або шостої гармоніки, може бути використаний для поверхневої карбонізації або зміцнення металу, що пов'язано із скін ефектом, тобто зміщенням високочастотного електромагнітного поля на поверхню заготовки.

## 1.2. Обробка заготовок прокатом.

Для виготовлення деталей машин застосовують заготовки, одержувані литтям, обробкою тиском (поковки, штампування), заготовки з сортового матеріалу і одержувані комбінованими методами. Використовують також заготовки з металокераміки і неметалів (пластмас, гуми та ін.)

Від правильного вибору заготовки в значній мірі залежать загальна трудомісткість і собівартість виготовлення деталі. На вибір виду заготовки і методу її отримання впливають матеріал деталі, її розміри і конструктивні форми, річний випуск деталей і інші фактори.

**Литі заготовки.** Найбільш поширені методи лиття, область їх застосування і якість одержуваних виливків наведені в табл. 2.1 Не включені деякі методи лиття (наприклад, по заморожувати моделям, з застосуванням вакууму, по розчиняється моделям) через їх вельми обмеженого застосування в машинобудуванні.

Таблиця 2.1

Методи лиття, область їх застосування і якість одержуваних виливків.

№ п/п	Метод лиття	Точність виконання заготовок	Шорсткість поверхні R <sub>a</sub> , мкм	Матеріал	Галузь застосування
1	У земляні форми по дерев'яним моделям або шаблонами при ручному формуванні	За ГОСТ 1835-55 (чавун) і ГОСТ 2009-55 (сталь)	320-160	Чавун, сталь, сплави кольорових металів	В одиничному і дрібносерійному виробництві з широким діапазоном розмірів і маси
2	В землю при машинній формуванні по дерев'яних і металевих моделях	те ж	320-160	те ж	У серійному виробництві для виливків масою до 10 т
3	В оболонковій формі (піщано-смоляні, хімічно твердіють і ін.)	12 - 14-й квалітети точності	320-40		У великосерійному і масовому виробництві для фасонних виливків масою до 0,15 т
4	За виплавленням	11 - 13-й квалітети точності	160-20	Сталь, важко-	У серійному і

	моделях	літети точності		оброблювані сплави	масовому виробництві для заготовок складної форми масою до 0,15 т
5	У коклях	12 - 15-й ква- літети точності	160-80	Чавун, сталь, сплави кольорових металів	У серійному і масовому виробництві для виливків складної форми масою 0,25 - 7 т
6	Під тиском	10 - 12-й ква- літети точності	80-20	Сплави кольорових металів	У великосерійному і масовому виробництві для виливків складної форми масою до 0,1 т
7	Відцентрове	12 - 14-й ква- літети точності	40-20	Чавун, сталь, бронза і інші сплави	У серійному і масовому виробництві для виливків у вигляді тіл обертання масою 0,01 - 1 т

3 наведених у табл. 2.1 методів лиття найбільш високий коефіцієнт використання металу (0,9 і вище) забезпечують методи 4 і 7. Хорший коефіцієнт використання металу (0,8 - 0,9) отримують застосуванням методів

3 і 6. Методи 2 і 5 в даний час добре механізовані, а методи 3, 4, 6 і 7

частково або повністю автоматизовані.

**Заготовки, одержувані обробкою тиском.** До методів отримання вихідних заготовок обробкою тиском відносяться вільна кування, гаряча і

холодна штамповка. Механічні властивості кованих і штампованих заготовок

вище властивостей заготовок, одержуваних литтям. У табл. 2.2 наведені

найбільш поширені методи кування і штампування заготовок з вуглецевих і легованих сталей і спеціальних сплавів.

НУБІП України

Таблиця 2.2

Методи кування і штампування заготовок з вуглецевих і легированих сталей і спеціальних сплавів

№ п/п	Метод отримання заготовок	Точність виконання заготовок	Шорсткість поверхні $R_z$ , мкм	Галузь застосування
1	Кування на молотах та пресах	За ГОСТ 7829-70 (на молотах) і ГОСТ 7962-67 (на пресах)	до 320	В одиничному і дрібносерійного виробництва для заготовок простої конфігурації масою до 250 т
2	Кування на молотах і в підкладних штампах кильцях	За ГОСТ 7829-70	до 320	У дрібносерійному виробництві для заготовок з конфігурацією середньої складності і масою 0,01 т і більше
3	Кування на радіально-кувальних машинах: гаряче кування для діаметрів понад 50 мм, холодне кування для діаметрів до 50 мм	До 0,6 мм 0,04-0,4 мм	До 320 до 6,3	У серійному виробництві для заготовок у вигляді східчастих тіл обертання діаметром до 90 мм
4	Штампування на молотах і пресах (облойної)	Для сталевих поковок по ГОСТ 7505-74	320-80	У серійному масовому виробництві для заготовок масою до 0,2 т
5	Гаряче штампування в закритих штампах (безоблойная)	За ГОСТ 7505-74	320-80	У великосерійному і масовому виробництві для заготовок простої форми масою до 0,015 т
6	Штампування з наступним калібруванням	0,05-0,1 мм	40-10	У серійному і масовому виробництві для заготовок з площею калібруєміє поверхні 2,5 - 80 см <sup>2</sup>
7	Штампування з висадкою на горизонтально-кувальних машинах	За ГОСТ 7505-74	320-80	У серійному і масовому виробництві для заготовок простої форми масою до 0,015 т
8	Холодна висадка на автоматах	9 - 11-й квалітети точності	20-6,3	У серійному і масовому виробництві при виготовленні кріпильних деталей, дрібних східчастих валиків, пальців діаметром 1 - 30 мм

3 наведених у табл. 2.2 методів найбільш високий коефіцієнт використання металу (приблизно 0,9) забезпечують методи 7 і особливо 9. Ці ж методи найбільш повно автоматизовані.

При виготовленні деталей з високоміцних і жароміцних листових матеріалів товщиною до 6 мм і розміром до 2 м в серійному виробництві ефективно гідровзривна і електрогідравлічна штампування. Точність отриманого профілю заготовки при діаметрі 3 м досягає 2 - 3 мм.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАГРІВУ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК

### 2.1. Електричний нагрів металевих заготовок перед прокатом

Останніми роками набув великого поширення електричний спосіб нагріву металевих заготовок перед прокатом. Електричний спосіб нагріву, на відміну від полум'яного, має меншу термічну інерцію, що є важливим фактором при роботі з легованими сталями, які є чутливими до термічних напружень. Широкий діапазон швидкостей при електричному способі нагріву в порівнянні з полум'яним, рівномірніший нагрів металевих заготовок по довжині і радіусу, менший випал металу - роблять цей спосіб одним з найперспективніших.

Для слябів і сортових металевих заготовок застосовують індукційний та контактний електричний спосіб нагрівання. На високопродуктивних прокатних станках безперервної дії застосовують комбінований нагрів.

Нагрів заготовок до температури  $750^{\circ}\text{C}$  здійснюється в методичних печах а форсований нагрів до прокатної температури - на електроконтактних установках. Тривалість нагріву при електроконтактному способі, для заготовок квадратного перерізу зі стороною 60 і 120 мм становить, відповідно, 0,16 і 0,21 хв/см. Тривалість нагріву заготовок перерізом  $100 \times 100$  мм до температури від  $750$  до  $1200^{\circ}\text{C}$  на електроконтактній установці становить 0,9 хв, у методичній печі - 6 хв. Холодна металева заготовка перерізом  $100 \times 100$  мм може бути нагріта до прокатної температури електроконтактним методом приблизно за 2 хв. До переваг електричного нагріву можна віднести:

- можливість регулювання швидкості нагріву;
- рівномірність нагріву заготовок по перерізу і довжині;
- маневреність при прокатці великого числа марок сталей.



Застосування індукційного і контактного методу нагріву дає можливість зменшити винад металу, виключити знесуглецювання, забезпечити вищу продуктивність процесу нагріву.

Також можна зазначити, що в сучасних умовах боротьби за екологію, а також зниження використання невідновлюваних природних мінеральних ресурсів (виповного палива), застосування пристроїв для термічної обробки металевих заготовок, які працюють на природних ресурсах (вугіддя, мазут тощо) при наявності альтернативних методів (електричного нагріву) – не може бути виправданим. В цих умовах доцільно використовувати пристрої, які для своєї роботи не потребують використання мінерального палива.

## 2.2. Індукційний нагрів металевих заготовок

Індукційний нагрів металів широко поширений в таких галузях промисловості, як металургія і машинобудування. Визначним в підвищенні техніко-економічних показників індукційних установок є вибір оптимального режиму роботи нагрівача, який виробляють в результаті аналізу можливих температурно-часових характеристик процесу нагріву, одержуваних з теплового розрахунку.

Індукційний нагрів металу досягається шляхом індукування вихрових струмів. Електромагнітне поле створюється індуктором, підключеним через трансформатор напруги до джерела змінного струму.

Індукційний нагрів металу здійснюється з великою швидкістю, що дозволяє досягати високої продуктивності без значного окислення металу. У промисловості застосовують два варіанти індукційного нагріву – наскрізний нагрів, коли заготовка прогривається на всю товщину, і поверхневий нагрів, коли нагривається відносно невеликий шар металу.

Для індукційного нагріву металів служать електротермічні установки, в яких енергія високої частоти від джерела живлення передається в метал, що нагривається за допомогою індуктора. Індуктор являє собою котушку з

одного або декількох витків або шарів мідного проводу, в яку поміщають металеву заготовку. При подачі на котушку напруги високої частоти змінне магнітне поле буде наводити в металі вихрові струми, які викличуть його нагрів.

Найчастіше індукційний спосіб нагріву металів використовують для загартування, відпускання, паяння, зварювання, кування, плавки та ін.

Процес індукційного загартування складається з індукційного нагріву і швидкого охолодження для зміцнення металу (наприклад сталі) та підвищення його зносостійкості. Без механічного контакту індукція генерує інтенсивне, локалізоване і контрольоване тепло. При застосуванні індукції нагрівається лише та частина заготовки, яку, власне, загартовують. Завдяки оптимізації таких параметрів процесу, як цикли нагрівання, частоти та дизайн охолоджувача, можна досягти найкращих результатів з можливих.

Індукційний нагрів різко підвищує пропускну здатність виробництва. Це надзвичайно швидкий процес, із великим ресурсом повторюваності, з можливістю легкої інтеграції у виробничі лінії. При застосуванні індукції звичною є індивідуальна обробка окремих заготовок. Завдяки цьому кожна заготовка гартується за окремими точно визначеними параметрами. Ці параметри для кожної заготовки можуть зберігатися на різних серверах. Загартування з допомогою індукції – чисте, безпечне і зазвичай залишає по собі незначний слід. А завдяки чіткій локалізації в певній частині заготовки воно ще й надзвичайно енергоефективне.

Серед багатьох деталей, які загартовують із застосуванням індукції – зубчасті шестерні, колінчасті, розподільні, привідні, вторинні вали автомобілів, торсіони, коромисла клапанів, з'єднання шарнірів, клапани, внутрішні та зовнішні кільця підшипників.

Перевагами індукційного нагріву у порівнянні із іншими методами нагріву є те, що:

- Високошвидкісний розігрів або плавлення будь-якого електропровідного матеріалу.

• Можливий нагрів в атмосфері захисного газу, в окислювальному (або відновлювальній) середовищі, в рідині та у вакуумі.

• Нагрівання через стінки захисної камери, виготовленої зі скла, цементу, пластмас, дерева - ці матеріали дуже слабо поглинають електромагнітне випромінювання і залишаються холодними при роботі установки. Нагрівається тільки електропровідний матеріал - метал (в тому числі розплавлений), вуглець, кераміка (яка проводить електричний струм), електроліти, рідкі метали і т.і. Наприклад, нутроці радіолампи можна прогрівати для знегажування прямо через скляну колбу.

• За рахунок виникаючих МГД-зусиль відбувається інтенсивне перемішування рідкого металу, аж до утримання його в підвішеному стані в повітрі або захисному газі - так отримують надчисті сплави в невеликих кількостях (левітаційного плавка, плавка в електромагнітному тиглі).

• Оскільки розігрів ведеться за допомогою електромагнітного випромінювання, відсутнє забруднення заготовки продуктами горіння факела в разі газопламенного нагріву, або матеріалом електрода в разі дугового нагріву. Приміщення зразків в атмосферу інертного газу і висока швидкість нагріву дозволяють ліквідувати окалиноутворення.

• Не шкідлива для навколишнього середовища, так як відсутні продукти горіння. Невеликі установки індукційного нагріву можна експлуатувати в замкнутому і погано провітрюваному приміщенні, не обладнаному спеціальними засобами вентиляції та витяжками.

• Зручність експлуатації за рахунок невеликого розміру індуктора.

• Індуктор можна виготовити будь-якої форми - це дозволить рівномірно прогрівати по всій поверхні деталі складної конфігурації.

- Легко провести локальний і виборчий нагрів.

- Так як найбільш інтенсивно розігрів йде в тонких верхніх шарах заготовки, а нижні шари прогриваються повільніше за рахунок

теплопровідності, метод є ідеальним для проведення поверхневого гарту деталей (серцевина деталі при цьому залишається в'язкою).

- Легка автоматизація обладнання і конв'єсрних виробничих ліній.

Простота управління циклами нагрівання та охолодження. Просте регулювання і утримування температури, стабілізація потужності, подача і знімання заготовок.

#### 2.4. Види індукційних установок наскрізного нагріву циліндричних заготовок

Індукційні нагрівальні установки призначені для наскрізного нагріву заготовок прутків, деталей, труб та інших металевих виробів. Широко

застосовуються індукційні нагрівальні установки для наскрізного нагріву

металевих заготовок, поверхневого гарту сталевих деталей, також для пластичної деформації, відпускання, гарячої посадки та інших цілей на машинобудівних підприємствах.

Індукційні установки поділяються на нагрівачі методичної, періодичної, інеперервної дії (рис. 2.1).

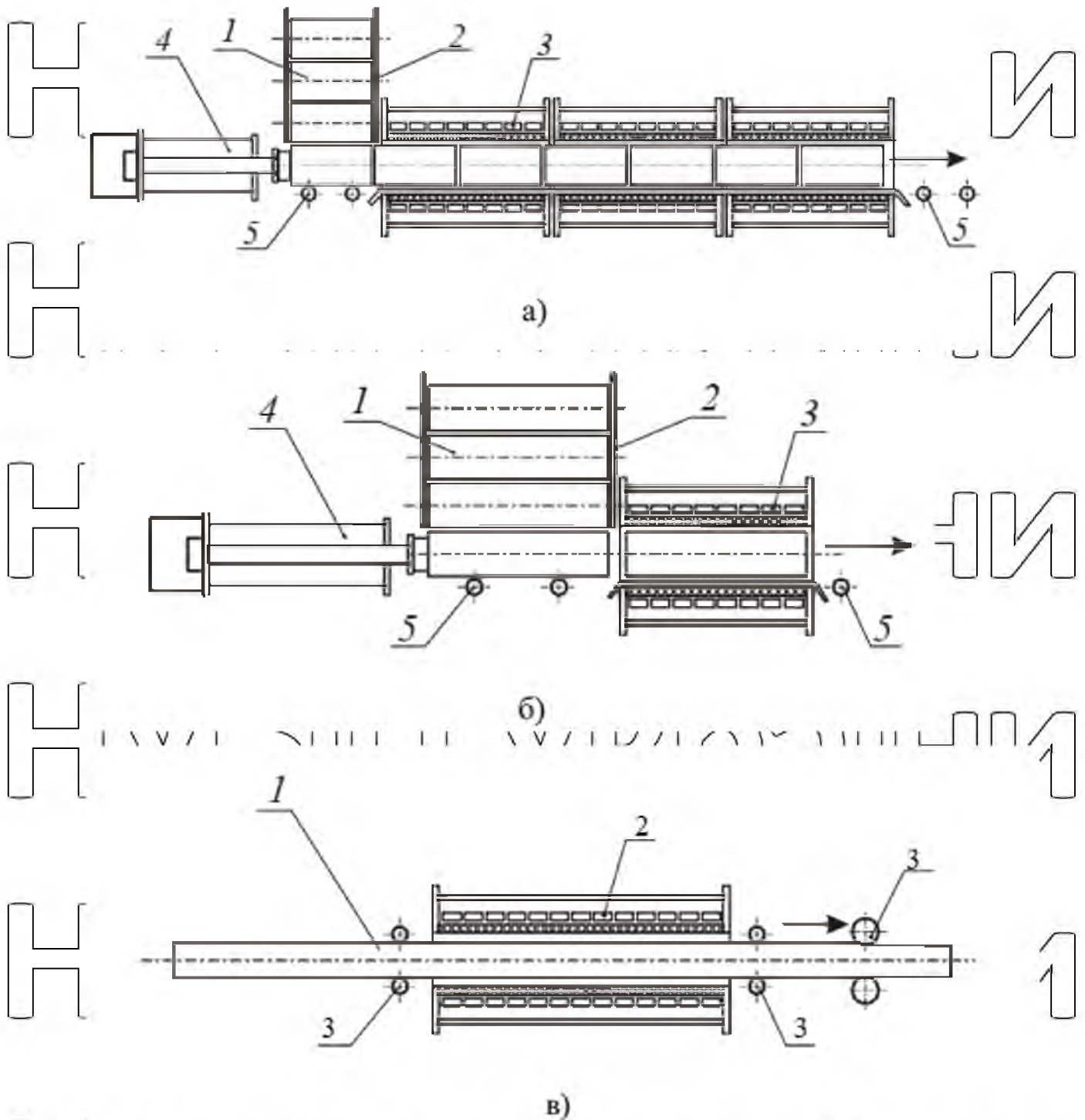


Рис. 2.1. Схеми індукційних нагрівачів: методичної (а), періодичної (б), і  
неперервної дії (в)

Загальний вигляд індукційного нагрівача методичної дії середньої частоти для нагріву металевих заготовок показаний на рис. 2.1. Принцип дії таких нагрівачів полягає в наступному: заготовки 1 надходять на вихідну позицію перед входом в індуктор 2, транспортер, який переміщується за

допомогою приводу з притискними роликami 3, подає холодну заготовку в індуктор, просуваючи при цьому одночасно на один крок весь ряд наступних заготовок, які знаходяться в каналі індуктора. Остання нагріта заготовка виходить з каналу індуктора, поступаючи на розвантажувальний лоток.

Нагрівання заготовок до кінцевої температури в таких нагрівачах здійснюється по мірі їх просування в каналі індуктора з певним кроком, який дорівнює довжині заготовки. При введенні в індуктор наступної холодної заготовки, вже нагріта до заданої температури остання заготовка, виштовхується з індуктора.

В нагрівачах методичної дії прикороного індукційного нагріву для забезпечення встановленого режиму роботи, індуктор повинен мати змінний крок навівки обмотки. Крок намотування змінюється ступінчасто, а число ступенів не перевищує 4 (часто обмежується трьома ступенями), а в деяких випадках двома ступенями. Температура поверхні заготовки піднімається до кінцевого значення протягом 10 - 30% загального часу перебування в каналі індуктора і далі практично не підвищується. При цьому потрібно, щоб на кожній ділянці знаходилось ціле число заготовок.

Перебої в роботі пресового обладнання є серйозною проблемою для роботи індукційного нагрівача методичної дії. На відміну від печей із зовнішнім джерелом тепла (пальником), де максимальна температура заготовок не перевищує заданої температури в камері печі (установки з резистивним або газовим нагріванням), в разі інтенсивного індукційного нагріву при припиненні видачі нагрітих заготовок, незворотно порушується температурний режим ряду заготовок, що знаходяться в каналі індуктора. Це може призвести до того, що при відносно тривалих паузах доводиться повністю звільняти індуктор від частково нагрітих заготовок і починати роботу заново. Під час пуску індукційного нагрівача методичної дії для отримання номінального режиму роботи індуктор повністю завантажують заготовками, які в заданому темпі просуваються вздовж каналу індуктора. Однак всі заготовки, крім останньої, не можуть бути використані для

обробки тиском, тому що вони не пройшли повного циклу нагрівання. Ці заготовки називають баластними і використовуються лише для запуску індуктора. Аналогічно, після припинення роботи індукційного обладнання не використовують заготовки, які знаходяться в каналі індуктора і нагріті до різної температури.

Таких недоліків позбавлені індукційні нагрівачі періодичної дії. Основні елементи в них такі ж, як і в індукційних нагрівачах методичної дії. Але такі нагрівачі зручніші для дрібносерійного виробництва, коли часто потрібне переналагодження режиму нагріву через різні розміри заготовок. Також вони можуть підтримувати температуру заготовки в так званому режимі «очікування» при перервах в роботі технологічного обладнання. При нагріванні особливо великих заготовок в періодичних установках простіше виконати теплоізоляцію і механізми переміщення заготовок.

В установках безперервної дії одночасно перебуває кілька заготовок, розташованих в поздовжньому або поперечному магнітному полі індуктора. У процесі нагрівання вони переміщуються до довжині індуктора, нагріваючись до заданої температури. У нагрівачах безперервної дії повніше використовується потужність джерела живлення, оскільки середня потужність, споживана ними від джерела живлення, вище, ніж середня потужність, споживана нагрівачем періодичної дії.

Індукційні нагрівачі безперервної дії мають більш високий ККД джерела живлення. Продуктивність вище, ніж у установок періодичної дії. Можливе живлення декількох нагрівачів від одного джерела, а також підключення декількох генераторів до одного нагрівача, що складається з декількох секцій.

## 2.5. Індукційні нагрівачі для наскрізного та поверхневого нагріву

Конструкція індуктора для наскрізного нагріву залежить від форми і розмірів деталей. Індуктори виконують круглого, овального, квадратного або прямокутного перерізу. Для нагрівання кінців заготовок індуктори виконують щілинними або петльовими.

Індукційний поверхневий нагрів супроводжується проявом поверхневого ефекту і ефекту близькості. Внаслідок поверхневого ефекту струм в заготовці розподіляється нерівномірно. Найбільша щільність струму має місце в поверхневих шарах заготовки. При використанні високої частоти в поверхневих шарах можна отримати великі щільності струму, що забезпечують швидке нагрівання металу.

Індукційні установки поверхневого нагріву застосовуються для нагріву деталей під подальшу термохімічну обробку (загартування, цементація, азотування тощо).

Індукційний гарт полягає у швидкому нагріванні поверхні заготовки з наступним швидким охолодженням на повітрі, у воді або маслі. При цьому поверхня набуває високої твердості і здатна добре відпрацьовувати на тертя, а «сира» (м'яка) серцевина забезпечує високий опір ударним навантаженням. При такому нагріванні вдається у багато разів зменшити обсяг металу, що нагрівається (порівняно з наскрізним нагріванням) і значно скоротити витрати електроенергії.

Необхідність підтримки високого електричного і теплого ККД системи індуктор-тіло, що нагрівається, визначає виключно велика кількість форм і розмірів індукторів. Між індуктором і вогнетривким циліндром прокладений шар теплоізолюючого матеріалу, що знижує теплові втрати і захищає електричну ізоляцію індуктора.

Індукційні установки мають, як правило, низький коефіцієнт потужності, причому значення його змінюються в досить широкій межі залежно від частоти струму, зазору між індуктором і виробом, магнітної



проникності, питомого опору і розмірів заготовок, що нагріваються. Залежність коефіцієнта потужності від частоти струму і діаметра заготовок дозволяє правильно вибрати реактивну потужність компенсуючої конденсаторної батареї, керуючись не тільки мінімальною витратою електроенергії, але і зниженням вартості установки і скороченням необхідних виробничих площ.

## 2.6 Аналіз процесів, що відбуваються в заготовці

Метод індукційного нагріву заснований на використанні законів електромагнітної індукції і повного струму, а також наступних явищ:

поверхневий ефект;

ефект близькості;

кільцевої або котушковий ефект;

вплив магнітопроводів і мідних екранів на розподіл струму в провіднику;

зміна властивостей матеріалів при зміні температури і напруженості

магнітного поля;

виникнення електромагнітних сил при взаємодії високочастотних електромагнітних полів декількох провідників.

### 2.6.1. Поверхневий ефект

Змінний струм супроводжується електромагнітними явищами, які призводять до витіснення електричних зарядів з центру провідника на його периферію. Цей ефект називається – поверхневим ефектом, або скін-ефектом

(рис. 2.2). В результаті цього ефекту струм стає неоднорідним. На периферії ток виявляється більшим за величиною, ніж в центрі. Це відбувається через відмінності в щільності вільних носіїв зарядів в перпендикулярному перетині провідника щодо напрямлення струму.

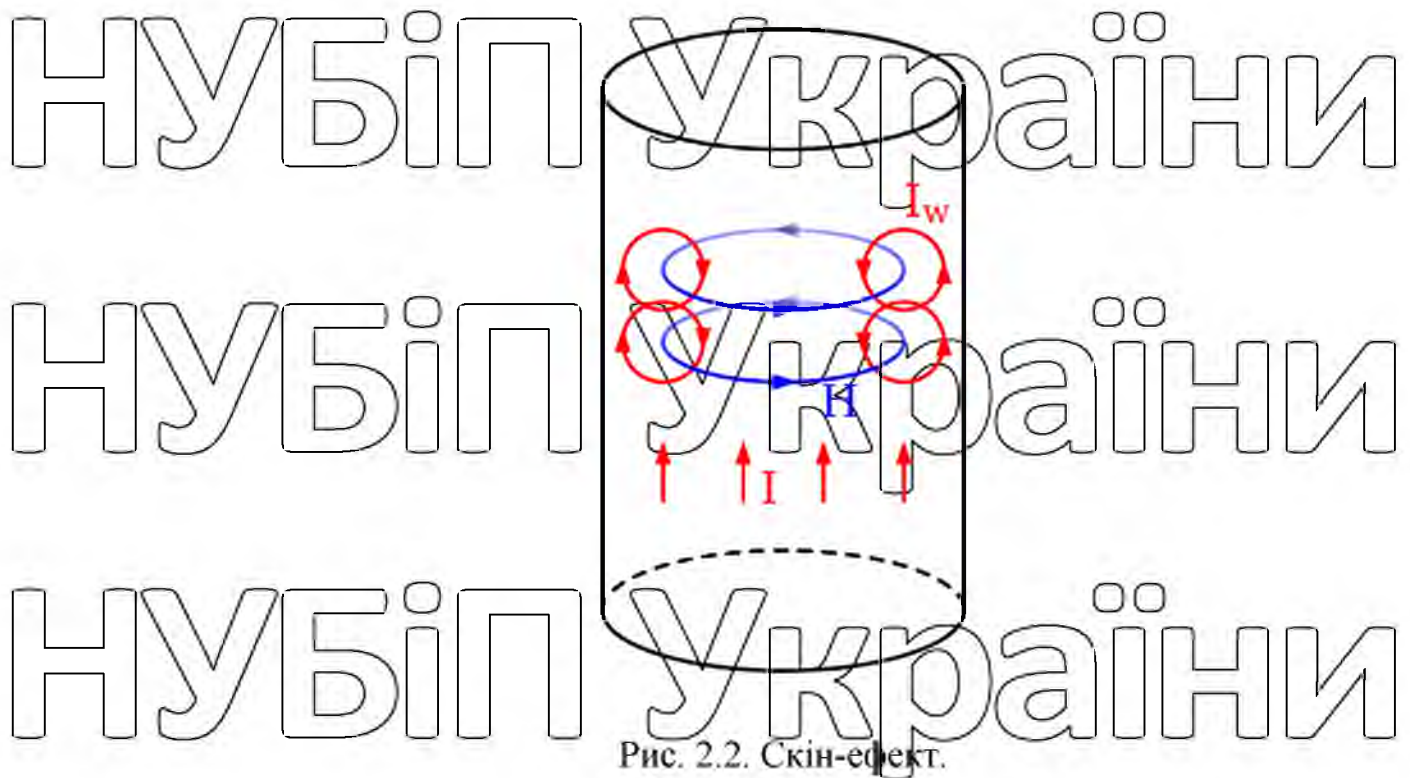


Рис. 2.2. Скін-ефект.

### 2.6.2. Ефект близькості

Коли до провідників, що знаходяться поруч прикладано велику напругу, то струми нерівномірно розподілені по площі поперечного перерізу провідника. Цей ефект називається ефектом близькості. Ефект близькості призводить до збільшення видимого опору провідника внаслідок присутності в його околицях інших провідників, що несуть струм.

Коли два або більше провідників розташовані поруч один до одного, тоді їхні електромагнітні поля взаємодіють один з одним. Завдяки цій взаємодії струм у кожному з них перерозподіляється таким чином, що більша щільність струму сконцентрована в тій частині, яка найбільш віддалена від заважаючого провідника.

Якщо провідники переносять струм в той же самий напрямок, то магнітне поле половин провідників, що знаходяться поблизу один від одного, скасовує один одного і, отже, не протікає струм через ту половину частини провідника. Струм переповнений у віддаленій половині провідника.

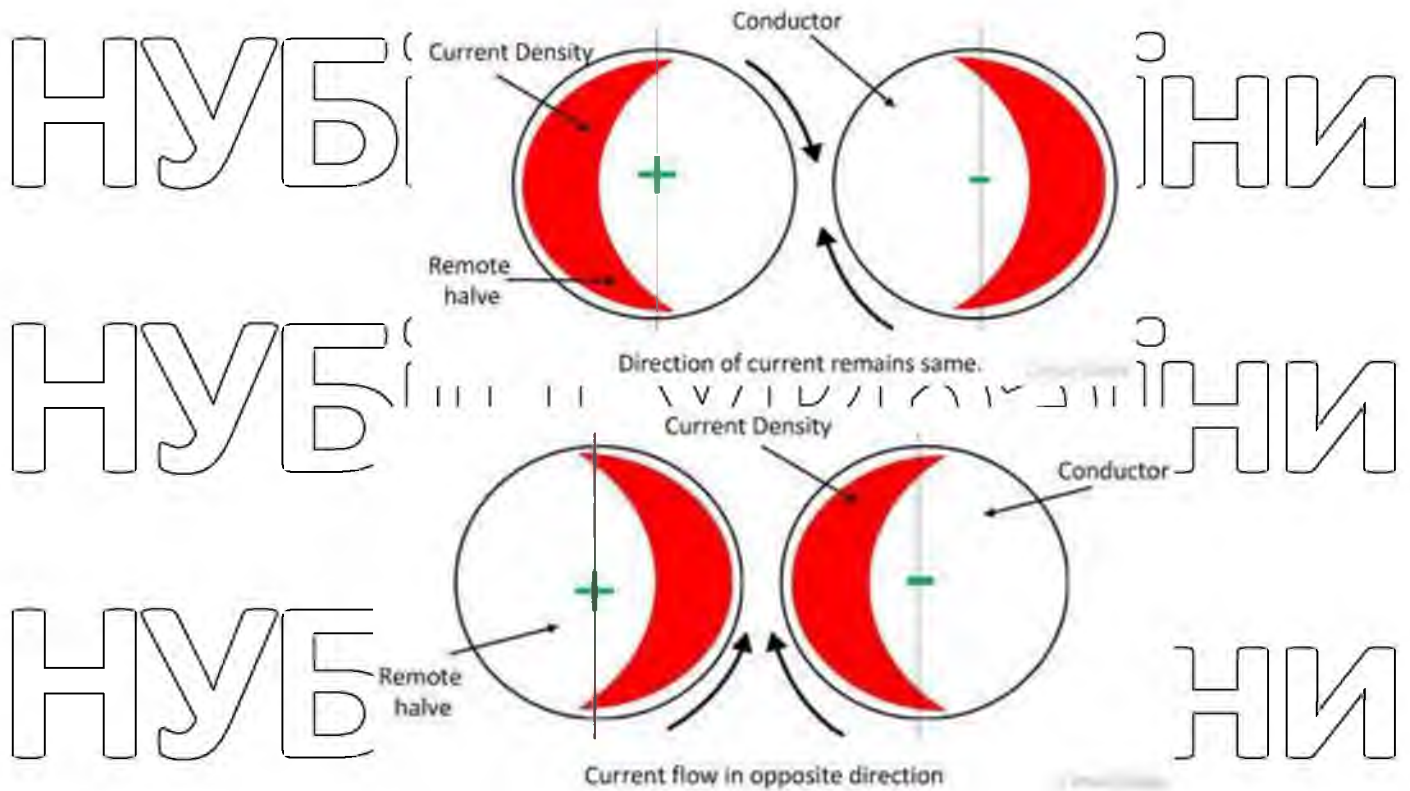


Рис. 2.3. Ефект близькості

Коли провідники несуть струм протилежного напрямку, тоді близька частина провідника несе, чим більше струм, так і магнітне поле далекої половини провідника скасовують один одного. Таким чином, струм нульовий у віддаленій половині провідника і переповнений на найближчу частину провідника.

Якщо постійний струм протікає на поверхні провідника, то струм рівномірно розподілений по площі поперечного перерізу провідника. Отже, на поверхні провідника не виникає ефект близькості.

### 2.6.2. Зміна властивостей сталі в процесі нагрівання

При нагріванні сталі змінюються її питомий опір і магнітна проникність, причому питомий опір зростає аж до точки Кюрі (магнітних перетворень), після чого його зростання дещо сповільнюється.

Потрібно відмітити, що при досягненні температури вище  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , питомий опір сталей різних сортів майже однаковий. В середньому можна говорити, що питомий опір в інтервалі температур  $800\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$  приблизно дорівнює  $10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$  [2].

Магнітна проникність слабо залежить від температури приблизно до  $650\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , після чого швидко зменшується і досягає величини, приблизно рівної магнітної проникності вакууму. Зазвичай вважається, що вона падає стрибкоподібно.

При нагріванні сталь втрачає магнітні властивості, прогриваючись від шару до шару, від поверхні всередину. Розподіл щільності струму спотворюється, а метал стає як би двошаровим.

### 2.6.3. Кільцевий ефект

Відомо, що зігнувши провідник в кільце або спіраль і пропустивши по ньому змінний струм, найбільша його щільність буде на внутрішній поверхні (спіралі) провідника. Таке явище називається кільцевим ефектом.

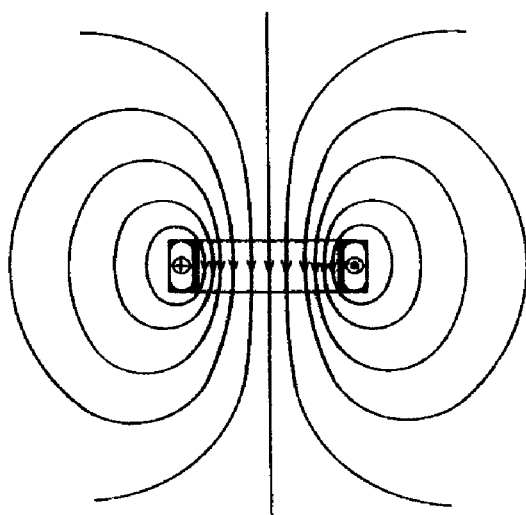


Рис. 2.4. Магнітне поле  
пустого індуктора

Кільцевий ефект яскраво виражається чим більше по відношенню до діаметру кільця радіальна висота провідника і чим яскравіше виражений поверхневий ефект.

Кільцевий ефект, є різновидом скін ефекту, пояснюється асиметрією магнітного поля витка або соленоїда. У внутрішній порожнині індуктора (Рис.2.4) магнітне поле сконцентроване

значно сильніше ніж ззовні внаслідок

чого значна частка електромагнітної енергії надходить в провідник зсередини.

Кільцевий ефект погіршує використання перерізу провідників, підвищуючи їх активний опір, що призводить до виникнення додаткових втрат. Під час розрахунків опору циліндричних і овальних індукторів, всередину яких розміщена заготовка, що нагрівається, зазвичай приймають, що струм концентрується лише на внутрішній стороні проводу, який розглядають у вигляді нескінченно тонкого струмового шару.

#### 2.6.4 Розподіл щільності струму в індукуючому проводі і заготовці

Схема магнітного поля індуктора дана на рис. 2.5, всередину якого вставлений металевий циліндр. Через кільцевий ефект і ефект близькості

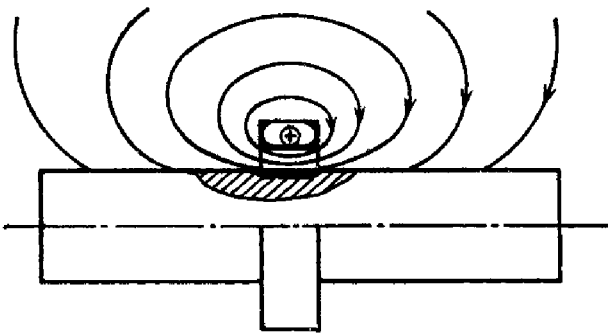


Рис. 2.5. Магнітне поле індуктора, в середині якого розміщена деталь

струм в індукторі сконцентрований в більшій частині на його внутрішній поверхні з практично рівномірною щільністю, яка трохи підвищується до кутів проводника. Даний процес роз'яснюється тим, що нитки струму, що лежать на кутах проводника, охоплені меншим магнітним потоком, між тими, які знаходяться в середній частині. І в даних нитках індуктується менша протидія ЕРС, ніж в нитках, що розташовані в середній частині проводника.

В циліндрі, навпаки, струм протікає саме під дією ЕРС, що наведена в циліндрі. Дана ЕРС тим більше, чим більше магнітний потік, який пов'язаний з розглянутою вище кільцевою ниткою струму. З схеми бачимо, що нитки струму, що розташовані в середній частині індуктора, пов'язані найбільшим магнітним потоком, там де і спостерігається максимальний настил (поверхнева щільність) струму. За границями індукуючого проводника індукуючий струм стрімко спадає [5].

Отже, струм індукується у циліндрі, зосереджений в смугі, ширина якої майже не відрізняється від ширини індуктора. Здебільшого ми рахуємо, що ширина цієї смуги, для стислості званої активної, приблизно дорівнює ширині індуктора.

### 2.6.5 Вплив магнітопроводів на розподіл струму в провідниках

Розподіл струму в провіднику стрімко змінюється, якщо провідник, по якому проходить струм високої частоти оточити з одних сторін феромагнітним матеріалом (рис. 2.6), який має високий електричний питомий опір (ферит або розшарування заліза).

а)

б)

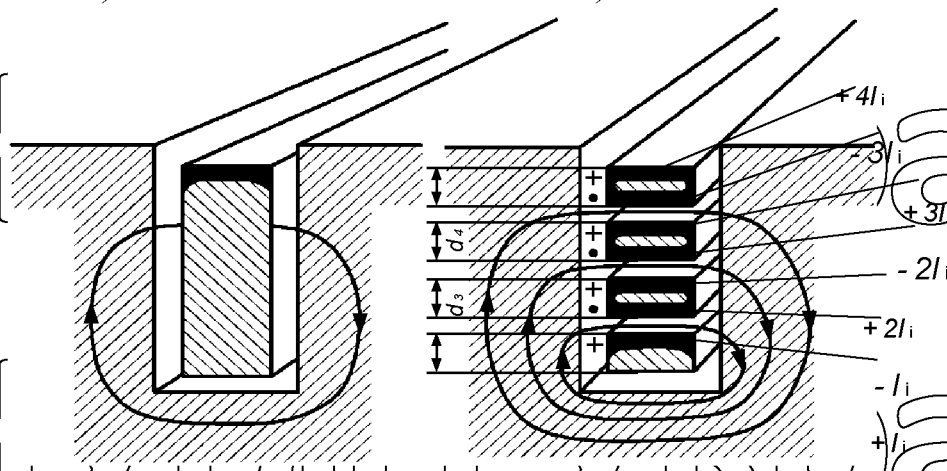


Рис. 2.6. Розташування провідників в пазу магнітопроводу:

а - одного провідника, б - чотирьох провідників

Можна рахувати з достатньою точністю, що майже весь струм буде стягнутий до відкритого краю провідника. Витіснення струму призводить до збільшення активного і реактивного опорів. Отже, відбувається перерозподіл струму по його перетину за рахунок створення навколо провідника розімкнутого магнітного ланцюга. І цей перерозподіл тим сильніший, чим більша глибина паза і частота струму, яка проходить через провідник.

Якщо ми говоримо про паз, в якому є кілька провідників, включених послідовно (рис. 2.6.б), то кожен виток, окрім нижнього, перебуває не тільки

у власному змінному магнітному полі, а ще й у полі всіх нижніх провідників. За цих обставин, якщо глибина проникнення струму набагато менша товщини провідників, струм нижнього провідника наводить струм зустрічного напрямку на нижній поверхні іншого провідника. Даний наведений струм проходить по нижній поверхні провідника до кінця його границь і повертається по верхній поверхні. Внаслідок цього, при збереженні струму індуктора на нижній поверхні верхнього провідника протікає зустрічний струм, рівний  $3I_{и}$ , а на верхній поверхні верхнього провідника протікає струм  $4I_{и}$ . Така схема різко підвищує втрати в багатовитковому багат шаровому індукторі.

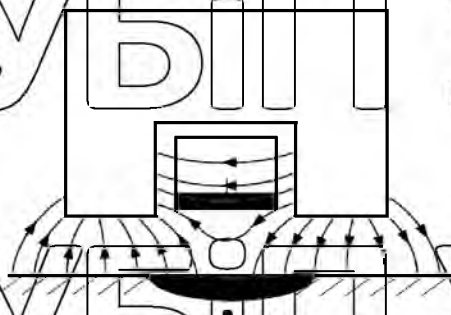


Рис. 2.7. Розріз індукуючого дроту з магнітопроводом з трансформаторної сталі

Майже такі самі явища відбуваються, якщо використовувати багат шарові індуктори для нагріву циліндричних заготовок. Проте останнім часом були знайдені оптимальні співвідношення між товщиною провідника  $d$  для кожного шару і глибиною проникнення струму  $\Delta_1$ : товщина нижнього шару  $d_1$  може бути

більше глибини проникнення, але товщини інших провідників отримуємо за таких умов:  $d_2 = 0,84\Delta_1$ ,  $d_3 = 0,64\Delta_1$ ,  $d_4 = 0,54\Delta_1$  і так далі.

Звичайно, що дане співвідношення може бути відтворене лише за умови низьких частот, наприклад, 50 Гц, і дає змогу навіть зменшити втрати в багат шарових індукторах.

На Рис. 2.7 нам дано поперечний розріз індуктора з магнітопроводом і схема магнітного поля. Індукція в магнітопроводі переважно дорівнює 0,15-0,8 Тл. Завдяки цьому всередині магнітспроводу відносна магнітна проникність  $\mu$  досить велика, тому можна знехтувати його магнітним опором.

Можна рахувати, що магнітний опір визначається лише величиною зазорів між магнітопроводом і самою деталлю.

Завдяки магнітопроводу можна змінювати розподіл наведеного в деталі струму: концентрація струму в деталі зростає.

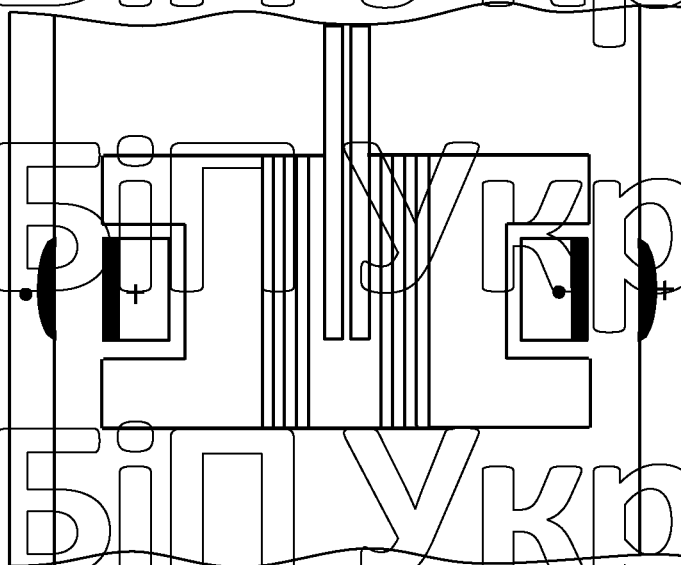


Рис. 2.8 Розріз індуктора з магнітопроводом для нагріву внутрішньої поверхні

Поверхнева щільність струму в заготовці під індуктором на ширині паза магнітопроводу змінюється достатньо мало і різко падає за границями паза.

При нагріванні внутрішньої поверхні магнітопровід є принципово необхідним (рис. 2.8). Не є доречним використання кільцевого індуктора без магнітопроводу для нагріву внутрішньої поверхні. Завдяки кільцевому ефекту струм на індукуючому дроту протікає по внутрішній поверхні. Цей процес стрімко підвищує розсіювання. За допомогою магнітопроводу струм витісняється на зовнішню поверхню (рис. 2.8) і ефективність нагрівання деталі зростає.

Магнітопровід майже завжди потрібно охолоджувати водою через те, що у ньому виділяється значна потужність за рахунок вихрових струмів і втрат на гістерезис. Для створення магнітопроводів, що застосовуються при частотах звукового діапазону (0,5-10 кГц), беруть пластини товщиною (0,1-0,35) · 10<sup>-3</sup> м, які виготовлені з трансформаторної кремністої сталі і вкриті термостійким шаром ізоляції за допомогою лакування, оксидування або



найкраще фосфатування. Залежно від частоти, індукції та інтенсивності охолодження підбирається товщина пластини. Пластини товщиною  $(0,35-0,2) \cdot 10^{-3}$  м використовують для частот 0,5-2,5 кГц, а для частот 8-10 кГц - товщиною  $(0,2-0,1) \cdot 10^{-3}$  м. З фериту виробляють лінії по переробці, що використовуються в пристроях з частотою радіодіапазону (70 кГц і вище).

Необхідно відмітити, що при поверхневому загартуванні з нагріванням глибинного типу зміна параметрів  $\gamma$ ,  $\chi$  і  $z$  значно нижча, ніж при наскрізному нагріванні або нагріванні поверхневого типу, де прогривається шар, що перевершує гарячу глибину проникнення струму. Зміна потужності виявляється дуже незначною і здебільшого не перевищує 30% максимальної її величини при поверхневому загартуванні, навіть при відсутності стабілізації напруги. Це дає нам підставу при розрахунках приймати якусь постійну середню питому потужність. Даний режим енергетично більш вигідний, ніж режим з постійним струмом в індукторі. Це спричинено можливим різким коливанням споживаної потужності, завдяки чому використання генератора може виявитися нижче стандартного режиму роботи.

Будемо рахувати режим з постійною в часі питомою потужністю основним. Також відмітимо, що якщо гаряча глибина проникнення струму виявляється наближеною до радіуса циліндричної або до товщини прямокутної заготовки, що нагрівається, то до кінця нагріву електричний ККД індуктора сильно знижується. Таким чином, потужність, індукована в заготовці падає до 2-2,5 разів навіть при несуттєвій зміні підведеної до індуктора потужності. Дані режими є абсолютно невигідними, тому їх слід використовувати лише в крайніх випадках, коли підвищити частоту немає можливості.

Зокрема у конкретних випадках поверхневого нагріву, а особливо високопродуктивних установках для наскрізного нагріву, використовується режим, який підтримує приблизно постійну температуру поверхні заготовки. Даний режим досить часто називають швидкісним або прискореним

нагрівом. Такий режим зобов'язує мати можливість спеціального регулювання. Наприклад, регулювання потужності, для одночасного нагріву деталі кількома індукторами, або спеціальної конструкції приводу індуктора для безперервно-послідовного нагріву заготовок, розмір якого досить перевищує розміри самого індуктора.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 3

### АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО І ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛІВ ПРИ ІНДУКЦІЙНОМУ НАГРІВІ

#### 3.1. Методи електромагнітного розрахунку процесу індукційного нагріву

Багатоваріантність індукційних систем не дає можливості використовувати якийсь один метод для розрахунку всіх конструкцій. В багатьох випадках розрахункові методи виявляються наближеними.

Всі наближені методи розрахунків засновані на побудові математичних моделей для визначення опорів окремих ділянок системи, врахування кінцевої довжини індуктора і загрузки, їх взаємного розташування.

Взагалі, математична модель – це сукупність пов'язаних аргументами, функціями або параметрами математичних співвідношень. Якщо ці аргументи, функції або параметри характеризують фізичні процеси в середовища, то такі системи математичних рівнянь називають фізико-математичною моделлю. Фізикоматематичні моделі є результатом теоретичного дослідження приладу і окрім системи рівнянь, яка описує фізичні процеси, включає рішення рівнянь і аналіз отриманих результатів.

Спосіб розв'язання системи рівнянь фізико-математичні моделі може бути аналітичними або чисельними. Тому і фізико-математичні моделі поділяють на аналітичні або чисельні.

Рішення аналітичних фізико-математичних моделей представляють собою математичне співвідношення у вигляді аналітичної залежності вихідних параметрів приладу від властивостей та стану його компонент і зовнішніх впливів. Аналітичне рішення диференційних рівнянь можливе лише при суттєвих спрощеннях рівнянь і введені ідеалізованих припущень.

Рішення рівнянь за рахунок різних припущень і апроксимацій призводить до того, що реальні аналітичні моделі приладів та пристроїв мають малу точність і в значній мірі близькі до формальних моделей, але вони

дозволяють швидко і легко визначити приблизну область робочих параметрів. Підвищення точності фізико-математичних моделей досягається застосуванням чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь і створенням чисельних математичних моделей, які отримали значне поширення в зв'язку з розробкою ефективних алгоритмів розрахунку систем диференціальних рівнянь на комп'ютерах.

Розвиток чисельних методів розрахунку та точність розрахунку, яку забезпечують на тепер комп'ютери та програми, дозволили визнати фізикотопологічне моделювання віртуальним експериментом з гарантованою

достовірністю результатів. В наукових проектах фізико-топологічне моделювання з використанням сертифікованих програмних пакетів визнається як науковий експеримент, бо при адекватному фізичній сутності моделі дозволяє отримувати адекватні фізичній сутності результати. Серед

понад 500 програмних продуктів, які пропонують вирішувати диференціальні рівняння у приватних похідних чисельним методом скінчених елементів, найбільш універсальними та поширеними є американський ANSYS та європейський COMSOL Multiphysics. Їх головною перевагою є мультифізичне вирішення задач, тобто рішення в одному розрахунковому

просторі (розрахунковій сітці) всіх фізико-математичних задач. Прикладні пакети програм для тривимірного аналізу електромагнітних та гідродинамічних процесів в твердих, рідких і газоподібних середовищах (ANSYS, COMSOL Multiphysics, тощо) не доступні для повноцінного

використання в Україні за фінансовими обмеженнями. Ці пакети орієнтовані в основному на використання організаціями, фінансово спроможні обслуговувати пакети. Широкому колу користувачів не доступна робота в таких пакетах. Однак розроблені методи моделювання, і в тому числі розглянутий метод, дозволяють створювати власні програмні продукти, орієнтовані на рішення спеціалізованих задач методом скінчених елементів.

Проведені дослідження, показали високу збіжність результатів моделювання з експериментальними даними, з чого можна зробити висновки про

доцільність використання методу скінчених елементів для дослідження процесів в електронних приладах.

При вирішенні диференціальних рівнянь в приватних похідних, коли аналітичні методи розрахунку не вдавалися, найбільшого поширення набули методи дискретизації аналізованих просторів. Існує два майже ідентичних методи: метод скінчених різниць (МСР) і метод скінчених елементів (МСЕ).

Математики показали можливість використання МСЕ для вирішення рівнянь в приватних похідних широкого класу, в тому числі і рівнянь електродинаміки. При вирішенні деяких завдань інші методи ефективніше ніж МСЕ за розміром матриці і кількістю ітерацій, але не по точності розрахунків. Розрахунок розподілу напруженості електромагнітного поля і поля струмів в компонентах електронних приладів, які нагріваються, за допомогою МСР і МСЕ нашо вхується на ряд проблем:

1) складна конструкція компонентів індуктора, що нагріваються, в тому числі з концентраторами електромагнітного поля, екранами, тиглями складної конфігурації;

2) залежність всіх електрофізичних і теплофізичних параметрів матеріалів компонентів індуктора від температури;

3) зміна положення поверхонь емісії в процесі дослідження;

4) необхідність вирішувати окремо задачу знаходження розподілу індуктованих струмів в компонентах приладів і задачу визначення температурного поля в завантаженні і тиглі;

5) евристичний підхід до визначення меж розрахункової області електромагнітного поля, що впливає на точність результатів розрахунку.

МСР і МСЕ найбільш ефективно застосовувати при розрахунку складних по конструкції пристроїв і при розрахунку поля в замкнутих обмежених областях. Цим вимогам конструкції приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля відповідають повністю.

Аналіз процесів у компонентах пристроїв індукційного нагріву за допомогою МСЕ може проводитися за моделями з різною розмірністю. Для

більшості задач обмежуються двома вимірами, тобто досліджують модель приладу для в площині, як область нескінченно протягнутої пластини довільного перетину, або для області з осьовою симетрією.

МСП заснований на формулюванні початково-крайових задач для диференціальних рівнянь в варіаційні задачі для інтегральних функціоналів від шуканих функцій. Сенс такого формулювання полягає в тому, що при цьому знижується порядок похідних, що дозволяє далі шукати апроксимацію точного рішення в вигляді суперпозиції базисних функцій, до яких пред'являються менш суворі вимоги на гладкість, ніж до вирішення вихідної початково-крайової задачі.

Аналіз електромагнітного поля індуктора складається з розрахунку просторового розподілу електричної і магнітної напруженості поля, створюваного прикладеним до індуктора змінним струмом (синусоїдально змінюються в часі).

Модель аналізу електромагнітного поля індуктора заснована на чисельному розрахунку МСЕ рівнянь Максвелла для електромагнітного поля. З урахуванням осьової симетрії конструкцій індуктора, які планується дослідити, проводити моделювання та дослідження доцільно в циліндричних координатах. Постановка задачі при індукційному нагріві полягає у визначенні характеристик наступних елементів моделі: властивості середовищ: остаточно атмосфера (вакуум), ортотропні матеріали з постійною магнітною проникністю, електропровідність компонентів під напругою або зі струмом.

– джерела поля: прикладена напруга, повний струм індуктора, щільність струму або однорідне зовнішнє поле.

– граничні умови: задане значення потенціалу (умова Діріхле), задані значення по дотичній складовій індукції на поверхні границі (умова Неймана).

Аналіз магнітного поля змінних струмів полягає в розрахунку розподілу напруженості магнітного поля в просторі пристрою, який генерується

змінними струмами індуктора і інших провідників. Всі компоненти поля і електричні струми змінюються як:

$$z = z_0 \cos(\omega t + \phi_z),$$

де  $z_0$  – амплітудне (максимальне) значення  $z$ ,  $\phi_z$  – фазовий кут, і  $\omega$  – кутова частота зміни поля.

Аналіз спрощується якщо величини, які змінюються гармонійно, представити у вигляді комплексних чисел:  $z = z_0 e^{i(\omega t + \phi_z)}$ , де дійсна і уявна

частини мають зсув по фазі на  $90^\circ$  по відношенню один до одного, так що їх

лінійна комбінація може представляти довільний фазовий кут. З комплексної величини отримуємо миттєві, діючі і амплітудні значення:

– миттєве значення при даній фазі  $\phi_0 = -\cot$

– максимальне значення  $z_0$ ;

– діюче значення  $z_R$ .

Струм в індукторі та концентраторі розглядається як сума стороннього струму, порушеного зовнішнім електричним ланцюгом, і вихрового струму, індукovanого змінним магнітним полем:

$$j = j_{\text{стор}} + j_{\text{вихр.}}$$

Опис електромагнітного поля представляється диференціальним рівнянням в приватних похідних щодо комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу  $A$  ( $B = \text{rot}A$ ,  $B$  – вектор магнітної індукції).

Вважається, що вектор магнітної індукції  $B$  лежить в площині моделі ( $z_0r$ ), а вектор щільності електричного струму  $j$  і векторний магнітний потенціал  $A$  ортогональні до нього.

### 3.2. Метод температурного розрахунку процесу індукційного нагріву

Для покращення якості нагрівання і підвищення енергетичних показників індукційної установки вирішальним стає вибір прийняттого режиму роботи нагрівача. Режим обирають на основі аналізу можливих температурно-часових характеристик процесу нагрівання.

Вказані характеристики отримують у результаті теплового розрахунку. При таких умовах підвищуються вимоги до точності розрахунку і проектування нагрівальних установок. Тепловий розрахунок повинен враховувати ряд факторів, що суттєво впливають на температурне поле в загрузці: зміна інтенсивності магнітного поля по довжині загрузки; наявність теплових втрат з поверхні заготовки; залежність теплофізичних властивостей матеріалу загрузки від температури; зміна потужності в процесі нагрівання; можливість регулювання потужності при управлінні швидкістю нагрівання, та інші.

Методи розрахунку процесу індукційного нагрівання засновані на вирішенні диференційних рівнянь Максвелла і Фур'є для електромагнітного та теплового полів відповідно. Розподіл температури в часі описується рівнянням Фур'є в циліндричній системі координат:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\alpha}{\lambda} \omega \quad (3.1)$$

де,  $T$  – температура в точці простору з координатами  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$ , яка досягнула значення за час  $t$ , відповідно  $^{\circ}\text{C}$  і  $\text{c}$ ;

$\alpha$  – температуропровідність матеріалу в точці простору з координатами  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$ ,  $\text{m}^2/\text{c}$ ;

$\lambda$  – теплопровідність  $\text{Вт}/(\text{m}^2\text{C}^{\circ})$ ;

$\omega = f(\rho, \varphi, z)$  – функція розподілення/щільності внутрішніх джерел енергії в матеріалі  $\text{Вт}/\text{m}^3$ .



Необхідно врахувати, що температурне поле у компонентах електромагнітних пристроїв зазвичай в робочому стані є сильно неоднорідне і для розрахунків треба враховувати залежність електромагнітних та теплофізичних характеристик речовин від температури. Завантаження в індукторі або контакти у комутуючих приладах в робочих режимах мають відмінну від початкової температуру. В одних випадках нагрівання є методом досягнення робочого режиму в інших є наслідком процесів у робочих режимах.

У будь якого разу теплофізичні та електромагнітні характеристики компонентів електромагнітного пристрою змінюються під час роботи і при розрахунку за моделями необхідно враховувати цю зміну в робочому режимі. Від цього залежить адекватність результатів розрахунків. В розрахунках необхідно враховувати значення електрофізичних та теплофізичних характеристик нагрівача і завантаження в залежності від температури безпосередньо до температури загартування.

Всі теплофізичні властивості речовини в рівнянні 3.1: теплопровідність  $\lambda(T)$ , питома потужність тепловиділення  $q$ , теплоємність  $C(T)$  і щільність  $\rho$  повинні відповідати температурі загартування матеріалу завантаження. Ці значення визначаються за довідковою літературою.

### 3.3. Розрахунок процесу індукційного нагріву

Вихідні дані:

Діаметр  $D_2 = 300$  мм

Глибина загартування шару  $x_k = 2.5$  мм

Висота індуктора і деталі  $h_1 = h_2 = 25$  мм

#### 3.3.1. Вибір частоти:

Для загартовування застосовують індукційний нагрів глибинного типу.

Умова нагріву глибинного типу виглядає так:

$$X_k < \Delta k = \sqrt{2\rho/\omega\mu_0\mu}, \text{ де } \Delta k - \text{ гаряча глибина проникнення струму}$$

Зі збільшенням глибини загартовування при незмінній частоті подвоюється питома потужність при одночасному зменшенні нагріву. У зв'язку з цим будуть зростати питомі втрати в індукторі. Тому вводять найменшу допустиму глибину загартованого шару.

Максимальна частота може бути визначений як:

$$f_{max} < 0.25/X_k^2$$

Досвід показує, що в виробничих умовах неприпустимо застосовувати режими роботи, при яких  $\Delta P_i > 0.4 \text{ кВт/см}^2$  так як при цьому індуктор виходить з ладу внаслідок нестабільності охолодження. Ця умова дозволяє зв'язати мінімальну допустиму глибину загартованого шару з частотою:

$$X_{k.min} \approx 0.25\Delta_k \approx 0.125/\sqrt{f}$$

Тоді частота може бути визначена як:

$$\frac{0.015}{X_k^2} < f < \frac{0.25}{X_k^2}$$

Експериментальні дослідження показують, що максимум повного ККД включаючи термічний, досягається при  $X_k = (0.4 - 0.5)\Delta_k$

Тоді оптимальна частота:

$$f_{opt} = \frac{0.6}{X_k^2} = 960 \text{ Гц}$$

Мінімальна частота:

$$f_{min} = \frac{0.015}{X_k^2} = 240 \text{ Гц}$$

Максимальна частота:

$$f_{min} = \frac{0,25}{X_k^2} = 1 \text{ кГц}$$

Мінімальна частота, що забезпечує ККД індуктора вище 0,8 від граничного:

$$F \left( \frac{D_2}{h_k} \right) = 8$$

Виходячи з отриманих результатів, виберемо частоту з переліку частот, призначених для використання в промислових, наукових, медичних та побутових височастотних пристроях. Прийемо частоту рівну 500 Гц.

**3.3.2. Тепловий розрахунок нагріву циліндра під загартування:**

Вихідні дані для теплового розрахунку:

1. Діаметр заготовки  $D_2 = 300 \text{ мм}$
2. Глибина шару загартування  $x_k = 2,5 \text{ мм}$
3. Висота індуктора і деталі  $h_1 = h_2 = 25 \text{ мм}$
3. Частота струму індуктора  $f = 500 \text{ Гц}$
4. Температура на поверхні циліндра  $850 \text{ }^\circ\text{C}$
5. Температура на глибині загартовування  $750 \text{ }^\circ\text{C}$

Матеріал деталі яка загартовується – сталь. Отже, глибина проникнення в заготовку при  $T > 750$ , вона ж гаряча глибина проникання буде:

$$\Delta_k = \frac{0,5}{\sqrt{f}} = 5 \text{ мм}$$

Відношення глибини нагрітого шару  $X_k$  до глибини проникання  $\Delta_k$  дорівнюватиме 0,5.

Визначимо параметр  $n$ , що враховує зміну провідності і магнітної проникності на межі середовищ на першому етапі гарячого режиму. При допущенні, що  $\gamma_{21} = \gamma_{22}$ ,  $\mu_{21} = 1$ ,  $\mu_{22} = 16$ .

$$n = \frac{1 - \sqrt{16}}{1 + \sqrt{16}} = -0.6$$

Знаючи ставлення  $X_k$  до  $\Delta_k$  і параметр  $n$ , визначимо коефіцієнт  $M$ , що визначає глибину активного шару. Виходячи з експериментальних даних, приймаємо  $M = 0.615$ .

Глибина активного шару визначається за формулою:

$$\xi = \Delta_k M = 3.075 \text{ мм}$$

Відносна глибина активного шару:

$$\alpha = 1 - \frac{\xi}{R_2} = 0.877$$

Відносна радіальна координата:

$$\text{Для } X_k = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ м } \beta_k = \frac{X_k}{R_2} = 0.9$$

$$\text{Для поверхні } \beta_k = 1$$

Визначимо час кінця нагріву деталі.

Для цього проведемо інтерполяцію експериментальної функції

$$\delta = f(\alpha, \beta, \tau)$$

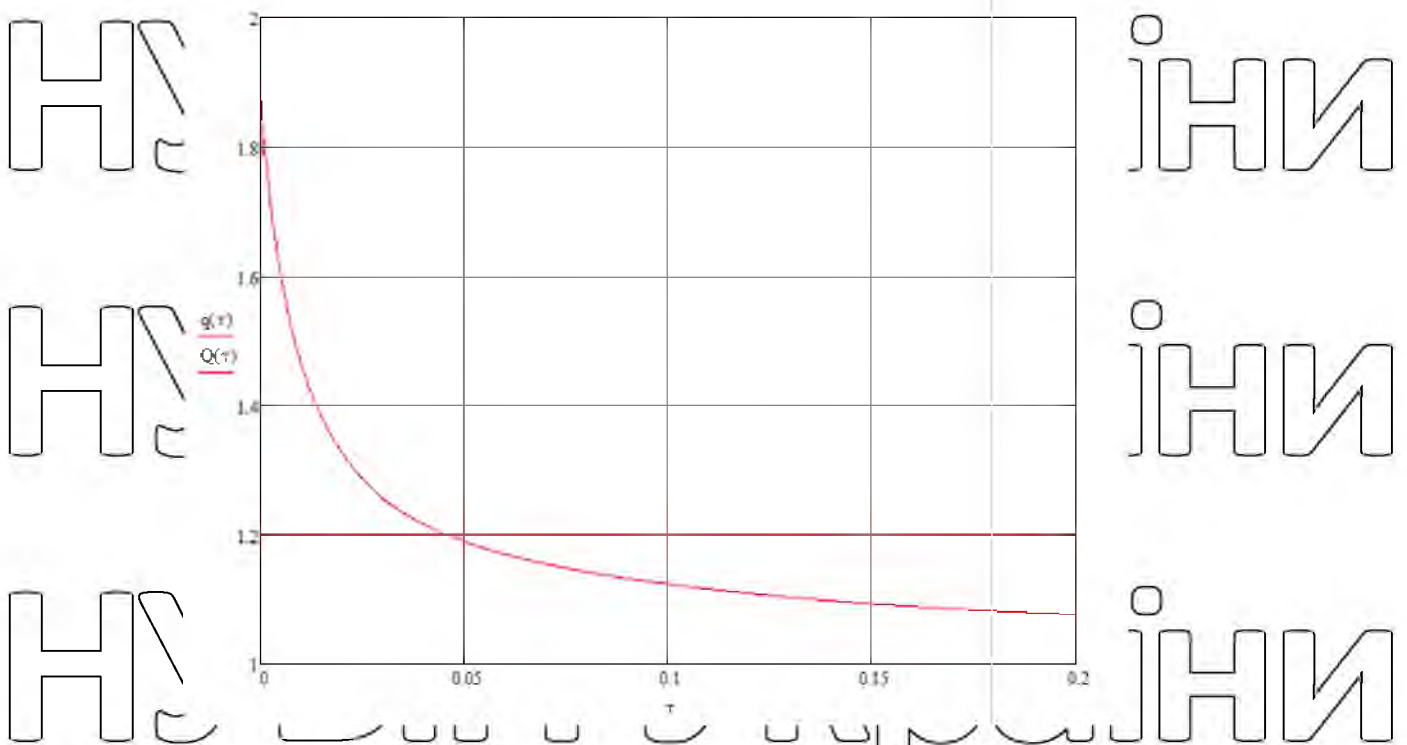


Рис.2.1. Графік розподілу  $S^{T_0}/T_k = f(\tau)$

За графіком визначимо значення  $\tau_k$  рівне 0,034

Після цього визначаємо час нагрівання  $t_k$ .

$$t_k = \frac{\tau_k R_2^2}{\alpha} = 3.4$$

Питома потужність нагріву визначається за формулою:

$$\rho_0 = \frac{\lambda T_0}{2R_2(\tau_k + S(\alpha, \beta, \tau_k))} K_{h1}$$

Так як деталь загартовується періодичним методом, і заготовка відповідає довжині індуктора, необхідно врахувати втрати потужності за рахунок теплопровідності в обидві сторони від нагрівальної зони, приймаємо

$$K_{h1} = 1.25$$

$$\rho_0 = \frac{\lambda T_0}{2R_2(\tau_k + S(0.8771, \tau_k))} K_{h1} = 1.085 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$$

Визначимо потужність високочастотного генератора, яку необхідно передати в деталь, припустимо, що теплові втрати з заготовки дуже малі ККД

понижувального трансформатора і індуктора приймемо 0,85 і 0,75 відповідно.

$$P_2 = \pi D_2 h_2 p_0 = 82 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{ген}} = \frac{\pi D_2 h_2 p_0}{\eta_i \eta_{\text{тр}}} = 90 \text{ кВт}$$

Швидкість переміщення деталі відносно індуктора:

$$v_3 = \frac{h_2}{\tau_k} = 0.135 \text{ мм/с}$$

Разом:

$$\begin{aligned} \tau_k &= 3.4 \text{ с.} \\ v_3 &= 0.1 \text{ мм/с} \\ p_0 &= 1.85 \text{ МВт/м}^2 \end{aligned}$$

### 3.3.3. Електричний розрахунок індуктора

Повітряний зазор між індуктором і деталлю, що загартовується зазвичай вибирається в межах від 2 до 5 мм. Приймемо наш повітряний зазор рівним 3 мм. Тоді внутрішній діаметр індуктора дорівнюватиме 56 мм.

Глибина проникнення струму в матеріал індуктора (в нашому випадку мідь) визначається як:

$$\Delta l = \frac{0.07}{\sqrt{f}} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Індуктор має постійне охолодження, значить товщина трубки повинна бути

$d_1 > 1.6\Delta l$ , тобто більше 0,436 мм. Приймаємо товщину стінки

індуктора рівною:  $d_1 = 2 \text{ мм}$

Розрахунковий діаметр деталі, необхідний для застосування питомої потужності.

$D'_2 = D_2 - \xi = 0.047$   
 Наведене значення потужності:

$$p'_0 = \frac{p_0 D_2}{D'_2} = 1.156 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$$

По таблиці експериментальних даних визначимо відносну магнітну проникність на межі двох середовищ.

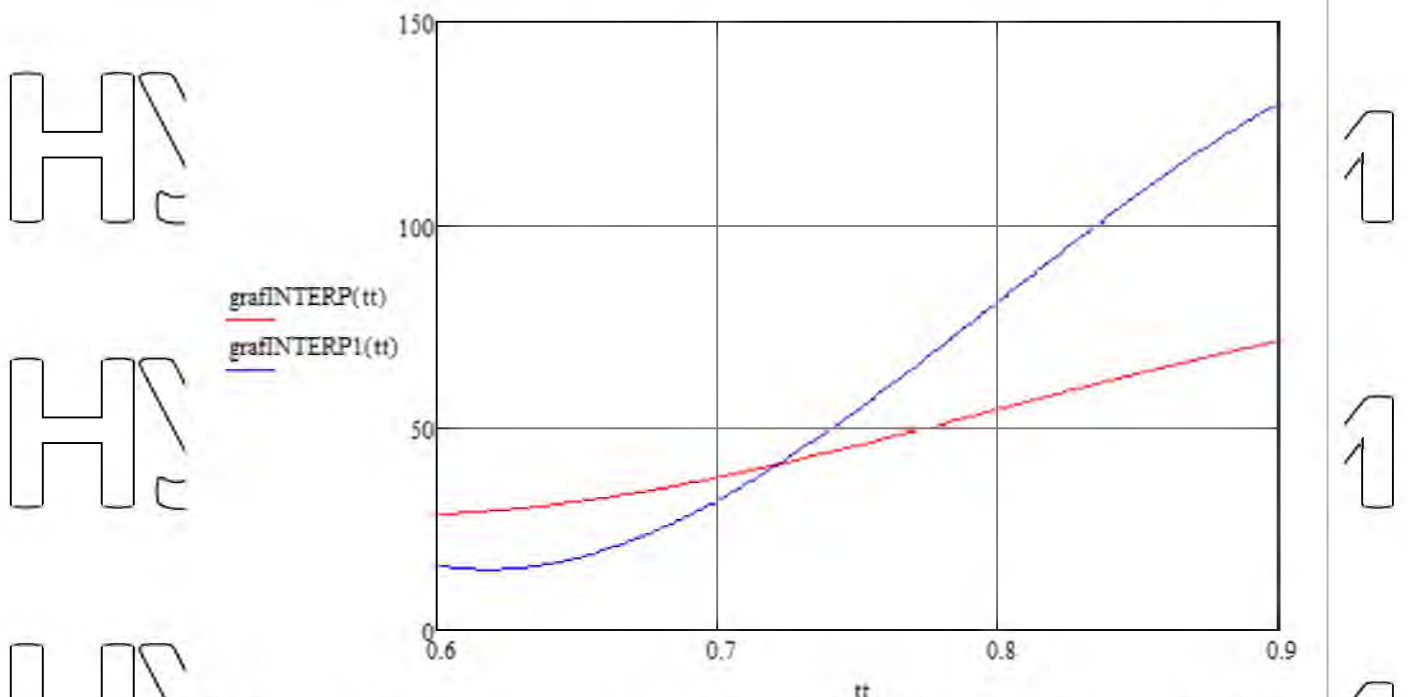


Рис.2.2 Графік залежності  $\mu_2$  і  $\mu_2'$  від  $n$

Тут функції графINTERP і графINTERP1 є значеннями  $\mu_2$  і  $\mu_2'$

відповідно, а аргумент  $t$  дорівнює  $-n$ . За графіком визначимо значення  $n$  при якому  $\mu_2 = \mu_2'$ .

$$n = -0.696$$

$$\mu_2 = 30.507$$

Так як отримані значення дуже близькі до табличних, приймемо:

$$n = -0.7 \quad \mu_2 = 32 \quad K = 1.306 \quad \cos \varphi_2 = 0.989 \quad \sin \varphi_2 = 0.344$$

Активний і внутрішній реактивний опір заготовки:

$$r^2 = \frac{\pi D_2^2}{4 h_2} = 2.81 \cdot 10^{-6} \cdot K \sqrt{f} \cos \varphi_2 = 2.032 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$x_{2m} = \frac{r^2 \sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} = 7.444 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Визначимо реактивний опір, що враховує магнітний опір замикання магнітного потоку поза індуктором.

З таблиць визначимо коефіцієнт Нагаока для наших параметрів.

$$k_N = 0.482$$

Враховуючи що  $h_1 = h_2$ , визначимо опір:

$$x_2 = 2\pi^2 f 4 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{S_1}{h_2} \cdot \frac{k_N h_2}{k_N h_2} = 7.238 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$S_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = 2.463 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ — площа вікна індуктора}$$

$$S_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} = 1.963 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ — площа заготовки}$$

Реактивний опір розсіювання, що враховує магнітний опір потоку, що проходить в зазорі між індуктором і деталлю.

$$x_2 = 2\pi f 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{S_1 - S_2}{h_2} = 1.578 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Коефіцієнт приведення активного і реактивного опорів деталі до струму індуктора з урахуванням крайових ефектів системи «індуктор-деталь»

$$c = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_s + x_{2m}}{x_0}\right)^2} = 0.548$$

Наведені опори заготовки:



$$r_2' = cr_2 = 1,114 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$x_2' = c \cdot \left( x_s + x_{2m} \frac{(x_s + x_{2m})^2 + r_2^2}{x_0} \right) = 1,995 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Гранична потужність допускається:

$$r_1 = \frac{\rho_{\text{сталь}} \pi D_1}{h_2 \Delta_1 \theta_1} = 2,011 \cdot 10^{-4}$$

$$x_{1m} = r_1$$

Еквівалентний активний, реактивний і повний опір індуктора:

$$r_e = r_1 + r_2' = 1,316 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

$$x_e = x_{1m} + x_2' = 2,168 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$z_e = \sqrt{r_e^2 + x_e^2} = 2,56 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Струм і напруга в індукторі. Кількість витків приймасмо рівне одному.

$$I_i = \sqrt{P_2 / r_2'} = 6,182 \text{ кА}$$

$$U_{i1} = I_i z_e = 15,825 \text{ В}$$

Щільність струму в індукуючого дроту індуктора:

$$J_i = \frac{I_i}{h_2 \Delta_1} = 3,532 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$$

Потужність на індукуючому проводі індуктора.

$$P_1 = I_i^2 r_1 = 7,684 \text{ кВт}$$

Питома потужність, що виділяється в індукторі:

$$p_{0i} = \frac{P_1}{\pi D_1 h_2} = 178 \text{ кВт/м}^2$$

Щільність струму повинна бути не більше  $400 \text{ MA} / \text{m}^2$ .

Активний і індуктивний опір шин:

довжина шини  $L_{\text{ш}} = 0,15$

Середня ширина шини  $b_{\text{ш}} = 0,5 (0,02 + 0,18) = 0,1$

$$r_{\text{ш}} = 2\rho_{\text{сталь}} L_{\text{ш}} \frac{1}{b_{\text{ш}} \Delta_{\text{ш}}} = 8,571 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

$$x_{\text{ш}} = r_{\text{ш}} + 7,9 \cdot 10^6 \cdot f \cdot \frac{0,002 L_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} = 3,227 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Активний і індуктивний опір шин:

$$r_i = r_e + r_{\text{ш}} = 1,401 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$x_i = x_e + x_{\text{ш}} = 2,519 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$z = \sqrt{z_e^2 + z_{\text{ш}}^2} = 2,882 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

ККД, коефіцієнт потужності, потужність і напруга, що підводиться до індуктора:

$$\eta_i = \frac{r_2'}{r_i} = 0,795$$

$$\cos \varphi_i = \frac{r_i}{z_i} = 0,486$$

$$P_i = \frac{P_2}{\eta_i} = 104 \text{ кВт}$$

$$U_i = I_i z_i = 17,82 \text{ В}$$

Реактивна потужність конденсаторної батареї:

$$\tan \varphi = 1,797$$

$$Q_{\text{кб}} = P_i \cdot \tan \varphi = 9,623 \cdot 10^4 \text{ Вар}$$

Індуктор, до якого необхідно підвести потужність, повинен бути підключений до джерела живлення через високочастотний навантажувальний трансформатор. До первинної обмотки трансформатора в паралель підключена конденсаторна батарея. З огляду на падіння напруги на трансформаторі, розрахуємо коефіцієнт трансформації.

$$K_{\text{ТР}} = \frac{0,9 \cdot 400}{U_i + 0,1U_i} = 18,368 \approx 18$$

Опір трансформатора підключеним індуктором на вторинній стороні:

$$X_{c6} = (U_i K_{\text{ТР}})^2 / Q_{c6} = 1,069$$

Ємність конденсаторної батареї:  $C_b = 1 / (2\pi f X_{c6}) = 1,49 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$

У КБ повинен бути запас, як мінімум в 20%, отже  $C_b = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$ .

приймаємо ємність  $C_b = 0,2 \text{ мкФ}$

Необхідно врахувати, що напруга на конденсаторній батареї 400 В, тоді реактивна потужність батареї буде  $Q_{c6} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Вар}$

За підсумками даного розрахунку були обчислені наступні значення для параметрів, необхідних для індукційного загартування. На основі цих даних можна спроектувати саму установку для індукційного нагріву та розробити технологічний процес для термічної обробки заготовки діаметром 50 мм.

## РОЗДІЛ 4

# ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРО-ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ІНДУКЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАГРІВУ МЕТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК

### 4.1. Моделювання процесу індукційного нагріву за допомогою програмного забезпечення Comsol Multiphysics

#### 4.1.1. Опис програмного забезпечення.

Розрахунок температурного поля МСЕ поширений внаслідок складності аналітичного рішення, і часто використовуються в прикладних пакетах комп'ютерних програм для комплексних розрахунків полів: електромагнітних, температурних, деформаційних, тощо.

Існуючі програми можуть виконувати як статичні, так і динамічні розрахунки температурних полів. Методи схожі і зводяться до вирішення систем лінійних або нелінійних диференціальних (статичні режими) або алгебраїчних (динамічні режими) рівнянь. Різні пакети програм накладають ті чи інші обмеження на розрахунок температурного поля, можуть враховувати або не враховувати рух розплаву, залежність фізичних величин від температури і т.п.

Рух заготовки призводить до вирівнювання температури в завантаженні. Для рішення задачі необхідно задати граничні і початкові умови теплообміну на границях компонентів (граничні умови третього і четвертого роду), відомих температур (гранична умова першого роду) і потужність джерел тепла, яке виділяється в окремих вузлах сітки (гранична умова другого роду). Коефіцієнти теплопровідності є функціями температури і, в загальному випадку, залежать від координат простору і часу. Методи інтегрування таких рівнянь математичної фізики не розроблені. Але існує багато способів вирішення диференціальних рівнянь, коли параметри досліджуваної області є функціями двох змінних: координат

простору і часу, наприклад класичні методи (Фур'є, джерел), методи інтегральних перетворень. Найбільш часто для інтегрування рівнянь теплопередачі з рухом середовища використовується метод Ейлера.

Програмне середовище COMSOL Multiphysics містить в собі цілий ряд функцій і систем, завдяки яким вона справляється зі складними задачами, а простота в структурі додатка надає простоту в використанні і гнучкість та дозволяє врахувати вищеописані умови.

#### 4.1.2 Модуль AC/DC та бібліотека Comsol Multiphysics

Для аналізу електродинамічних систем та процесів у статичці та на низьких частотах потрібні багатофункціональні та гнучкі інструменти моделювання. Модуль AC/DC, що є розширенням платформи COMSOL Multiphysics, надає безліч можливостей для розрахунку електричних та магнітних полів, електромагнітних перешкод та електромагнітної сумісності (EMC/EMS) шляхом вирішення системи рівнянь Максвелла за допомогою сучасних чисельних методів.

Інтерфейси для (багат шарових) оболонок доступні в модулях *Electric Currents, Layered Shell* (Електричні струми в оболонках) і *Electric Currents, Shell interfaces* (Електричні струми в багат шарових оболонках). Даний модуль дозволяє підвищити ефективність та зручність використання при моделюванні як одношарових, так і багат шарових оболонок, дозволяє інтегруватися з іншими фізичними інтерфейсами у мультифізичних постановках.

Для багат шарових оболонок фізичний інтерфейс визначається на вибірці поверхонь (оболонок) в 3d-постановці, при цьому автоматично визначається додатковий вимір, який відповідає нормалі до оболонки. Завдяки цьому можна моделювати як тангенціальні, так і нормальні електричні поля всередині оболонки і, отже, використовувати інтерфейс для

моделювання провідників та діелектриків у статичному режимі, а також у частотній та часовій областях. При спільному використанні (крім модуля AC/DC) модуля MEMS або модуля *Механіка конструкцій* з модулем Композитні матеріали можна також моделювати багатошарові оболонки з п'єзоелектричних матеріалів.

### 4.1.3 Короткі теоретичні відомості про моделювання індукційного нагріву в Comsol Multiphysics

Основним інтерфейсом фізики для вирішення цього завдання ми вибираємо модуль AC / DC - Magnetic fields. Це найбільш поширений інструмент для моделювання електромагнітних полів в Comsol. Крім нього будемо використовувати модуль Heat Transfers. Він необхідний для моделювання теплових процесів в моделі.

Крім базових граничних умов для завдання потенціалу, струму, заряду та поля в модулі доступні складніші та комплексніші граничні умови. Деякі з них, наприклад Terminal (Термінал) та Floating Potential (Плаваючий потенціал), використовуються для автоматичного визначення еквівалентних параметрів ланцюга з двовимірної або тривимірної моделі, в т.ч. значення та матриці опору, ємності, індуктивності та імпедансу.

В процесі індукційного нагріву, струми, наведені в металевій заготовці, викликають нагрів, а коли температура зростає, електропровідність металу змінюється. Тому одночасне вирішення системи рівнянь індукційного нагріву і зміни опору металу заготовки вкрай важливо для точного опису цього процесу.

Система рівнянь для вирішення цього завдання представлена наступним чином:

$$j\omega(T)A + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A) = 0$$

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} - \nabla \times k \nabla T = Q(T, A)$$

де  $\rho$  - щільність,  $C_p$  - питома теплоємність,  $k$  - теплопровідність,  $Q$  - кількість теплоти.

Середній час індукційного нагріву протягом одного періоду виражається

як:

$$Q = \frac{1}{2} \sigma |E|^2$$

Далі ми використовуємо дві окремі моделі індукційного нагріву. Перша модель характеризує залежність електропровідності металу від температури в заготівлі і індукторі. Друга модель для повітряного домену має постійну провідність, взяту з бібліотеки матеріалів.

Індуктор виконаний з міді. Тому ми можемо знехтувати електромагнітними ефектами всередині індуктора, і звести рішення задачі нагрівання індуктора до вирішення закону Ампера. Система рівнянь буде представлена так:

Так само, необхідно додати велику повітряну область. Це пов'язано з розрахунком електромагнітних полів, тому що магнітне поле не згасає поблизу заготовки або індуктора

## 4.2. Чисельне моделювання процесу індукційного нагріву

### 4.2.1. Моделювання електромагнітних полів

При чисельному моделюванні будемо виходити з режиму живлення від джерела струму, але густину струму будемо визначати за величиною струму, який попередньо визначено аналітично, тобто з урахуванням активного опору обмотки індуктора. Таким чином, визначені при чисельному моделюванні енергетичні параметри індуктора будуть торкатися лише потужності втрат безпосередньо в феромагнітному завантаженні.

Для аналітичного розрахунку електромагнітного поля в магнітна проникність середовища (тіла заготовки) приймається постійною по всьому

об'єму феромагнітного завантаження і розраховується за середнім значенням напруженості магнітного поля на поверхні труби.

Методи чисельного моделювання дозволяють враховувати нелінійну залежність магнітної проникності, яку для цього дослідження будемо приймати такою:

$$\mu = \frac{830}{1 + 0,025 B_z^2} \quad (4.1)$$

Для осесиметричного випадку електромагнітне поле будемо досліджувати відносно векторного магнітного потенціалу, за таким векторним рівнянням:

$$(j\omega\sigma\omega^2\varepsilon)A + \nabla(\mu\nabla A) - \sigma v(\nabla A) = \left(\frac{V_p}{2\pi r} + J_\varphi^\varepsilon\right), A = A_\varphi e_\varphi \quad (4.2)$$

де  $\sigma$  – питома електропровідність матеріалу,  $\text{См/м}$ ;  $\mu$  – абсолютна магнітна проникність середовища ( $\mu = \mu_0\mu_r$ );  $\varepsilon$  – абсолютна діелектрична проникність середовища ( $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ );  $\omega$  – обертова частота,  $\text{рад/с}$ .

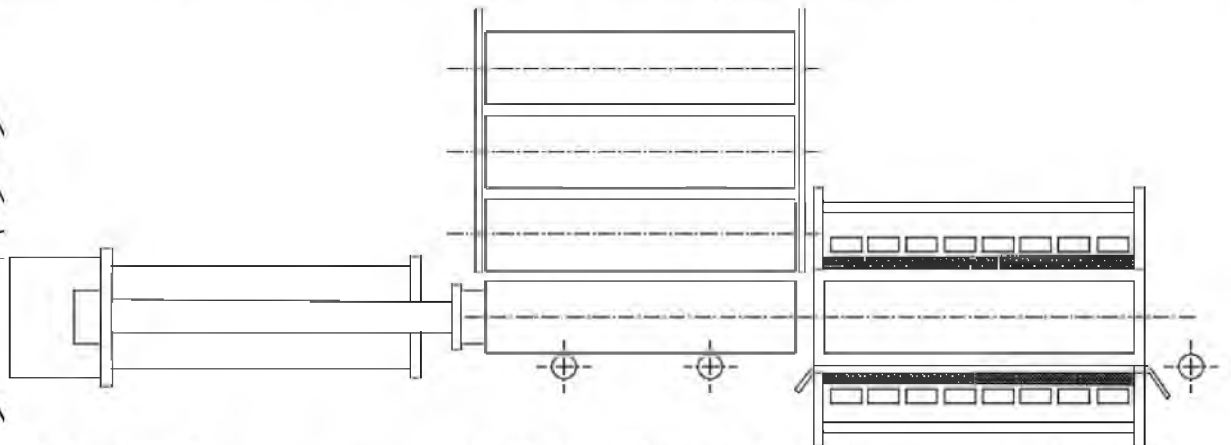
Нагрівання чорнових труб для проведення технологічного процесу прокатки здійснюється «в один етап». При цьому нагрів здійснюється в індукційній прохідній печі (температури до  $800^\circ\text{C}$ ). У цьому випадку тепло виділяється всередині самої труби і втрати теплової енергії в навколишнє середовище значно менші. У разі, якщо температура нагріву сталеві труби перевищує точку Кюрі, (для сталі ця точка приблизно дорівнює  $770^\circ\text{C}$ ) ефективність нагрівання підвищується ще більше, оскільки матеріал труби втрачає магнітні властивості і глибина проникнення електромагнітного поля в метал збільшується.

Необхідно також зазначити, що температурний режим можна змінювати, змінюючи потужність індуктора.



Для прикладу, рівномірність нагрівання труб в газовій печі невелика. Розкид температури нагрітих труб може досягати 100-200, а іноді і більше градусів за Цельсієм. При цьому також має місце значна різниця температур для різних ділянок однієї і тієї ж труби.

Запропонована установка індукційного нагріву труб складається з одної секції. Нагрівання труби в індукторі (секції) здійснюється поступово, це пов'язано з тим, що різке підвищення температури нагрівання в одному індукторі може призвести до локальних деформацій труби. Крім того при одномоментному сильному нагріванні розподіл температури по перерізу труби виявляється не рівномірним, що також може привести до деформації труби.



Мал.4.1 Структурна схема установки

Індуктор живиться від мережі з частотою 500 Гц і забезпечує нагрівання труби до температури, необхідної за умовами технологічного процесу.

Для дослідження установки індукційного нагріву розроблена послідовна електромагнітно-теплова модель індуктора спільно з тілом, що нагрівається.

На першому етапі моделювання побудуємо модель однофазного циліндричного індуктора з завантаженням у вигляді феромагнітної труби, яка рухається у внутрішньому просторі індуктора (Рис. 4.1). По мірі

проходження труби вздовж індуктора, за рахунок теплової дії вихрових струмів, вона нагрівається до необхідної температури.

Чисельний розв'язок рівняння (4.2) реалізовано в розрахунковому середовищі Comsol методом скінченних елементів. Розрахункова модель була побудована за допомогою модуля *AC/DC Module* в розділі *Quasi-Static, Magnetic* в підрозділі *Azimuthal Induction Currents, Vector Potential* з урахуванням гармонічного аналізу – *Time-harmonic analysis*.

На етапі побудови розрахункової моделі необхідно задати геометричні параметри та електро-фізичні властивості кожної з областей.

Розрахункова модель складається з одного індуктора (серпів) довжиною 1500 мм із завантаженням у вигляді циліндричної феромагнітної загострки діаметром 300 мм, що рухається вздовж каналу індуктора зі швидкістю 0,01 м/с

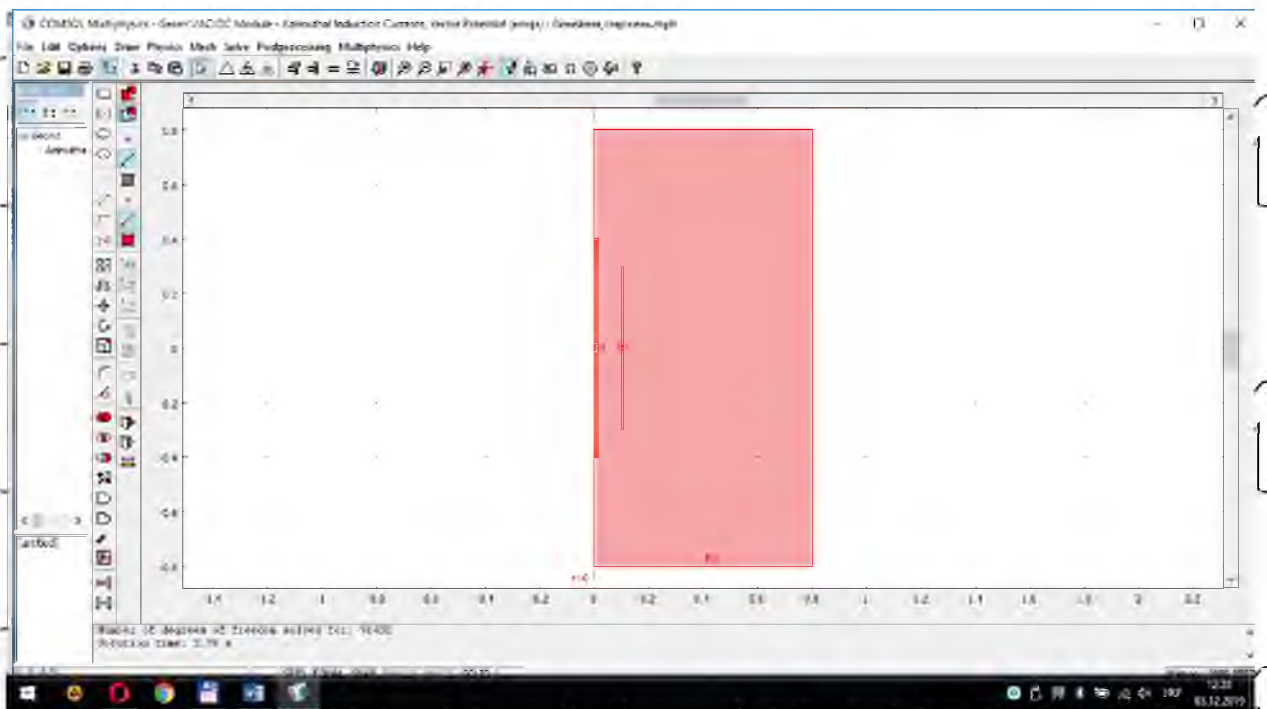


Рис. 4.2 Розрахункова модель циліндричного індуктора

Для коректного розв'язку електромагнітної задачі на границях областей задавались такі умови:

- умова азимутальної симетрії відносно осі,  $r = 0$ ;

умова магнітної ізоляції на зовнішніх границях,  $\vec{A} \cdot \vec{n} = 0$   
 на всіх інших границях автоматично присвоюється умова  
 неперервності (на границях індуктора і труби),  $\vec{n} \cdot (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = 0$ ,

де  $H$  – напруженість магнітного поля, А/м;  $n$  – вектор зовнішньої нормалі.

Розрахункова область розбивалась на досить велику кількість кінцевих елементів. Кінцево-елементна сітка на розрахунковій області індуктора наведена на Рис.4.3. Так, для отримання більш точного результату в області, що займає тіло труби, на глибину проникнення електромагнітної хвилі було розміщено близько 10 кінцевих елементів (Рис.4.3.). У нашому випадку при роботі індуктора на промисловій частоті  $f = 500 \text{ Гц}$  глибина проникнення електромагнітної хвилі у феромагнітному середовищі  $\delta = 1 \text{ мм}$ .

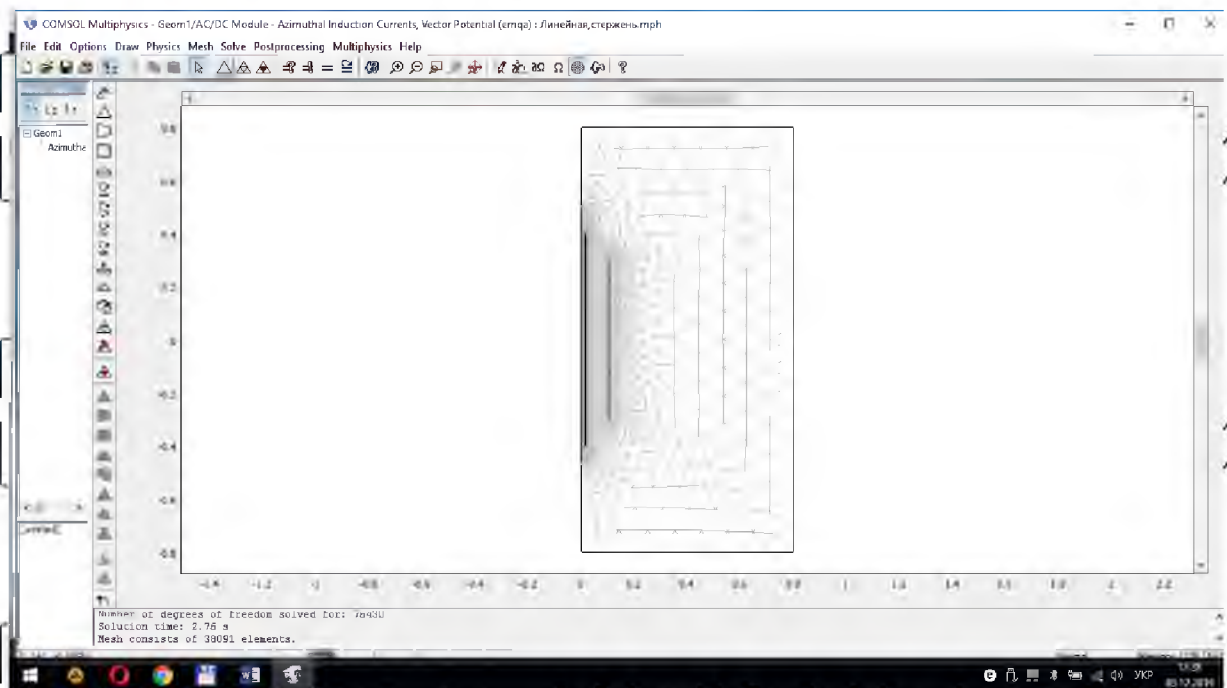


Рис.4.3,а. Кінцево-елементна сітка на розрахунковій області індуктора

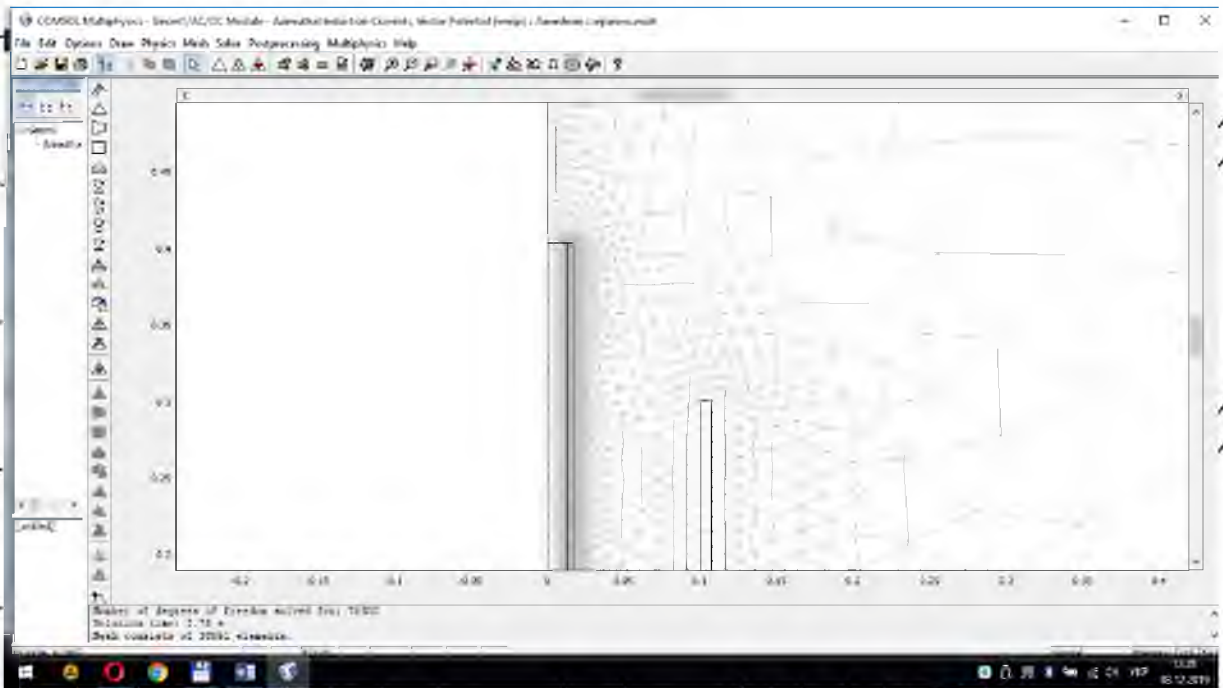


Рис. 4.3.6. Кінцево-елементна сітка на розрахунковій області індуктора

#### 4.2.2. Моделювання температурних полів

Наступним етапом дослідження є розробка і рішення теплової частини задачі. Виходячи з того, що лінійні розміри феромагнітного завантаження більші довжини індуктора і довжина індуктора більша його діаметра як мінімум втричі ( $a > 3 \cdot d_1$ ) з експериментальних досліджень [5], можна стверджувати, що поле всередині індуктора розподілено рівномірно.

Рішення такої задачі зводиться до вирішення рівняння нестационарної теплопровідності, яке має вигляд:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \lambda \nabla T = \begin{cases} Q - \text{сталь,} \\ -\rho c_p \lambda \nabla T - \text{повітря,} \end{cases} \quad (4.3)$$

де  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$  - щільність, питома теплоємність і теплопровідність матеріалу відповідно середовища;  $Q$  - питома потужність джерел теплоти,  $t$  - час.

Для теплової задачі були прийняті наступні граничні умови:

- на осі симетрії - умова симетрії  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ ;
- на кордоні дотику двох середовищ (сталь і повітря) - умова 4-го роду

$$\frac{k \partial T}{\partial r}$$

де  $k = 10 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$  - експериментальний коефіцієнт теплопередачі на стінці металевої заготовки [5];

- на зовнішній границі області - умова рівності нулю теплового потоку

$$\mathbf{n} \cdot (\lambda \nabla T) = 0$$

де  $\mathbf{n}$  - вектор зовнішньої нормалі.

а також початкові умови:

- початкова температура середовищ -  $T_0 = 293,15 \text{ K}$ ;

- швидкість руху заготовки, яка розглядається як суцільне середовище -

$$v = 0,01 \text{ м/с.}$$

Рішення такого завдання може бути реалізоване чисельно в

програмному середовищі COMSOL в осесиметричній постановці (рисунок

4.4) за допомогою модуля *Heat Transfer Module* в розділі *General Heat Transfer* з урахуванням часу *Transient analysis (time dependent)*.

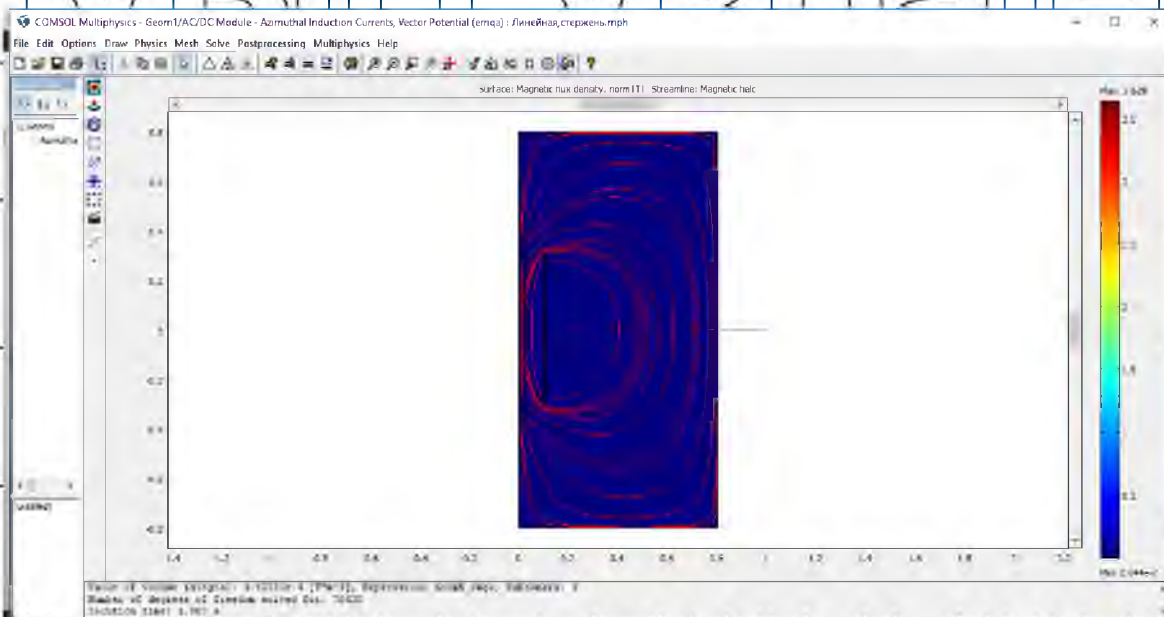


Рис.4.4. Результати моделювання процесу індукційного нагріву.

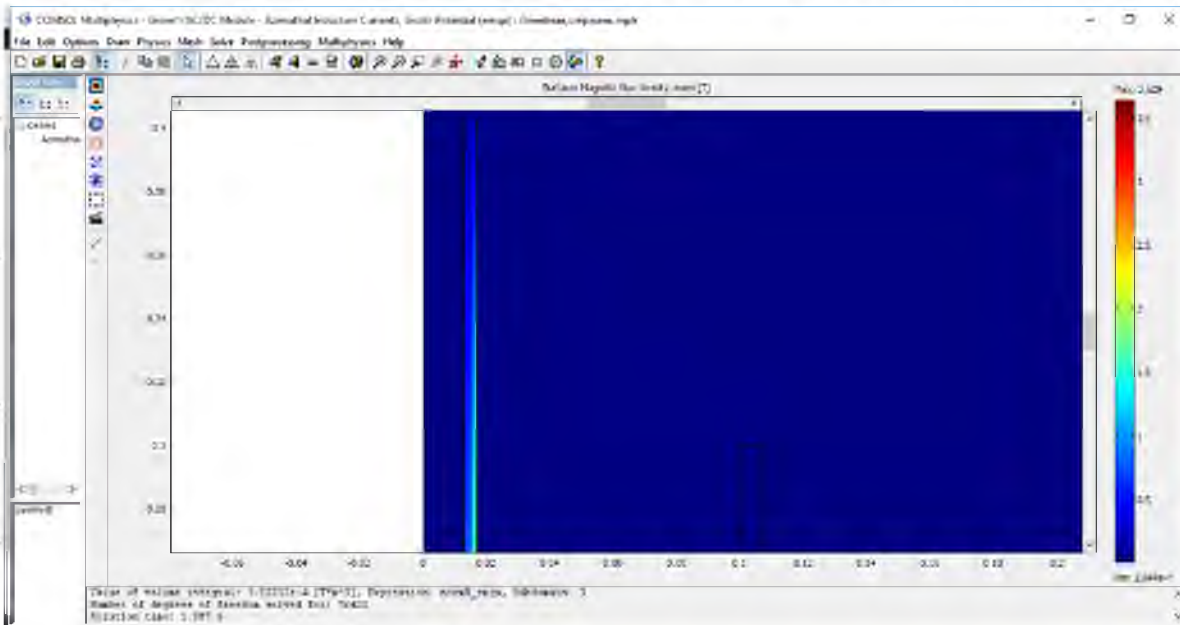


Рис.4.5 Розподіл магнітної індукції по довжині і глибині заготовки

За результатами моделювання процесу індукційного нагріву металевої заготовки циліндричної форми було визначено розподіл температурного поля вздовж завантаження індуктора. При цьому на виході з каналу індуктора температура заготовки досягла майже  $850^{\circ}\text{C}$ , що задовольняє вимогам технологічного процесу температурної обробки металу перед прокатом.

Отримано розподіл питомих (на одиницю об'єму) втрати енергії по товщині стінки труби при нагріванні циліндра до  $400^{\circ}\text{C}$  (Рис.4.5,а) і до  $800^{\circ}\text{C}$  (Рис.4.5,б)

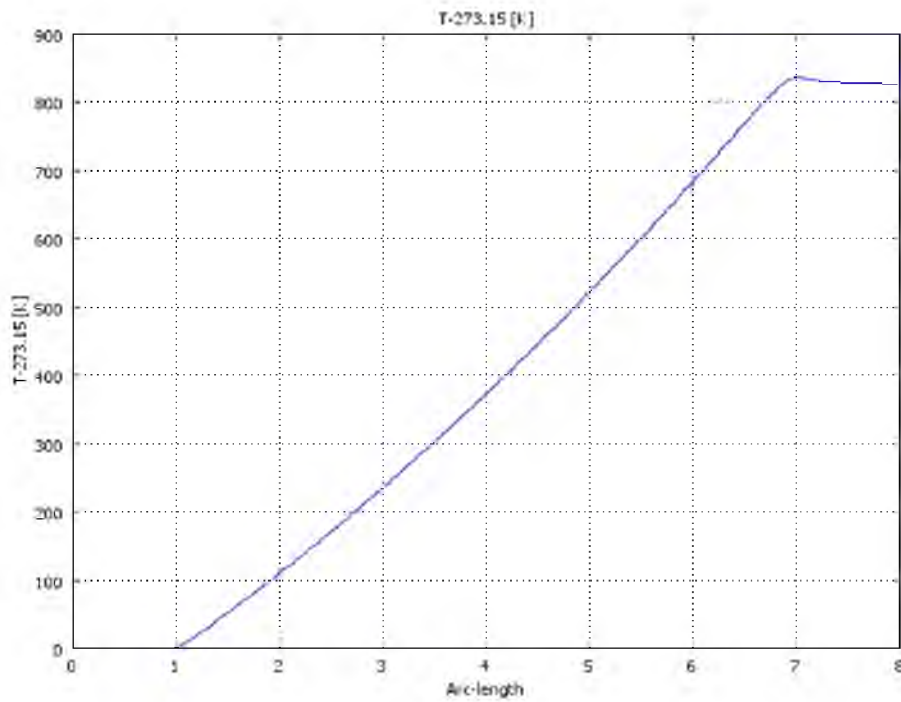


Рис.4.6,а. Розподіл температури по довжині заготовки.

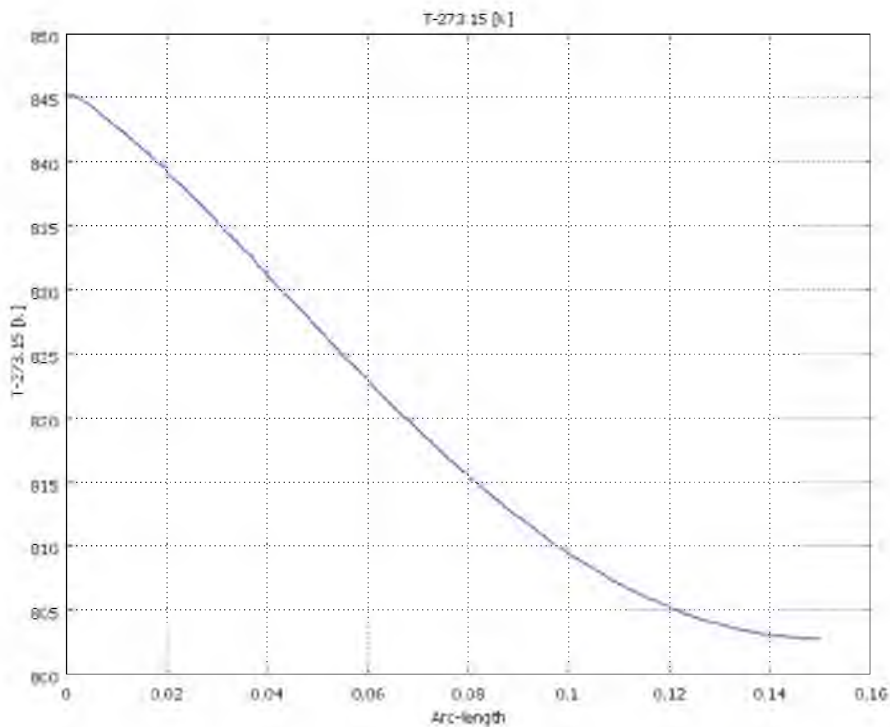


Рис.4.6,б. Розподіл температури по глибині (радіусу) заготовки.

Як видно з Рис. 4.5,а-4.5,б металева заготовка по мірі проходження через канал індуктора (швидкість проходження рівна 0,01 м/с) нагрівається до необхідної температури. Проте глибина проникнення електромагнітної хвилі в метал не достатня для прогріву труби по всій товщині стінки і прогрів

внутрішніх шарів здійснюється за рахунок теплопередачі. Таким чином, для ефективного нагріву можна вибирати різні частоти струму для секцій індуктора.

Отже основним критерієм ефективності нагріву є завдання температури нагріву і рівномірність прогріву заготовки по всьому поперечному перерізі.

Результати розрахунку показують, що при потужності індуктора 100 кВт забезпечується нагрів до заданої температури при швидкості руху заготовки 0,01 м/с, а також відбувається вирівнювання температури по перерізу за час

проходження заготовки по каналу індуктора, що є важливим для якості кінцевої продукції.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України



## РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 5.1 Правила охорони праці під час термічної обробки металевих заготовок

#### 5.1.1 Загальні положення

Головною метою охорони праці є створення на кожному робочому місці безпечних умов праці, безпечної експлуатації обладнання, зменшення або повна нейтралізація дії шкідливих і небезпечних виробничих факторів на організм людини і, як наслідок, зниження виробничого травматизму та професійних захворювань.

Метою даного розділу є аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які виникають при роботі термічного цеху в умовах ДП «Антонов» та розробка заходів і засобів, спрямованих на мінімізацію їх несприятливого впливу на працюючих.

Основний нормативний документ щодо організації охорони праці в Україні – це Закон України «Про охорону праці».

Згідно статті 13 Закону України «Про охорону праці» роботодавець зобов'язаний забезпечити на робочому місці та у кожному структурному відділенні умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечення нормативно-правових вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці. У статті 14 «Обов'язки працівника щодо додержання вимог нормативно-правових актів з охорони праці» сказано, що працівник зобов'язаний: дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку і здоров'я оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт чи під час перебування на території підприємства; знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці, правила поведіння з машинами, механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва,

користуватися засобами колективного та індивідуального захисту; проходити у встановленому законодавством порядку попередні та періодичні медичні

огляди. Працівник несе безпосередню відповідальність за порушення зазначених вимог.

Оскільки на дільниці кількість працюючих менше 20 осіб, то відповідно до статті 15 Закону України «Про охорону праці», для виконання функцій служби охорони праці можуть залучатися сторонні спеціалісти на договірних засадах, які мають відповідну підготовку.

Загальну відповідальність за стан охорони праці на підприємстві несе безпосередньо власник підприємства.

## 5.2 Вимоги до виробничого устаткування

На дільниці розташоване обладнання для термічної обробки металевих заготовок перед гартуванням, а саме: індукційний теплогенератор, гартувальний та промивний баки.

Для забезпечення оптимального мікроклімату ДСН 3.3.6.042-99 [13] встановлюють оптимальні і допустимі температуру, відносну вологість та швидкість руху повітря в робочій зоні в залежності від пори року та категорії важкості робіт.

Згідно за ДСН 3.3.6.042-99 [13], роботи за ступенем важкості відносять до середньої II б (роботи, що виконуються стоячи, пов'язані із ходінням, переміщенням невеликих (до 10 кг) вантажів, та супроводжуються помірним фізичним напруженням).

Оптимальні та допустимі величини температури, вологості та швидкості руху повітря наведені в таблиці 3.1, що регламентується ДСН 3.3.6.042-99.

Таблиця 5.1

Оптимальні та допустимі величини температури, вологості та швидкості руху повітря.

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість, %		Швидкість руху повітря, м/с	
		Опт.	Допуст.	Опт.	Допуст.	Опт.	Допуст.
Холодний	ІІб	17...19	15...21	40...60	70	0,3	0,4
Теплий		20...22	15...27	40...60	75	0,2	0,2...0,5

Значення параметрів мікроклімату суттєво впливають на самопочуття та працездатність людини і, як наслідок цього, рівень травматизму. Тривала дія високої температури повітря при одночасно підвищеній вологості призводить до підвищення температури тіла людини до 38...40 °С, внаслідок чого це призводить до фізіологічних порушень в організмі людини таких як: зміни у серцево-судинній системі, обміну речовин, зміни функцій внутрішніх органів, системі дихання, порушення центральної та периферичної нервових систем.

Для створення необхідних параметрів мікроклімату в виробничому приміщенні застосовують системи вентиляції і кондиціонування повітря, а також різні опалювальні пристрої. Вентиляція забезпечує зміну повітря в приміщенні, призначену підтримувати в ньому відповідні метеорологічні умови і чистоту повітряного середовища. Вентиляція приміщень досягається видаленням з них нагрітого або забрудненого повітря і подачею чистого зовнішнього повітря.

### 5.3 Теплове випромінювання

При роботі з ліччою для гартування, а також масляними ваннами існує

небезпека теплового впливу на організм людини, який викликає інфрачервоне випромінювання. Джерелами теплового випромінювання є камерна піч СНО-3.6.2/10 для гартування та масляна ванна СВМ-2,5.2,5/3 для відпуску. Над теплогенераторами встановлена витяжна вентиляція марки С 4.70-3.2.

Інфрачервоне випромінювання впливає на функціональний стан людини, його центральну нервову систему, серцево-судинну систему, а також може викликати цілий ряд патологічних змін в стані очей. Допустима густина потоку ІЧВ встановлена з урахуванням області випромінювання. У відповідності з ДСП 3.3.6.042-99 інтенсивність опромінення ІЧВ від відкритих джерел (нагрітий метал та нагрівачі) не повинна перевищувати 140 Вт/м<sup>2</sup> при опроміненні не більш ніж 25 % поверхні тіла і обов'язковому застосуванні засобів індивідуального захисту, в тому числі засобів захисту обличчя та очей.

У відповідності з ДСП 3.3.6.042-99 буде здійснено екрануванням джерел випромінювання за допомогою тепло-ізолюючих матеріалів. Ззовні піч буде мати металевий кожух. В якості засобів індивідуального захисту буде використано суконні рукавиці та одяг ДСТУ 7239:2011, для захисту очей від впливу ІЧВ – окуляри зі спеціального жовто-зеленого скла ДСТУ EN 169-2001.

#### 5.4 Електробезпека

На гартувальній дільниці розташовані індукційний теплогенератор (380В); гартувальний бак (380В); промивальний бак (220В); кран-балка (380В); твердомір типу ТК (220В).

За ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом дільницю можна віднести до класу приміщень з особливою небезпекою, що обумовлено наявністю:

- вологість з постійною відносною вологістю повітря більше 75 %;

• струмопровідний під; струмопровідні підлоги (земляні, металеві, залізобетонні, негелійні);

- висока температура повітря (вище 35 °С);

• можливість одночасного дотику людини до металевих конструкцій будинків, технологічних апаратів, механізмів і до металевих корпусів електроуєтаткування.

Джерелами ураження електричним струмом є електричні установки.

Електричні травми можуть причиняти наступні фактори:

- невідповідність електроустановок, засобів захисту і приладів

вимогам безпеки;

- невиконання технічних заходів безпеки;
- організаційно-соціальні причини.

Випадки ураження електричним струмом:

• дотик до неізоьованих струмовідних частин електроустановок, які знаходяться під напругою, або до ізоьованих при фактично пошкодженій ізоляції – 55%;

• дотик до неструмовідних частин електроустановок або до електрично зв'язаних з ними металокопструкцій, які опинились під напругою в результаті пошкодження ізоляції – 23%;

- дія напруги кроку – 2,5%;
- ураження через електричну дугу – 1,2%;
- інші причини – менше 20%.

Основні чинники електричного характеру – це величина струму, що проходить крізь людину, напруга, під яку вона потрапляє, та опір її тіла, рід і частота струму. Величина струму, що проходить крізь тіло людини, безпосередньо і найбільше впливає на тяжкість ураження електричним струмом.

Основними чинниками неелектричного характеру є шлях струму через людину, індивідуальні особливості і стан організму людини, тривалість дії струму, раптовість і непередбачуваність дії струму.

Шлях струму через тіло людини суттєво впливає на тяжкість ураження.

Особливо небезпечно, коли струм проходить через життєво важливі органи і безпосередньо впливає на них.

Чинниками виробничого середовища, які впливають на небезпеку ураження людини електричним струмом, є: температура повітря в приміщенні, вологість повітря, запиленість повітря, наявність у повітрі хімічно активних домішок, тощо. Із підвищенням температури повітря посилюється потовиділення, зволожується одяг, взуття. Це призводить до зниження опору на ділянці включення людини в електричну мережу.

Вологість повітря аналогічно впливає на опір на ділянці включення людини в електричну мережу. Крім того, підвищення вологості знижує опір ізоляції електроустановки, що є одним із важливих чинників електробезпеки. Запиленість повітря, особливо струмопровідним пилом, також негативно впливає на опір ізоляції установки, сприяє переходу напруги на неструмовідні частини установки, коротким замиканням, тощо і, таким чином, підвищує небезпеку електротравми.

Безпека експлуатації при нормальному режимі роботи електроустановок забезпечується наступними захисними заходами: застосуванням ізоляції, недоступністю струмопровідних частин, застосуванням малих напруг, захисним заземленням і використанням електрозахисних засобів.

## 5.5 Пожежна безпека

Основні причини виникнення пожежі в термічній дільниці є загорання електропроводки, використання легкозаймистих речовин, наявність відкритого джерела вогню.

Пожежна безпека входить в комплекс охорони праці, і організаційна робота в цій сфері включає широкий спектр заходів, а саме:

- створення умов для безпечної праці;
- мінімізації ризику виникнення пожежі;
- своєчасне і повноцінне забезпечення технічними засобами для запобігання займанню та усунення самих пожеж та їх наслідків;
- контроль дотримання протипожежних вимог і норм законодавства;
- розробка і впровадження регламентів по гасінню пожеж, евакуації та порятунку з місць пожежі та задимлення людей і матеріальних цінностей;
- внутрішнє і зовнішнє навчання людей.

Категорія приміщення за пожежною безпекою Г<sub>1</sub> (ОМТП24-86) відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016.

При виникненні пожежі необхідно мати вогнегасники ОУ – 2, ОУ – 5, ОУ – 8 або ОП – 1, ОП – 2, ОП – 5, ОП – 10.

Для забезпечення пожежної безпеки передбачені наступні заходи:

- 1) навколо цеху має бути розміщений зовнішній водопровід, який має гідранти, розташовані через 100 м;
- 2) біля цеху мають бути передбачені проїзні дороги;
- 3) біля можливих місць виникнення пожежі розміщується такий інвентар: ящики, пожежні ломы, багри, сокири, азбестове полотно;
- 4) всі ємності з паливом та вибухонебезпечними речовинами ізолювані і розташовані на небезпечній відстані від можливих джерел появи полум'я;
- 5) на випадок виникнення пожежі передбачена сигналізація та прямий телефонний зв'язок з пожежною охороною.

В роботі проведено аналіз шкідливих та небезпечних факторів, які передбачають умови, при яких може виникнути небезпека ураження організму. Запропоновано заходи для уникнення травмування.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України



## ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної магістерської роботи було проаналізовано сучасний стан систем із теплової обробки металевих заготовок, в результаті чого визначено основні принципи використання електричного нагріву в таких технологічних процесах.

2) Проаналізовано електромагнітні і температурні поля при індукційному нагріві металевих заготовок циліндричної форми.

3) В програмному середовищі COMSOL проведено чисельний розрахунок електромагнітних і температурних полів при індукційному нагріві рухомих металевих заготовок, за результатами якого було змодельовано процес індукційного нагріву сталених циліндричних заготовок діаметром 300 мм. При цьому індукційна установка складалась з однієї секції потужністю 100 кВт; частота струму мережі живлення - 500 Гц; температура заготовки на виході з каналу індуктора складала 800 °С

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України