

Міністерство освіти і науки України
Інженерний навчально-науковий інститут
Запорізького національного університету

В. М. Проценко, Ю. В. Бондаренко, А. В. Явтушенко

ТЕХНОЛОГІЯ НАГРІВУ ТА НАГРІВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ В ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

Навчально-методичний посібник
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності 136 "Металургія"
освітньо-професійної програми "Металургія"

Затверджено
вченою радою ЗНУ
Протокол № _____ від _____ 2021 р.

Запоріжжя
2021

Проценко В. М., Бондаренко Ю. В., Явтушенко А. В. Технологія нагріву та нагрівальне обладнання в обробці металів тиском : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Металургія". Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 126 с.

Навчальна-методичний посібник виконано за дисципліною «Технологія нагріву та нагрівальне обладнання в обробці металів тиском». В навчально-методичному посібнику викладено теоретичну частину, методики розрахунків, наведено приклад розрахунку камерної печі, лабораторні роботи, варіанти індивідуальних завдань, перелік рекомендованої літератури. Наведено найбільш розповсюджені печі і теплові агрегати за всіма технологічними переробками процесів обробки металів тиском. Наведено способи підвищення ефективності роботи печей і конструкції енергозберігаючих пристроїв. Представлена інформація щодо електронагрівальних установок, їх конструкції і роботи. Розглянуто питання удосконалення технології і режимів гарячої тонкоштабової прокатки. Проаналізовано методи регулювання теплового стану розкату на неперервних широкоштабових станах гарячої прокатки.

Навчально-методичний посібник ставить за мету поглиблення знань за курсом «Нагрів і нагрівальне обладнання в обробці металів тиском», надбання теоретичних та практичних навичок за технологією нагріву.

Для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Металургія".

Рецензент

І. К. Огинський, зав. кафедрою металургійного обладнання ІННІ ЗНУ, доктор технічних наук, професор

Відповідальний за випуск

Ю. О. Блоконь, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри обробки металів тиском ІННІ ЗНУ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ	8
2 НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ	10
2.1. Технологія нагрівання металу	10
2.2. Нагрівальні пристрої	17
2.3 Механізми ділянки нагрівальних печей широкоштабових станів гарячої прокатки	33
3 ПІДГРІВ ШТАБИ ПЕРЕД ЧИСТОВИМИ КЛІТЯМИ ІНДУКЦІЙНИМ СПОСОБОМ	38
3.1 Уточнення методики розрахунку теплових втрат металу на безперервних станах гарячої прокатки	39
4 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РІВНОМІРНОГО РОЗПОДІЛУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ	48
4.1 Теплозберігаючі екрани	48
4.2 Індукційний підігрів	55
5 ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ТА ВІДДІЛКА ХОЛОДНОКАТАНОЇ ЛИСТОВОЇ СТАЛІ	58
5.1 Характеристика термічного відділення цеху холодної прокатки ЦХП–1 комбінату «Запоріжсталь»	59
5.2 Одностопні газові ковпакові печі	60
5.3 Захисна атмосфера	63
6 ПРИЗНАЧЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ КОНТРОЛЬНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ	67
6.1 Прилади для вимірювання тиску	67
6.2 Прилади для вимірювання витрат рідини і газів	70
6.3 Прилади для вимірювання температури	73

7 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ	80
7.1 Визначення окалиноутворення при нагріві сталевих заготовок .	80
7.2 Визначення градієнта температур по перетину заготовки і коефіцієнта тепловіддачі металу при нагріві	82
7.3 Визначення втрат тепла при транспортуванні заготовки до ковальського агрегату	84
7.4 Визначення коефіцієнта корисної дії (к.к.д.) електропечі	87
 8 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ І ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	 90
8.1 Розрахунок камерної печі	90
8.1.1 Приходні статті балансу	94
8.1.2 Витратні статті балансу	94
8.1.3 Тепловий баланс камерної печі	97
8.1.4 Варіанти індивідуальних завдань для розрахунку камерної печі	98
8.2 Розрахунок параметрів формозмінювання при поздовжньому прокатуванні штаби	99
8.2.1 Теоретичний вступ	99
8.2.2 Завдання на виконання розрахунків параметрів формозмінювання при поздовжньому прокатуванні штаб	106
8.2.3 Приклад визначення параметрів формозмінювання при прокатуванні	107
8.2.4 Варіанти індивідуальних завдань	109
8.3 Розрахунок змінювання температури металу при гарячому прокатуванні в реверсивній кліті	110
8.3.1 Теоретичний вступ	110
8.3.2 Завдання для розрахунку змінювання температури металу по проходам при реверсивному прокатуванні	116
8.3.3 Приклад визначення змінювання температури металу по проходам	117
8.3.4 Варіанти індивідуальних завдань № 2	122
 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	 125

ВСТУП

В обробці металів тиском відповідальною і складною технологічною операцією є нагрів металу. Від правильно вибраного способу нагріву залежить не тільки якість готової продукції, стійкість інструменту, палива і електроенергії, але і продуктивність праці, зниження необхідного зусилля і потужності устаткування.

Висока якість продукції, що отримується процесами обробки металів тиском (ОМТ) досягається при правильному нагріванні металу у межах встановлених температур. Таким чином нагрівання металу в процесах ОМТ є важливішою операцією, яка в значній мірі визначає якість і вартість продукції, а також продуктивність виробництва.

Зростання промислового виробництва прокатної продукції, поковок гарячого штампування, освоєння нових матеріалів для штамків, підвищення маси і розмірів поковок – усе це обумовлює необхідність удосконалення засобів нагрівання і контролю температури заготовок для забезпечення регламентованих температурно-швидкісних режимів обробки металів тиском.

Характерною особливістю сучасної теорії і практики нагріву є комплексний підхід до вивчення теплофізичних процесів при гарячій обробці металів тиском з урахуванням окислення і газонасичення металу, теплової роботи нагрівального пристрою, режимів нагріву і охолодження, термомеханічних властивостей продукції, теплової роботи інструменту і інших чинників, що визначають продуктивність устаткування і якість готової продукції.

«Технологія нагріву та нагрівальне обладнання в обробці металів тиском» – прикладна інженерна дисципліна, яка визначає загальні основи технології нагрівання металу та обладнання, яке для цього застосовується в процесах обробки металів тиском.

Метою вивчення навчальної дисципліни «Технологія нагріву та нагрівальне обладнання в обробці металів тиском» є визначення конструктивних особливостей обладнання для нагріву металу в процесах обробки металів тиском; вивчення методик розрахунку характеристик нагрівального обладнання; вивчення технологій термічної обробки, що використовуються на металургійних підприємствах, уміння виконувати розрахунки печей різноманітних видів.

В навчально-методичному посібнику наведено відомості про паливо і його спалювання, нагрівання металу, теплообмін в печах. Наведено найбільш розповсюджені печі і теплові агрегати за всіма технологічними переробками процесів обробки металів тиском. Наведено способи підвищення ефективності роботи печей і конструкції енергозберігаючих пристроїв. Представлена інформація щодо електронагрівальних установок, їх конструкції і роботи. Розглянуто питання удосконалення технології і режимів гарячої тонкоштабової прокатки. Проаналізовано методи регулювання теплового стану розкату на неперервних широкоштабових станах гарячої прокатки.

Наведено приклади розрахунку камерної печі, розрахунку змінювання температури металу при гарячому прокатуванні в реверсивній кліті, варіанти

індивідуальних завдань. Для проведення лабораторного практикуму наведено лабораторні роботи за тематикою даного посібника.

Робочою програмою дисципліни «Технологія нагріву та нагрівальне обладнання в обробці металів тиском» передбачено 48 годин лекційних занять, 16 годин практичних занять, 16 годин лабораторних занять і 10 годин самостійна робота. Матеріал для лекційних занять містить 6 тем. Розподіл годин за змістовими модулями наступний: по 8 годин на кожний змістовий модуль. Лабораторні заняття включають 4 роботи. Розподіл годин за роботами наступний: по 5 годин на 1 і 4 роботу і по 3 години на 2 і 3 роботи. Практичні заняття передбачають розрахунок камерної печі (16 годин). Самостійна робота передбачає виконання розрахунків за 2-ма завданнями (пп. 8.2 і 8.3) – по 5 годин на кожне завдання.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

знати: класифікацію способів нагріву та нагрівального обладнання цехів ОМТ, конструктивні особливості та особливості експлуатації пічного обладнання та установок нагріву в залежності від типу технологічного процесу ОМТ, методики розрахунків нагрівального обладнання.

вміти: здійснювати вибір нагрівального обладнання та режиму нагріву в залежності від характеру виробництва та сортаменту заготовок, виконувати розрахунки нагрівального обладнання, вдосконалювати виробництво продукції, отриманої методами ОМТ.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких спеціальних компетентностей:

СК16. Здатність застосовувати системний підхід до вирішення проблем металургії.

СК17. Здатність вирішувати типові інженерні завдання відповідно до спеціалізації.

СК18. Критичне осмислення наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів, необхідних для професійної діяльності в сфері металургії.

СК19. Здатність застосовувати і інтегрувати знання на основі розуміння інших інженерних спеціальностей.

СК20. Здатність застосовувати наукові і інженерні методи, а також комп'ютерне програмне забезпечення для вирішення типових та комплексних завдань металургії за спеціалізацією, у тому числі в умовах невизначеності.

СК21. Здатність демонструвати творчий та інноваційний потенціал в синтезі рішень і в розробці проектів в металургії.

СК22. Здатність виявляти, класифікувати і описувати ефективність систем, компонентів і процесів в металургії на основі використання аналітичних методів і методів моделювання.

СК23. Усвідомлення контекстів, в яких можуть бути застосовані знання металургії (наприклад, управління процесами та обладнанням, менеджмент, розробка технології тощо).

СК24. Здатність визначити та дослідити проблему у сфері спеціалізації, а також ідентифікувати обмеження, зокрема ті, що пов'язані з питаннями сталого розвитку, охорони природи, здоров'я і безпеки та з оцінками ризиків.

СК25. Усвідомлення характеристик специфічних матеріалів, обладнання, процесів та продуктів відповідної спеціалізації.

СК26. Здатність працювати з технічною невизначеністю.

СК27. Здатність використовувати математичні принципи і методи, необхідні для підтримки спеціалізації в металургії.

СК28. Здатність управляти комплексними діями або проектами відповідно до спеціалізації для забезпечення досягнення поставленої мети з урахуванням всіх аспектів вирішуваної проблеми, у тому числі пов'язаних із виробництвом, експлуатацією, технічним обслуговуванням та утилізацією.

СК29. Здатність забезпечувати якість продукції.

СК30. Усвідомлення комерційного та економічного контекстів діяльності; здатність ідентифікувати фактори, що впливають на витрати в планах і проектах, відповідно до спеціалізації, та керувати ними; здатність застосовувати методи управління, адекватні поставленим цілям та завданням.

СК31. Усвідомлення вимог до діяльності в сфері спеціалізації, зумовлених необхідністю забезпечення сталого розвитку.

СК32. Усвідомлення питань інтелектуальної власності та контрактів у металургії.

СК33. Здатність реалізовувати концепції ощадливого виробництва та загальні принципи зниження виробничих витрат у металургії, а також впроваджувати ресурсозберігаючі технології, які дозволяють акумулювати ресурси, спрямовані на досягнення

цілей в усіх напрямках діяльності металургійного підприємства.

СК34. Здатність застосовувати кращі світові практики, стандарти діяльності у металургії.

Міждисциплінарні зв'язки.

Вивчення дисципліни «Технологія нагріву та нагрівальне обладнання в обробці металів тиском» базується на дисциплінах «Електротехніка» і «Хімічна термодинаміка».

Дисципліна «Технологія нагріву та нагрівальне обладнання в обробці металів тиском» забезпечує подальше засвоєння дисциплін «Теорія та технологія феросплавного виробництва» і «Металургія кольорових металів», підготовку кваліфікаційної роботи бакалавра та подальшу дослідницьку діяльність в галузі обробки металів тиском та інших галузях науки і техніки.

Вивчення дисципліни «Технологія нагріву та нагрівальне обладнання в обробці металів тиском» розширює можливості студентів при виконанні науково-дослідних робіт і кваліфікаційної роботи бакалавра.

Навчально-методичний посібник призначений для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Металургія".

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ

Процеси виробництва листової сталі є складним і багатофакторним. В області прокатного виробництва передбачено значне збільшення розробки листової продукції і підвищення якості переважно за рахунок введення в експлуатацію потужних широкоштабових листових станів. Сьогодні безперервні і напівнеперервних широкоштабові стани гарячої прокатки є основними агрегатами в комплексі обладнання, призначеного для виробництва тонкого листа. Продуктивність цих станів і якість прокатаних штаб, визначають обсяг виробництва і якість не тільки гарячекатаних, але і холоднокатаних листів.

Сьогодні широкоштабові стани гарячої прокатки є високо механізованими і автоматизованими агрегатами. Автоматизація цих станів забезпечує високу продуктивність і якість прокатаних штабів за рахунок найбільш повного задоволення вимог технології і оптимізації режимів роботи станів. На цих станах прокатують листи і штаби завтовшки від 1,2 до 12 – 16 мм і шириною до 1850 – 2150 мм.

Гарячекатаний рулонний прокат товщиною 1,8-2,0 мм і шириною 800-1550 мм з мало вуглецевих марок сталі користується на ПАТ «Запоріжсталь» найбільшим попитом у закордонних і вітчизняних споживачів. Він виробляється відповідно до міжнародного стандарту EN ISO 9001:2000 і ДСТУ 2834-94.

Довгі роки в металургії необхідної уваги не приділялося питанням зниження витрат енергії при прокатуванні. Сьогодні ж пріоритетом в промисловості є істотне зменшення енергоємності виробництва металу. Реалізація енергозбереження, як напрямок розвитку металургії, розглядається як неодмінна умова досягнення енергонезалежності України. Тенденції на світовому ринку енергоносіїв свідчать про те, що ціна на газ, нафту, вугілля буде безперервно зростати. Швидше за все, видобуток їх у світі в перспективі не збільшиться. Буде підвищуватися вартість електроенергії. Тому гострота проблеми тепло/енергозбереження в металургії і прокатному виробництві буде зростати.

Енергія при прокатці сталі на широкоштабових станах гарячої прокатки (ШСГП) витрачається, по перше, на нагрів, і по друге, на деформацію металу. Витрати на нагрів слябів складають 55...60% всіх енерговитрат на ШСГП. Зауважимо, що на дрібно сортних станах для нагріву заготовок перед прокаткою витрачається 70...90% енергії. Сумарна витрата енергії залежить від компонування чорнових і чистових груп клітей конкретного стану і може бути мінімізована при виборі оптимальних температур нагрівання слябів, заготовок і режимів прокатки.

Енергія в виробництві листів і штаб істотно економиться при прямій подачі слябів на ШСГП, минаючи нагрівальні печі. Виробничий досвід свідчить, що при організації гарячого посаду безперервно литих слябів в нагрівальні печі при температурі 300°C витрата палива на їх нагрівання скорочується приблизно на 10...12%. Якщо температура слябів при їх посаді в піч становить 900°C і більше, то економиться до 60% палива. Вважається, що зниження температури нагріву слябів перед прокаткою на ~ 10°C дозволяє зменшити витрати палива на 2%.

Можливості зниження температури нагріву слябів в печах або здійснення «транзитної» прокатки зростають при реалізації заходів щодо зменшення втрат тепла розкатами при їх руху на лінії ШСГП. Серед таких заходів можна назвати, по перше, оснащення ШСГП перемотувальним пристроєм («койлбоксом») на проміжному рольгангу. По друге, застосування теплозберігаючих пристроїв, які екранують поверхню розкатів від взаємодії з навколишнім середовищем або підігрівають охолоджені ділянки (кромки штабів). Можна очікувати що процес вдосконалення теплозберігаючих установок і систем триватиме і далі по шляху підвищення їх ефективності в частині теплозбереження та надійності роботи в умовах інтенсивної експлуатації. Наука тут має широкі поля для пошуку. При реконструкції і модернізації ШСГП, що діють зокрема, на комбінатах ПАТ «Запоріжсталь» і ПрАТ «ММК імені Ілліча» основна увага приділяється пошуку таких рішень (перш за все, компоновки і модернізації клітей чорнових груп станів), які забезпечують з одного боку, мінімальні витрати енергії на нагрів і прокатку штаби, а з іншого необхідні для отримання необхідних структур і властивостей гарячекатаної сталі, температури кінця прокатки і змотування штаб.

Пропоновані лабораторні і практичні роботи ставлять за мету поглиблення знань за курсом «Нагрів і нагрівальне обладнання в обробці металів тиском», надбання практичних навичок за технологією нагріву. Ці роботи, що охоплюють майже всі основні розділи курсу, слід розглядати лише як зразкові.

Нагрівання металу для обробки тиском проводиться головним чином з метою підвищення його пластичності і зменшення опору деформуванню. Нагрівання є однією з найважливіших операцій обробки металів тиском, від якого у великому ступені залежить точність розмірів виробів, якість, правильне використання устаткування, інструмента та ін. Нагрівання повинне забезпечити рівномірну температуру по перетину заготівлі, її мінімальне окислювання й знеуглецьовуються. Практикою встановлено, що інтенсифікація нагрівання знижує окалино-утворювання, за рахунок чого підвищується точність виробів і зростає стійкість інструмента (прокатних валків, бойків, штампів і т.п.). Можна затверджувати, що в даний час культура цехів гарячої обробки тиском у великій мірі визначається способом нагрівання, що застосовується. Сучасні прогресивні способи нагрівання докорінно змінюють вигляд гарячих цехів, наближаючи умови праці в них до умов роботи в механічних цехах. Таким чином, вибір правильного способу і режиму нагрівання металу представляє велику і важливу технічну задачу.

Контрольні питання

1. Основні вимоги до якості вихідної заготовки.
2. Основні вимоги до якості готової продукції.
3. Призначення нагріву металу перед обробкою тиском.
4. Теплота горіння палива.
5. Прохідні печі прокатного виробництва.

Література до розділу 1: [1, 3, 5, 6]

2 НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ

2.1. Технологія нагрівання металу

Способи нагрівання металу

Спосіб нагрівання визначається характером передачі тепла металові. Якщо тепло передається металові за рахунок зіткнення його поверхні з яким-небудь середовищем (газоподібної, рідкої або твердої), нагрітої до більш високої температури, то такий спосіб нагрівання є *непрямим*.

Якщо тепло акумулюється безпосередньо в самому металі (у поверхневому шарі або у всьому перетині), а температура навколишнього середовища залишається нижче температури металу, то такий спосіб нагрівання називається *прямим*. Наприклад, нагрів металу в печах, розплавлених солях, а також в електроліті є непрямим нагріванням; нагрів металу, що відбувається при пропущенні через нього електричного струму (контактний, індукційний), є *прямим* нагріванням.

Таким чином, усе різноманіття способів нагрівання може бути зведено тільки до двох різновидів, що відрізняється по своїй фізичній істоті. Передача тепла металу при непрямому нагріванні відбувається за рахунок конвекції і випромінювання. Кількість тепла, передана металові випромінюванням, у звичайних печах складає близько 20% усього тепла, у печах швидкісного нагрівання - близько 80%. Поширення тепла в металі від його поверхні усередину відбувається за рахунок теплопровідності.

Кількість тепла, що акумулює в металі при прямому нагріванні - електричним струмом, може бути визначене за законом Джоуля – Ленца

$$Q = 0,24I^2 Rt, \quad (2.1)$$

де Q - кількість тепла;

I - сила струму, що протікає по металу за даних умов нагрівання;

R - електричний опір металу;

t - час протікання струму.

Швидкість і час нагрівання

Продуктивність нагрівального пристрою залежить від швидкості нагрівання металу і за інших рівних умов зростає зі збільшенням швидкості нагрівання. Однак для якості металу небайдуже, з якою швидкістю робити нагрівання. При повільному нагріванні крім зниження продуктивності може виникнути брак металу через знеуглецьовуються, окислювання. При швидкому нагріванні через надмірно велику різницю температури між поверхнею і серединою заготівлі можуть з'явитися тріщини.

Таким чином, існує максимальна швидкість нагрівання, при якій буде забезпечена висока якість виробу при найменших витратах; цю швидкість

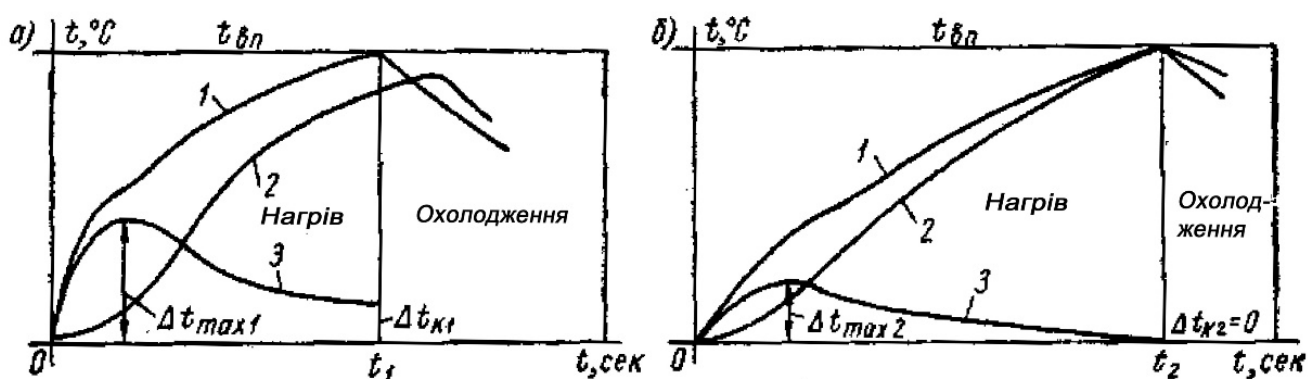
називають припустимою. Швидкість нагрівання може бути виражена величиною, що показує підвищення температури металу в одиницю часу (град/сек, град/хв), або часом нагрівання, що приходить на кожну одиницю товщини (хв/см, сек/см).

Швидкість нагрівання залежить від ряду факторів, головними з яких є: перепад температур по перетині заготівлі, форма і розмір поперечного перерізу заготівлі, теплофізичні властивості металу, спосіб нагрівання.

Для з'ясування впливу перепаду температур на швидкість нагрівання розглянемо графіки (рис. 2.1), що показують зміну температури поверхні і центра однієї і тієї ж заготівлі при нагріванні її до верхньої межі температурного інтервалу ($t_{г.н.}$) з різною швидкістю і наступним остиганням на повітрі.

З графіків видно, що процес нагрівання може бути розбитий на два періоди. Перший характеризується максимальним перепадом температур по перетину заготівлі Δt_{max} ; другий - кінцевим перепадом температур Δt_k , коли поверхня заготівлі досягла температури верхньої межі $t_{г.н.}$.

Перший період є найбільш небезпечним з погляду утворення тріщин, тому що в цей період виходить максимальний перепад температур між поверхнею і центром заготівлі Δt_{max} (рис. 2.1, а і б, крива 3). Перепад температур Δt_{max} викликає появу в заготівлі теплових напруж, що є наслідком різного теплового розширення зовнішніх і центральних шарів заготівлі. Поверхневі шари заготівлі, як більш нагріті, прагнуть розширитися, збільшитися в обсязі, чому перешкоджають внутрішні, більш холодні шари.



а – при наявності перепаду Δt_{k1} ; б – при відсутності перепаду $\Delta t_{k2} = 0$: 1 – температура поверхні; 2 – температура центра; 3 – різниця температур між поверхнею і центром; t – час нагрівання заготівлі

Рисунок 2.1 – Графіки нагрівання однієї і тієї ж заготівлі з різною швидкістю

У результаті цього в поверхневих шарах виникають стискаючі напруж, а у внутрішніх - що розтягують. Величина цих напруж тим більше, чим більше різниця температур і чим нижче загальна температура металу, при якій вони виникли, тобто чим менше час, протягом якого крива 3 досягла свого максимуму (рис. 2.1, а і б). Якщо в заготівлі, що нагрівається, малися залишкові внутрішні

напруження, то при швидкому нагріванні останні, що додається до теплового напруження, можуть перевищити міцність металу і викликати утворення в ній тріщин.

Крім зазначених напруг при нагріванні можуть виникати структурні напруги, що є результатом структурних перетворень, що супроводжуються зміною обсягу фаз. Однак ці напруги виникають при таких температурах, при яких метал має досить високу пластичність, і тому не представляють небезпеки.

Тому що різні метали і сплави мають різну пластичність і різні швидкості протікання процесу рекристалізації, то в кожному конкретному випадку деформування необхідно досвідчене визначення припустимого перепаду температур. Установлено, що при обробці тиском мало- і середньовуглецевих сталей перепад температур Δt_k в 100°C впливає на якість металу.

При нагріванні з великою швидкістю в інтервалі температур від 20° до $500-700^\circ\text{C}$, теплові напруги можуть привести до руйнування металу. Однак цю обставину варто враховувати тільки при нагріванні заготовок великих перетинів (зливків) з високовуглецевих і високолегованих сталей. Заготівлі невеликих перетинів (до $100-150$ мм у діаметрі) з будь-якої сталі можна нагрівати до $500-700^\circ\text{C}$ з будь-якою технічно можливою швидкістю.

Розмір поперечного перерізу позначається на величині теплових напруг, що тим більше, чим більше перетин. Отже, зі збільшенням поперечного перерізу заготівлі швидкість нагрівання повинна зменшуватися.

Основними характеристиками теплофізичних властивостей, що впливають на швидкість нагрівання металу є: теплопровідність, теплоємність, питома вага, електричний опір і магнітна проникність. Вплив теплоємності, теплопровідності і питомої ваги може бути враховано за рахунок *температуропровідності*, що характеризує швидкість поширення температури в металі.

Коефіцієнт температуропровідності визначається з виразу:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\gamma}, \quad (2.2)$$

де α – коефіцієнт температуропровідності в $\text{м}^2/\text{год}$;

λ – коефіцієнт теплопровідності в $\text{ккал}/\text{м}\cdot\text{год}\cdot\text{град}$ ($\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$);

c – питома теплоємність в $\text{ккал}/\text{кг}\cdot\text{град}$ ($\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{град}$);

γ – питома вага в $\text{кг}/\text{м}^3$ ($\text{н}/\text{м}^3$).

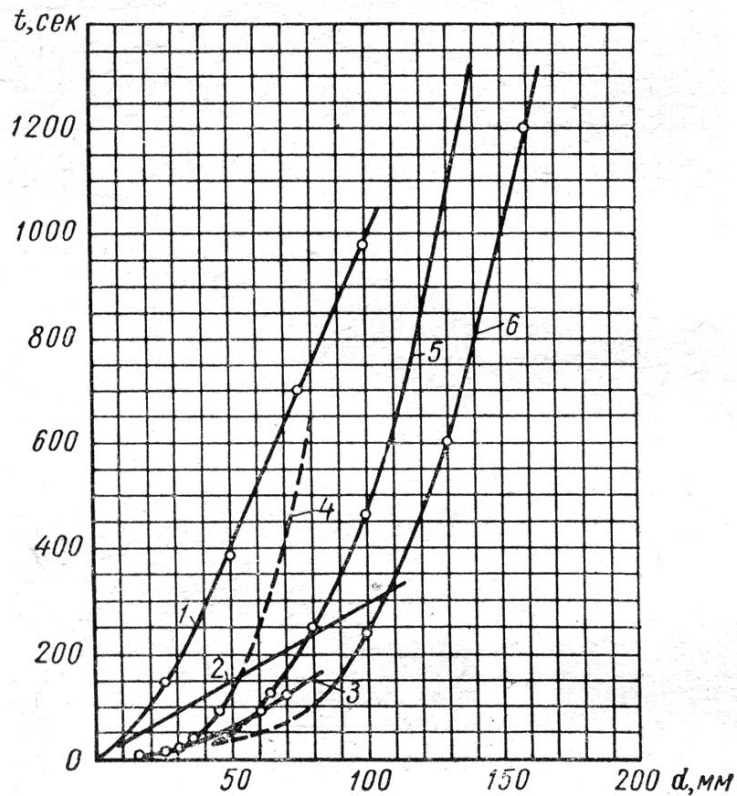


Рисунок 2.2 – Графік часу нагріву заготовок із вуглецевих сталей до температури 1200°C при різноманітних способах нагріву

При електричних способах нагрівання на поширення тепла в металі крім температуропровідності вплив на електроопір і магнітну проникність, тому що вони характеризують кількість заготівлею енергії, що поглинається, при протіканні по ній електричного струму.

Виходячи з поняття теплофізичних властивостей, неважко встановити, що їхній вплив позначається в остаточному підсумку на різниці температур у перетині заготівлі, що нагрівається. Очевидно, що чим більшої температуропровідністю володіє метал, тим за інших рівних умов перепад температур буде менше і метал буде швидше нагріватися. Також очевидно і те, що чим більшим електроопором володіє метал, тим більше виділиться в ньому тепла при протіканні по ньому електричного струму. Час нагрівання металу залежить від тих же факторів, що й швидкість. З графіків, приведених на рис. 2.2, а і б видно, що для однієї й тієї ж заготівлі час нагріву t тим менше, чим більше кінцевий перепад температур Δt_k , і при $\Delta t_{k1} > \Delta t_{k2}$ $t_1 < t_2$.












Розташування заготовель	α	Розташування заготовель	α
	1		1
	1		1,4
	2		4
	1,4		2,2
	1,3		2
			1,8

Рисунок 2.3 – Значення коефіцієнта α

На практиці для визначення часу нагрівання часто користуються досвідченими даними у виді різного роду таблиць і графіків. Як приклад на рис. 2.3 приведений графік для визначення часу нагрівання заготовок (до температури 1200°) з вуглецевих сталей при різних способах нагрівання.

Час нагрівання в печах заготовок і злитків більш великого перетину може бути визначене по емпіричній формулі:

$$\tau = k\alpha d\sqrt{d}, \quad (2.3)$$

де k - коефіцієнт, що враховує теплофізичні властивості металу, для низьковуглецевих і низьколегованих сталей рівний 10, для високовуглецевих і високолегованих сталей 20;

d - діаметр або сторона квадрата заготівлі в м;

α - коефіцієнт, що враховує розташування заготовок на поду печі; значення його приведені на рис. 2.3.

Час нагріву високовуглецевих і високолегованих сталей складається з обох періодів: від кімнатної 850° та від 850 до 1200°С; для першого періоду коефіцієнт k приймається 13,3, для другого – 6,7.

Перегрів і перевитрата

Нагрівання сталі до температури вище верхньої межі температурного інтервалу супроводжується інтенсивним зростанням зерна. Це явище називається *перегрівом*. Перегрів також може з'явитися в результаті тривалої витримки металу і при більш низькій температурі. Перегрів знижує механічні властивості сталі, особливо ударну в'язкість. У більшості випадків перегрів

можна виправити відпалюванням або нормалізацією, однак у випадках, коли зерна сталі втрачають здатність до рекристалізації, перегрів не виправимо.

При нагріванні до температури, що значно перевищує верхню межу вище температури перегріву, інтенсивне окислювання металу відбувається не тільки з поверхні, але і по границях зерен з частковим їх оплавленням; при цьому зв'язок між зернами порушується і метал при деформації руйнується. Це явище зветься перепаленням. Перепалення є непоправним видом браку. Теоретично в сталі зі змістом вуглецю 0,2% перепалення настає при температурі 1470°, а в сталі зі змістом вуглецю 1,1% - при 1180°C.

На рис. 2.4 зображена мікроструктура відпаленої (а), перегрітої (б) і перепаленої сталі (в), травленої трипроцентним розчином HNO_3 у спирті.

Окислювання та позбавлення вуглецю сталі

При високих температурах відбувається активна хімічна взаємодія сталі з навколишніми газами (пічними і повітрям), у результаті чого її поверхневі шари окислюються і знеуглецьовуються. Окислювання поверхні металу називається *угаром*. Окислений шар являє собою окалину, що утвориться в результаті дифузійного процесу окислювання заліза і домішок, що входять до складу сталі. Окалина складається з окислів заліза у виді з'єднань Fe_2O_3 , Fe_3O_4 і FeO , що розташовуються як би в трьох шарах. Окиснювачами сталі крім кисню є вуглекислий газ, сірчистий газ і водяна пара.

Активне утворення окалини при нагріванні сталі починається при температурі близько 700°C і зростає особливо швидко при температурах вище 900°C. На величину угару впливають: температура нагрівання, атмосфера робочого простору нагрівального пристрою, тривалість нагрівання, хімічний склад металу, а також форма і розміри заготовлі, що нагрівається.

Угар наносить величезні збитки виробництву, тому що крім безповоротних утрат металу окалина при деформації вдавлюється в поверхню металу, викликаючи необхідність збільшення припусків на механічну обробку.

Окалина, будучи досить твердою речовиною, подібним до наждаку, прискорює в 1,5 - 2 рази знос інструмента (штампів, бойків, прокатних валків та ін.), крім того, взаємодіючи з подом і футеровкою нагрівальних пристроїв, піддає їх руйнуванню.

Можна вважати, що приблизно близько 5% сталі, що виплавляється в нашій країні губиться на окалину при нагріванні в прокатних, ковальських і термічних цехах.

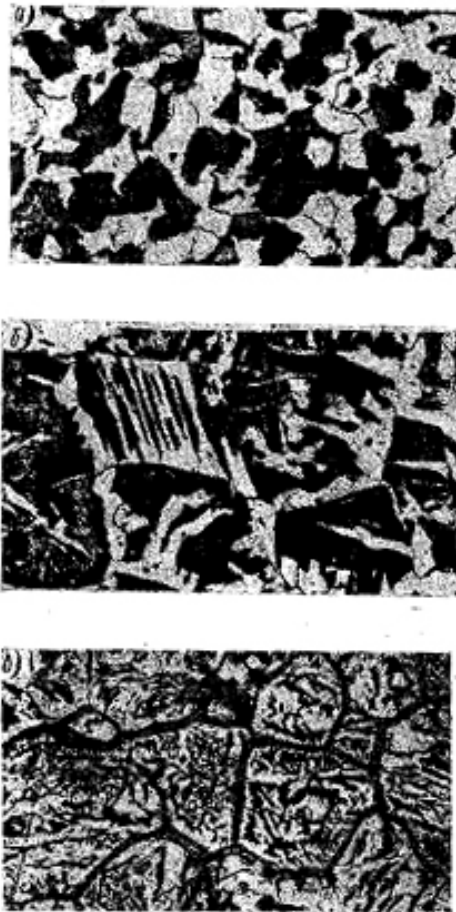


Рисунок 2.4 – Мікроструктура сталі 40×200

У зв'язку з заподіюваним угаром збитком необхідно приймати заходи для його зниження й усунення його впливу на інструмент. З цією метою застосовуються методи прискореного нагрівання, нагрівши металу в покриттях, нагрів у нейтральній, відновній, або захисній атмосфері. Однак повний захист металу в процесі нагрівання здійснити не вдається, тому перед пластичною деформацією застосовуються різні способи видалення окалини: при прокатці - попереднє пропущення злитків між рифленими валками, що збивають окалину; при штампуванні - попереднє осаджування заготовок або гідроочищення, що полягає в короткочасній дії на заготівлю декількома струменями води під тиском 100-150 ат (10-15 Мн/м²).

Позбавлення вуглецю сталі, що поширюється - в окремих випадках на глибину до 1,5 - 2 мм, полягає у вигоранні вуглецю з її поверхневих шарів (за рахунок взаємодії його з киснем і воднем).

Принципово позбавлення вуглецю залежить від тих же факторів, що і угар, тому заходи, що знижують угар, одночасно зменшують позбавлення вуглецю.

2.2. Нагрівальні пристрої

Нагрівальні пристрої можуть бути класифіковані:

- 1) по джерелу енергії на полум'яні печі й електричні установки;
- 2) по призначенню - на пристрої ковальські, прокатні і термічні;
- 3) за принципом дії - з періодичним завантаженням і з безперервним завантаженням (методичні). По перші заготівлі в процесі нагрівання залишаються нерухомими, завантаження і видача їх відбувається переважно через те ж усадочне вікно, по друге - заготівля в процесі нагрівання пересуваються від місця завантаження до місця видачі.

У свою чергу, полум'яні печі підрозділяються додатково:

- а) по роду застосовуваного палива - на печі, опалювальні твердим, рідким або газоподібним паливом;
- б) по способу використання тепла газів, що відходять - на печі рекуперативні і регенеративні.

Полум'яні печі

Для опалення печей застосовується тверде, пилоподібне, рідке і газоподібне паливо. Як тверде паливо використовують кам'яне вугілля, антрацит і кокс із теплотворною здатністю від 3500 до 7000 ккал/кг (14,6-29 МДж/кг). Тверде паливо спалюється на так званих колосникових ґратах, розташованих у топковій камері печі.

Пилоподібне паливо одержують шляхом розмелу різних видів вуглецю і спалюють його за допомогою пальників. Воно може бути використане з великим економічним ефектом (майже в два рази), ніж тверде паливо. Найбільше застосування для печей одержали рідке і газоподібне паливо.

Як рідке паливо застосовується мазут, теплотворна здатність якого складає 10000 ккал/кг (42 МДж/кг). Для спалювання мазуту застосовуються форсунки двох типів - високого (1 - 6 ат) і низького тиску (0,01 - 0,03 ат).

Як газоподібне паливо застосовуються природний газ і штучні гази, що є продуктами газифікації твердого палива або відходами металургійного виробництва. Калорійність природних газів коливається в середньому від 8000 до 10200 ккал/м³ (33,6 - 43 МДж/м³). До числа штучних газів відносяться генераторні, світильні, коксувальні і доменний (колошниковий) гази. Найбільшу калорійність має світильний газ - 4700 ккал/м³ (19,7 МДж/м), найменшу - доменний - 950 ккал/м³ (4 МДж/м). Спалювання газоподібного палива здійснюється за допомогою пальників низького й високого тиску.

Основними показниками, що характеризують ефективність роботи печей є: напруженість поду, к. к. д. і питома витрата палива. Напруженість поду визначає продуктивність печі і виражається відношенням кількості нагрітого до заданої температури металу протягом однієї години на одному квадратному метрі поду

$$H = \frac{G}{F_n}, \quad (2.3)$$

де H - напруженість поду в $\text{кг/м}^2 \cdot \text{год}$;

G - продуктивність печі в кг/год ;

F_n - площа поду в м^2 .

Коефіцієнт корисної дії печі і представляє відношення кількості тепла, витраченого на нагрівання металу, до кількості тепла, яке внесене в піч паливом, підігрітим повітрям і екзотермічною реакцією при угарі металу

$$\eta = \frac{Q}{Q_n} \cdot 100 \%, \quad (2.4)$$

де η – к. к. д. печі в %;

Q – паливо, використане на нагрів металу, в ккал (Дж);

Q_n – паливо, внесене до печі, в ккал (Дж).

Питома витрата палива виражається відношенням кількості використаного палива до ваги нагрітого металу.

Полум'яні печі періодичної дії

У ці печі метал завантажується періодично, окремими партіями (садками). Після того як завантажена партія заготовок нагріється до необхідної температури, їх послідовно виймають з печі і піддають деформації. Як тільки вся партія заготовок оброблена, у піч завантажують наступну і т. п.

До печей періодичної дії відносяться камерні печі, нагрівальні колодязі, щілинні й очкові печі.

Камерні печі підрозділяються на печі з нерухомим і висувним подом, а також на печі з використанням і без використання тепла димових газів, що ідуть. На рис. 2.5 зображена схема найпростішої печі, що широко застосовується в ковальсько-штампувальних цехах. Печі складається з металевого каркаса 2, який викладений усередині вогнетривкою цеглою - шамотом. Стіни 3, подина і стеля 4 утворюють робочий простір печі 5. У бічній стінці розташоване вікно 7 для завантаження і розвантаження печі; воно закривається масивною чавунною заслінкою 9, підвішеної до противаги 10 за допомогою троса, перекинутого через блок 6. Спалювання палива в печі здійснюється за допомогою пальників або форсунок 11. Розпечені гази, що віддали своє тепло металові, поміщеному на під, ідуть через канал 8 в атмосферу.

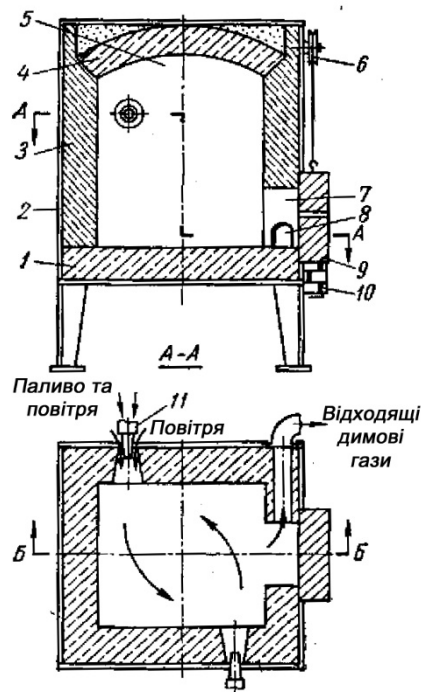


Рисунок 2.5 – Схема конструкції камерної печі

Такі печі будуються з розміром поду від 1 до 6-8 м^2 і більш. Напруженість поду зазначених печей складає 300-400 $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$. Ці печі призначені для нагрівання порівняно невеликих заготовок або злитків. К. к. д. камерних печей без використання тепла газів, що ідуть, 10-15%; питома витрата палива в перерахуванні на умовне складає 0,11-0,3 $\text{кг}/\text{кг}$.

Причиною низького к. к. д. камерних печей описаного типу є великі втрати тепла. Якщо вважати усе фізичне тепло, внесене в піч паливом при його спалюванні, за 100%, то його витрата (в %) розподілиться по наступних статтях.

Корисна витрата тепла на нагрівання металу.....	10-15
Втрати на неповноту згоряння палива	1,5-2
Втрати тепла через щілини і вікна.....	10-15
Втрати тепла на випромінювання кладкою в атмосферу	25
Втрати тепла з газами, що відходять.....	45-50

Але незважаючи на низький к. к. д. камерні печі мають широке застосування в ковальсько-штампувальному виробництві, тому що вони прості по конструкції, легко можуть бути демонтовані і не вимагають високої кваліфікації від обслуговуючого персоналу.

Тепло газів, що відходять, може бути використане для підігріву палива і повітря, необхідного для горіння. Воно використовується в пристроях, називаних *рекуператорами* і *регенераторами* (перші - безперервної дії, другі - періодичного).

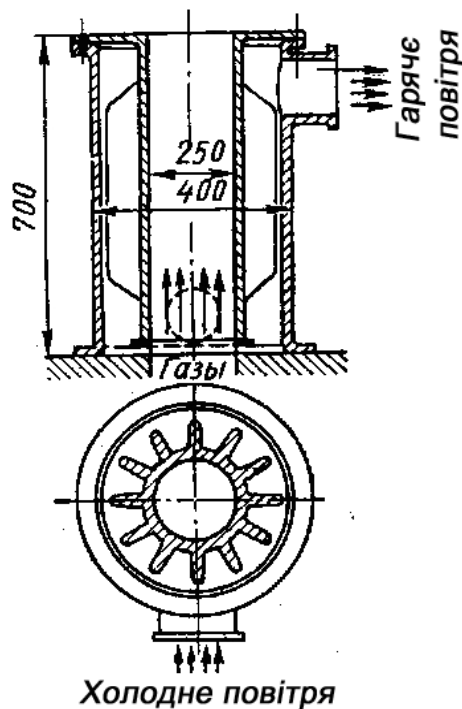


Рисунок 2.6 – Конструкція металічного рекуператора

У рекуператорах холодне повітря пропускається по трубах, які зовні омиваються газами, що відходять. Рекуператори в залежності від температури підігріву повітря бувають металеві (сталеві, чавунні) і керамічні. Найбільше поширення одержали металеві рекуператори (через менші габарити і гарну герметичність), у яких повітря підігрівається до 200-300°C. На рис.2.5 зображений металевий рекуператор однієї з конструкцій, що встановлюється на невеликі камерні печі.

Регенератори являють собою камери, викладені вогнетривкою ґратчастою цеглою. Піч повинна мати два регенератори, що працюють поперемінно; один з регенераторів нагрівається газами, що ідуть, а другий у цей час віддає тепло минаючий через нього холодному повітрю або газів. У регенераторі повітря підігрівається до температури 600-900°C. Регенераторами обладнаються, звичайно, великі печі. К. к. д. печей, обладнаних рекуператорами або регенераторами, підвищується на 10-15%.

Печі з висувним подом являють собою великі камерні печі, обладнані регенераторами. Подом печі є платформа, футерована вогнетривкою цеглою, що переміщається на роликах або на ковзанках. Така конструкція поду дозволяє завантажувати в піч досить великі зливки або заготівлі, вага яких досягає десятків і навіть сотень тон.

Подина висувається за допомогою мостового крана або лебідки. На рис. 2.7 зображена схема поперечного розрізу печі з висувним подом. На подину завантажують краном злиток 2, після чого його заковчують у піч. Уздовж причілків печі розташовані пальники або форсунки. Повітря, нагрітий у лівому регенераторі 7, надходить до пальників 3 по обидва боки печі по одній парі

каналів 4. Гарячі гази омивають злиток 2 і по іншій парі каналів 4, розташованих по обидва боки печі, надходять у правий регенератор 7, нагрівають його і йдуть у димохід 8. Коли правий регенератор нагріється (через 20-30 хв), а лівий остудиться, здійснюється перекидання клапанів із тим, щоб правий регенератор працював на нагрівання повітря, а лівий нагрівався газами, що відходять. За допомогою шиберів 6 регулюють кількість поданого до пальників повітря. Для запобігання металевих частин платформи від гарячих газів печі поставлена пісковий затвор 5. Зазначені печі працюють з напруженістю поду, 300-350 кг/м²·год і мають к. к. д. 20-25%. Звичайно печі з висувним подом встановлюються в цехах вільного кування, обладнаних гідравлічними пресами, а також у термічних цехах.

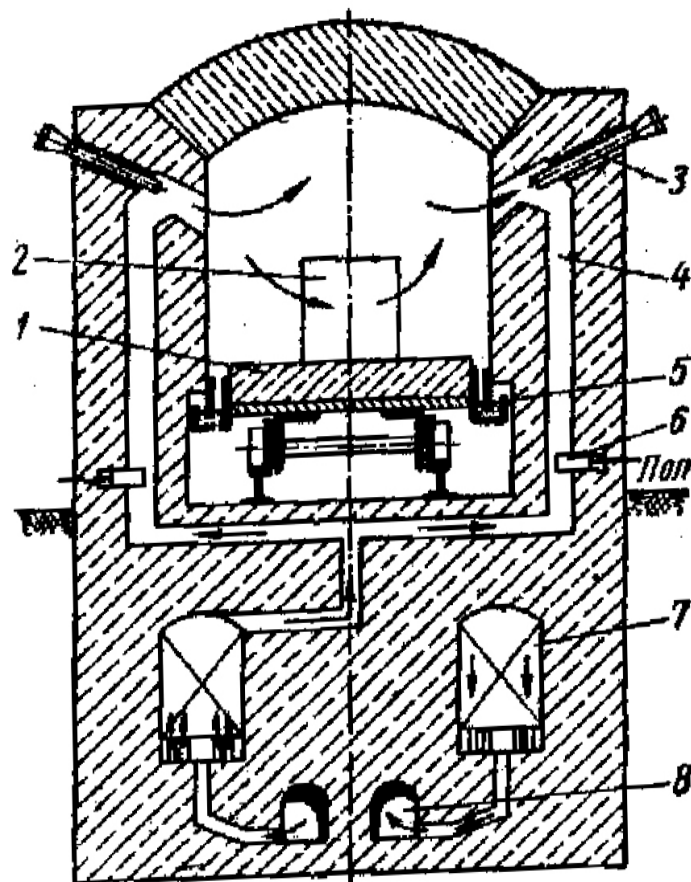


Рисунок 2.7 – Схема поперечного перерізу печі з рухливим подом

Нагрівальні колодязі являють собою шахтні печі, обладнані регенераторами або рекуператорами. Зводом нагрівальних колодязів є кришка, що для завантаження або розвантаження колодязя зрушується убік за допомогою спеціального механізму. Колодязі призначені для нагрівання і підігріву злитків, що мають напіврідку серцевину. У робочий простір колодязів злитки містяться у вертикальному положенні, що забезпечує більш рівномірний їх нагрів і виключає зсув усадочної раковини. Колодязі опалюються найчастіше газами. Як правило колодязі застосовуються в прокатних цехах.

Щілинні й очкові печі, призначені для нагрівання кінців прутків або труб, являють собою порівняно невеликі печі, що застосовуються в штампувальних цехах. У цих печах завантажувальним вікнам надають форму щілин або ряду окремих отворів.

Полум'яні печі безперервної дії.

До печей безперервної дії відносяться методичні печі, у яких заготівля в процесі нагрівання пересувається від місця завантаження до місця видачі.

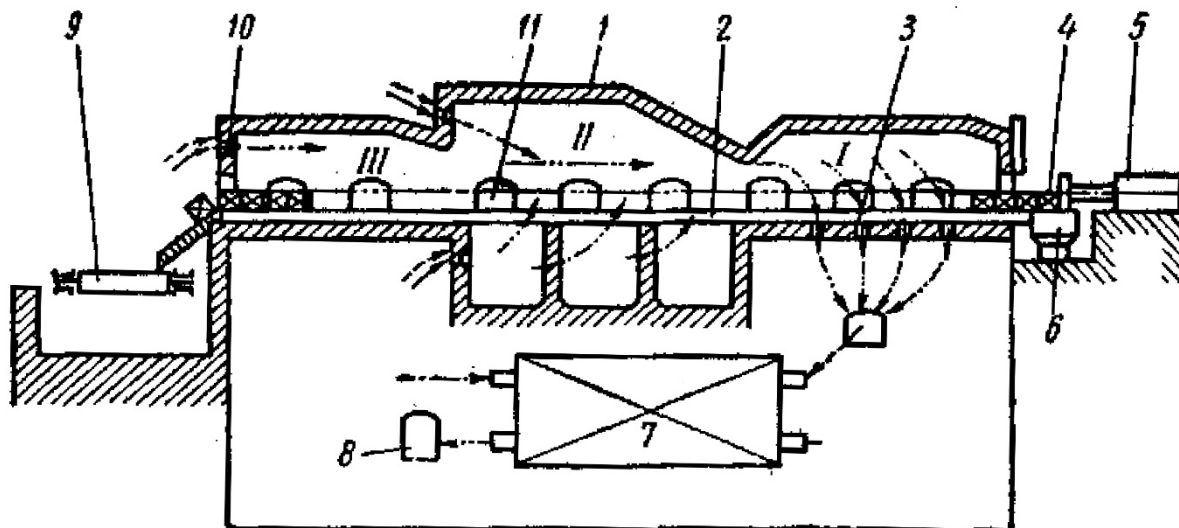


Рисунок 2.8 – Схематичний розріз методичної печі з трьома зонами

Методичні печі мають досить довгий робочий простір (до 30 м і більш), який може складатися з декількох зон із різною температурою. На рис. 2.8 зображений схематичний розріз (зони I, II, III) методичної печі з рекуператором. Піч має фігурну стелю 1, що відокремлює зони друг від друга. Заготівлі 4, подані на завантажувальну площадку 6, проштовхуються в піч за допомогою штовхальника 5. Штовхальники можуть діяти від гідравлічного або механічного приводу. Для зменшення зусилля проштовхування заготівлі переміщуються по сталевих трубах 2, охолоджуваним водою.

Перша зона печі є підігрівальною і має температуру 600-800°C; друга - зона максимального нагрівання (зона зварювальних температур) - має температуру 1250-1350°C (нагрівання заготівлі у цій зоні здійснюється з двох сторін - зверху і знизу); третя зона є зоною витримки, у якій відбувається вирівнювання температури по перетині заготівлі. Температура в третій зоні звичайно на 50-100° вище верхньої межі температурного інтервалу для даного металу.

Піч опалюється пальниками або форсунками 10. Гарячі гази рухаються на зустріч заготовкам, омивають їх і через канали 3 у поді першої зони ідуть у рекуператор 7, а відтіля в димохід 8. Для спостереження за нагріванням і правильністю розташування заготовок на поду в бічних стінках печі мають вікна 11. Піч починає віддавати нагрітий метал з того моменту, коли заготівлі

розташуються впритул один до одного по всій довжині поду. При переміщенні холодної заготівлі в піч просуваються всі попередні, і нагріта заготівля попадає на рольганг 9, що подає неї до штампувального або прокатного агрегату.

Печі зазначеної конструкції в основному застосовуються в прокатних і ковальських цехах для нагрівання великих (товщиною більш 200-250 мм) злитків і заготовок. Напруженість поду цих печей досягає $800-1000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$, к. к. д. складає 30-40%, а питома витрата палива майже в два рази менше, ніж у камерних печах. Методичні печі з двох зон часто застосовуються в ковальсько-штампувальних цехах для нагрівання дрібних і середніх заготовок і невеликих злитків.

Швидкісне нагрівання

Основними особливостями швидкісного нагрівання є: підвищення температури робочого простору до $1400-1500^\circ\text{C}$ і забезпечення всебічного обігріву заготовок. Швидкість нагрівання при цьому способі підвищується не тільки за рахунок збільшення перепаду температур, але і за рахунок підвищення швидкості руху газів, що омивають заготівлю, що нагріваються. У газових печах швидкісного нагрівання тепло, передане металові випромінюванням, складає 80%, а тепло, передане конвекцією, усього лише 20%.

При швидкісному нагріванні досягається зменшення витрати палива, угару металу і збільшення продуктивності за рахунок скорочення часу нагрівання (див. рис. 2.2).

Швидкісне нагрівання здійснюється в механізованих і автоматизованих печах, опалювальних висококалорійним газом або мазутом. *Печі швидкісного нагрівання* застосовуються двох типів: камерні - для нагрівання коротких заготовок і прохідні - для довгих прутків і труб.

На рис. 2.9 зображена газова піч для швидкісного нагрівання коротких заготовок круглого перетину. Заготівлі в цій печі перекочуються по двом направляючим 2, привареним до труб 1, охолоджуваним водою. У верхній частині робочого простору розташовані пальники 3. Для підігріву повітря піч обладнана рекуператором 5. Продукти горіння надходять у рекуператор по каналах 4 і 6; для зниження їхньої температури передбачені вікна 7, через які засмоктується повітря. У рекуператор повітря подається по каналі 8, розташованому над зводом печі; цим досягається охолодження зводу, що збільшує термін його служби, а також частковий підігрів повітря.

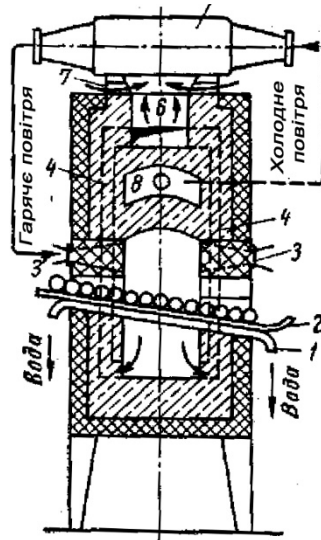


Рисунок 2.9 – Схема конструкції пересувної печі з рекуператором для швидкісного газового нагріву

Печі розглянутого типу застосовуються в ковальсько-штампувальному виробництві для нагрівання порівняно тонких заготовок діаметром до 70-100 мм. У трубопрокатних цехах швидкісне нагрівання застосовують для заготовок діаметром до 200 мм. Печі швидкісного нагрівання є більш економічними, ніж печі звичайного нагрівання. Продуктивність печей швидкісного нагрівання досягає 2000 кг/год, а їх к. к. д. складає 40-45%. Угар металу при швидкісному нагріванні не перевищує 1,5% від ваги заготівлі.

Безокисне нагрівання

Зі способів, що застосовуються, безокисного нагрівання практичний інтерес представляють наступні:

1) нагрів в розплавлених солях; 2) нагрів з утворенням захисних покриттів на поверхні заготівлі, що нагрівається; 3) нагрів в муфельних печах із захисною атмосферою; 4) нагрів в камерних печах відкритого полум'я.

Нагрівання заготовок може здійснюватися у ванні з розплавленими солями хлористого барію і натрію (приблизно 70% $BaCl$ + 30% $NaCl$). Цей метод застосовуємо для нагрівання дрібних заготовок під кування і штампування. Тривалість нагрівання в два-три разів менше, ніж при нагріванні таких же заготовок у камерній печі.

На поверхню заготівлі, що нагрівається, тим або іншим способом наноситься плівка, що охороняє її від окислювання. Наприклад, заготівлю можна нагріти в атмосфері оксиду літію або в розплавленому склі. При першому способі грубні гази насичуються невеликою кількістю пару оксиду літію, що омиває метал, відновлюють окис заліза на його поверхні. У результаті поверхня металу покривається найтоншим шаром оксиду літію, що охороняє його від окислювання, як при подальшому нагріванні, так і при наступній деформації. Плівка оксиду літію одночасно служить гарним змащенням при деформуванні металу. При

іншому способі заготівлі містяться в рекуперативну обертову горизонтальну піч, у якій знаходиться розплавлене скло. Заготівлі, перекочуючи в робочому просторі, покриваються тонким шаром скла, що охороняє них від окислювання.

Для збереження заготівлі від окислювання в муфельній печі її заповнюють захисним газом, що складається з CO і H_2 . Зміст CO в захисному газі досягає 30%, а H_2 - 15%. Муфельні печі з захисною атмосферою застосовуються для нагрівання дрібних заготовок при точному штампуванні.

Одним з найбільш прогресивних методів безокисного нагрівання під кування і штампування є нагрівання в камерних печах відкритого типу. У цих печах нагрівши металу відбувається в атмосфері не цілком згорілого газу. Згоряння газоподібного палива в цих печах відбувається в дві стадії. У камері нагрівання металу газ спалюється з коефіцієнтом надлишку повітря 0,4- 0,55, завдяки чому в цій камері досягається таке співвідношення між окисними і відбудовними складовими продуктів горіння, що практично виключає можливість окислювання металу. Продукти неповного окиснення догорають в іншій камері і тепло, що при цьому виділяється, витрачається на підігрів повітря в рекуператорі до 800-1000°C, без чого неможливо одержати необхідну температуру (1250-1350°C) у камері нагрівання. При цьому способі нагрівання величина угару складає приблизно 0,25-0,30%.

Механізовані печі

У цих печах основні трудомісткі операції - завантаження заготівлі у піч, переміщення і видача їх з печі - механізовані. У механізованих печах заготівлі переміщуються різними способами: перекочуванням циліндричних заготовок по похилому поду, за допомогою штовхальників, балок що крокують, роликового й обертового поду і т. п. До механізованих печей відносяться карусельні, конвеєрні, печі з крокуючими балками і т. п.

Печі з крокуючими балками застосовують для нагрівання листового, смугового і сортового матеріалу; *печі з роликовим подом* - для нагрівання листового і смугового матеріалу під штампування, гнуття й інші операції; *конвеєрні печі* - для нагрівання кінців заготовок для висадження на горизонтально-кувальних машинах і ін.

Останнім часом велике значення починають одержувати *карусельні печі*, що дозволяють легко забезпечити режим нагрівання, що вимагається, заготовок будь-якої форми. Карусельні печі в порівнянні з методичними займають меншу площу і забезпечують більш рівномірне нагрівання, тому що заготівлі на поду цих печей розташовуються не впритул.

Карусельні печі бувають двох різновидів: з кільцевим подом і тарілчастим; перші по характеру нагрівання заготівлі подібні з методичними печами, а другі - з камерними. І в тих, і в інших карусельних печах під із заготовками одержує обертання, швидкість якого може регулюватися. Заготівля нагрівається до відповідної температури за час одного обороту поду.

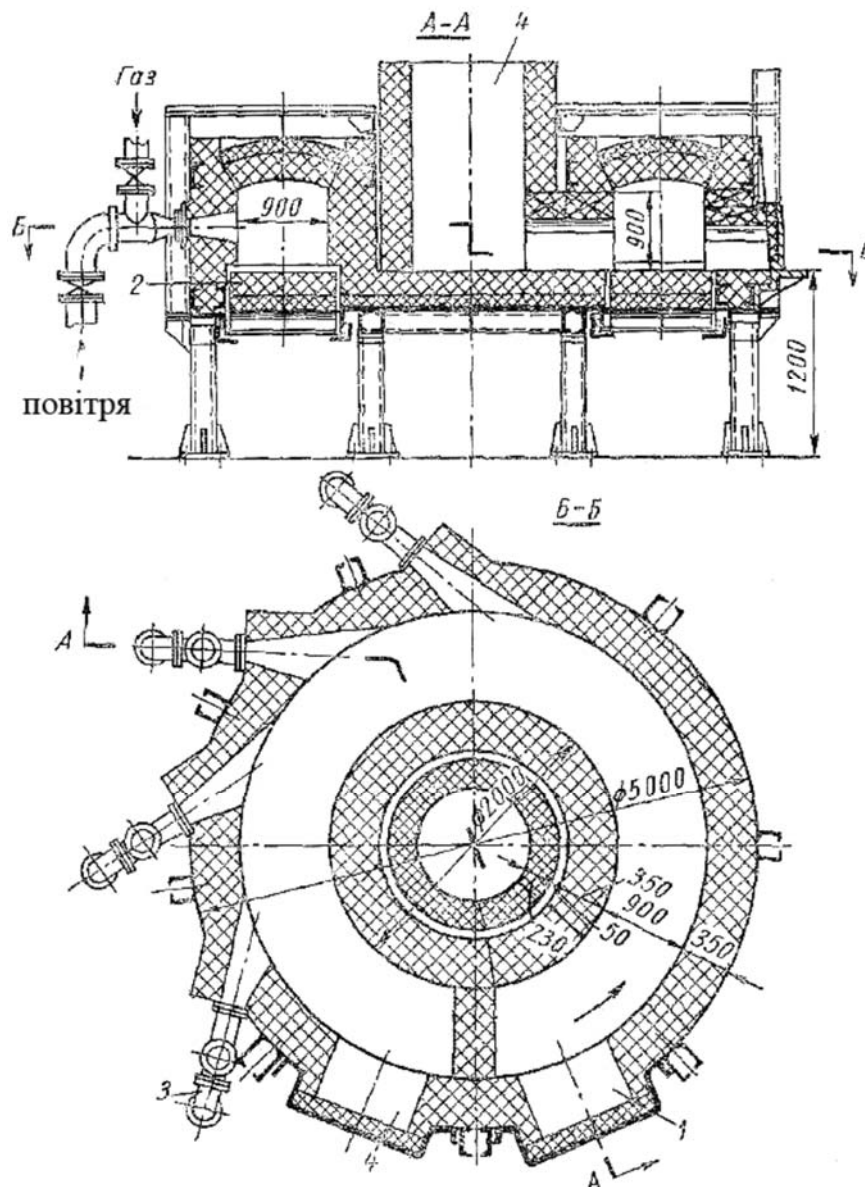


Рисунок 2.10 – Схема конструкції карусельної печі з кільцевим подом

На рис. 2.10 зображений розріз карусельної печі з кільцевим подом. Заготівлі з завантажувальної площадки містяться на кільцеву подину 2, що обертається назустріч рухові гарячих газів. Форсунки (або пальники) 3 розташовуються в стіні таким чином, щоб забезпечити поступове і швидке нагрівання заготівлі. Нагріта заготівля з розвантажувальної площадки 4 подається до штампувального агрегату або прокатного стану.

Показники роботи карусельних печей з кільцевим подом близькі до показників методичних печей. Карусельні печі будуються з діаметром поду від 1 до 30 м. Малі печі з діаметром поду до 10 м застосовуються в ковальсько-штампувальних цехах, а великі - у прокатних.

Печі опору. Печі опору конструктивно виконуються так само, як і полум'яні печі, з тією лише різницею, що замість форсунок або пальників у стінах монтуються металеві або карборундові елементи опору, що підключаються до силової мережі. Опору, нагріваючи, випромінюють тепло, що і передається металеві, що поміщається на під печі. Печі з карборундовими опорами забезпечують нагрівання металу до 1200-1250°C, а печі з металевими опорами - до 900-950°C.

Для нагрівання сталей застосовуються печі з карборундовими опорами, що будуються з розмірами поду до 1 м², потужністю до 50 кВт. Продуктивність цих печей складає 130 кг/год, а питома витрата електроенергії 600 кВт·год/т і більш.

Великою перевагою електropечей опору є можливість точного регулювання температури робочого простору. Печі з карборундовими опорами застосовуються в ковальсько-штампувальних цехах.

Індукційне нагрівання. В основі індукційного нагрівання лежить явище електромагнітної індукції, сутність якого полягає в тому, що при внесенні провідника в перемінне електромагнітне поле в ньому виникає електрорушійна сила (е. д. с). Провідник, що представляє собою опір току, що протікає по ньому, нагрівається за рахунок джоулевого тепла. Для створення могутнього перемінного магнітного поля застосовуються багатовиткові соленоїди (індуктори), виконані з мідної трубки квадратного або прямокутного перетину, охолоджувані проточною водою. Усередину такого індуктора міститься заготівля, що нагрівається. Джерелом перемінного струму може бути або промислова мережа (50 Гц), або перетворювач частоти (машинний або ламповий генератор).

Принципова електрична схема індукційного нагрівання зображена на рис. 2.11.

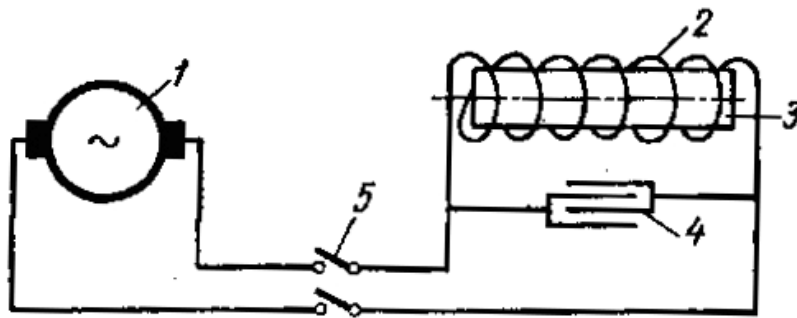


Рисунок 2.11 – Принципова електрична схема індукційного нагріву

Перемінний струм від перетворювача 1 по кабелі подається до індуктора 2, усередині якого знаходиться заготівля, що нагрівається, 3. Паралельно котушці індуктора підключається батарея конденсаторів 4, що, будучи нагромаджувачем електростатичної енергії, підвищує низький коефіцієнт потужності індуктора. Для включення і вимикання нагрівання служить пристрій 5 у виді контактора.

При протіканні перемінного струму по провіднику спостерігається так називаний *поверхневий ефект* (скін-ефект), який полягає в тому, що струм розподіляється в перетині провідника нерівномірно: у поверхневому шарі останнього він більше, а в центрі - менше. З деяким наближенням, достатнім для практичних розрахунків, можна вважати, що перемінний струм протікає по провіднику тільки в поверхневому шарі товщиною Δ . Цей шар Δ прийнятий називати глибиною проникнення, величина якої може бути підрахована по формулі

$$\Delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}, \quad (2.5)$$

де ρ - питомий електроопір провідника в Ом·см;

μ - відносна магнітна проникність матеріалу провідника – величина без розміру, яка показує в скільки раз магнітна проникність провідника більше проникності вакууму;

f – частота струму в Гц.

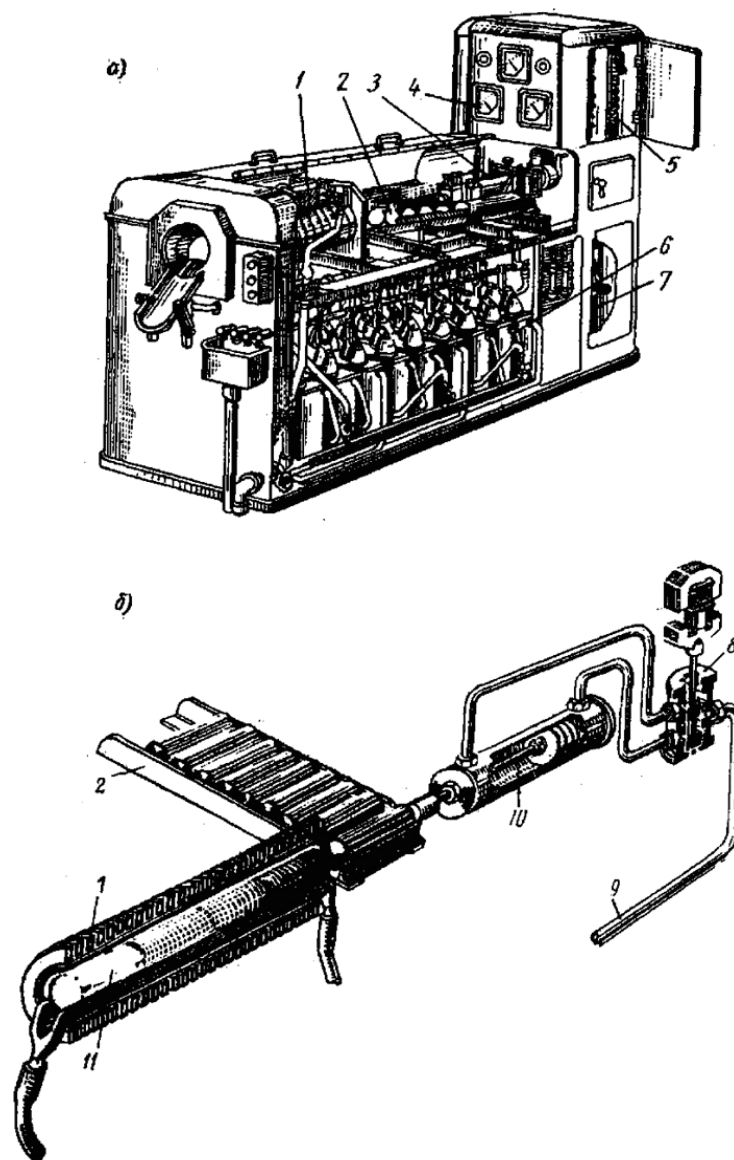
З формули (2.5) можна зрозуміти, що зі збільшенням питомого електроопору і зменшенням частоти струму глибина проникнення зростає. У феромагнітних матеріалів відносна магнітна проникність при температурі крапки Кюрі (770°C) падає до 1 і глибина проникнення різко зростає (у 20-30 разів).

Швидкість нагрівання, а також к. к. д. системи заготівля - індуктор залежать від співвідношення діаметра заготівлі d і глибини шару Δ . Практикою встановлено, що при нагріванні більшості металів, повинно дотримуватися нерівність

$$3 < \frac{d}{\Delta_z} < 6. \quad (2.6)$$

При нагріванні феромагнітних матеріалів Δ_z підраховується для температури крапки Кюрі при $\mu = 1$ і при відповідній даній температурі ρ . При нагріванні парамагнітних матеріалів, у яких $\mu=1$, Δ_r визначається, виходячи із середнього значення ρ , в інтервалі температур нагрівання від кімнатної до максимальної. Якщо дотримується нерівність (2.6), то к. к. д. системи заготівля - індуктор складає не менш 50%. Час нагрівання заготівлі з вуглецевих сталей може бути визначена з графіків, приведених на рис. 2.2.

Індукційні нагрівачі, що застосовуються в промисловості, підрозділяються на періодичні і методичні. Сутність роботи тих і інших аналогічна роботі камерних і методичних печей. Найбільше часто застосовуються нагрівачі методичної дії.



1 – індуктора, 2 – завантажувального лотка, 3 – пневматичного штовхальника, 4 – вимірник приладів для спостереження за режимом нагрівання, 5 – апаратури автоматичного керування подачею заготівлі в індуктор, 6 – конденсаторною батареєю і 7 – контактора, що включає і виключає нагрівання; 11 – реле часу через визначені інтервали, що відповідають необхідному темпу подачі заготівлі, 8 – включає електропневматичний золотник, і стиснуте повітря з трубопроводу 9 подається в циліндр 10 пневматичного штовхальника

Рисунок 2.12 – а) загальний вид методичного індукційного нагрівача для мірних заготовок; б) кінематична схема нагрівача

При переміщенні поршня штовхальника заготівля, що лежить на лотку 2, надходить в індуктор 1. При завантаженні в індуктор холодної заготівлі лежача з протилежної сторони індуктора нагріта до кувальної температури заготівля виштовхується на транспортер і доставляється до штампувального агрегату.

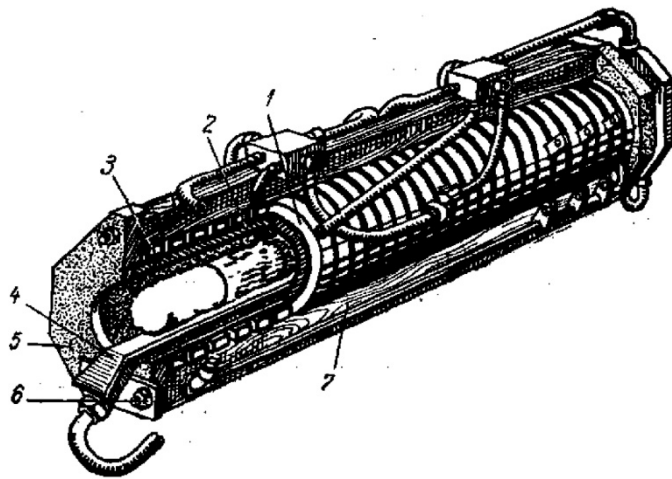


Рисунок 2.13 – Конструкція індуктора

Індуктор складається з багатовиткової спіралі 1, виконаної з мідної трубки прямокутного перетинів. Між витками її розташовуються картонні ізолюючі кільця. Спіраль індуктора стиснута асбоцементними щокми 5 за допомогою латунних шпильок 6. Для запобігання зсуву витків спіралі служать дерев'яні бруси 7. Всередині спіралі 1 знаходиться електрична 2 і тепла 3 ізоляція, що складається з гільз міканіту, азбесту і шамоту, у цілому представляє собою футеровку індуктора. Для збереження футеровки від руйнування при просуванні заготовлі уздовж індуктора розташовуються направляючі 4 з жаростійкої сталі, охолоджувані водою. Форма поперечного перерізу вікна спіралі індуктора виконується в залежності від форми поперечного перерізу заготовлі.

Внутрішній діаметр спіралі індуктора обирається з розуміннь досить високого к. к. д. системи заготівлі - індуктор по формулі

$$D = (1,5 \div 2) d. \quad (2.7)$$

Довжина спіралі індуктора повинна бути довше сумарної довжини заготовок, що нагріваються в ній, на один-два діаметрів заготівлі. Електричні і теплові розрахунки індукторів.

Середні енергетичні показники при індукційному нагріванні вуглецевих сталей наступні.

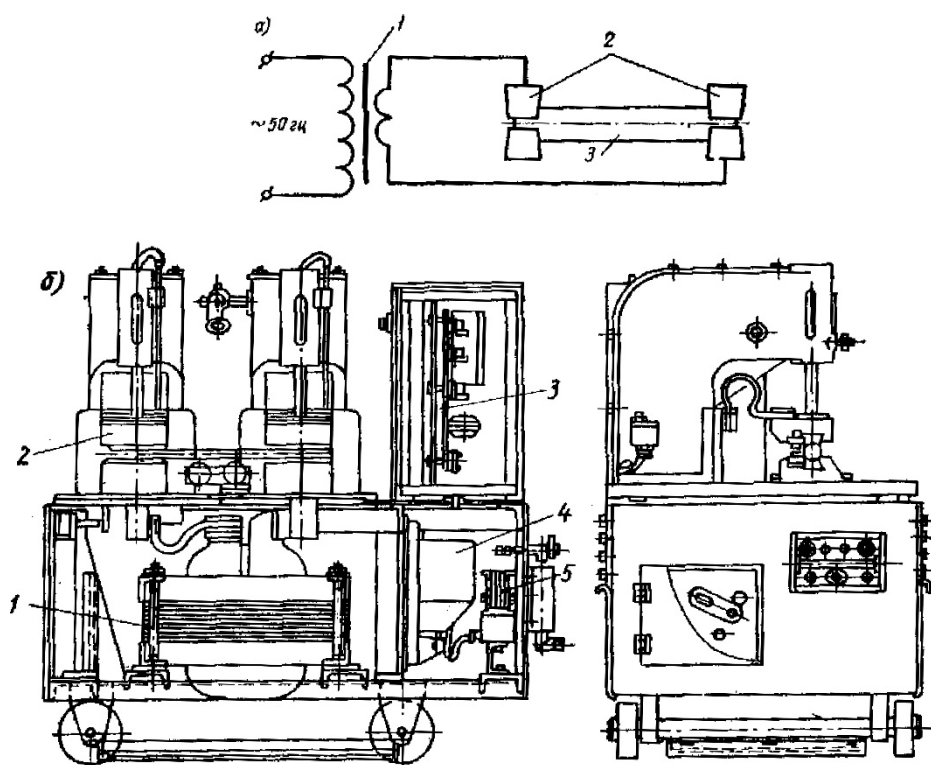
К. к. д. нагрівача в %	близько 60-65
питома витрата електроенергії по промисловій мережі в кВт·ч/кг	0,45-0,5
продуктивність нагрівача в кг/год	2000-3000

Індукційне нагрівання застосовується в даний час у ковальсько-штампувальних цехах автомобільних і тракторних заводів.

Він має ряд переваг, основними з яких є велика швидкість нагрівання, високий к. к. д., малий угар (0,4-0,6 %) і ін. До недоліків індукційного електронагріву можна віднести порівняно високу вартість силової електричної

установки, труднощі здійснення підігріву заготовок і нагрівання заготовок складної форми.

Електроконтактний нагрів. В основі електроконтактного способу нагрівання лежить закон Джоуля - Ленца, що виражається формулою (2.1). Принципова електрична схема контактного нагрівання зображена на рис. 2.14, а. Від понижуючого силового трансформатора 1 струм за допомогою гнучких шин подається до пневматичних мідних контактів 2, між якими затискається заготівля, що нагрівається, 3. Силовий трансформатор у первинній обмотці має кілька ступіней регулювання, що дозволяє змінювати напругу, а отже, і силу струму у вторинному ланцюзі, тобто в заготівлі. Напруга у вторинному ланцюзі трансформаторів для контактного нагрівання буває від 4 до 16 в, а сила струму може досягати декількох десятків тисяч ампер.



1 – понижуючий трансформатор; 2 – затискні контактні голівки; 3 – шафа з апаратурою керування; 4 – контактор; 5 – електропневматичний кран

Рисунок 2.14 – Принципова електрична схема контактного нагрівання (а) і установка електроконтактного нагрівання заготовок типу ДО-17 (б)

На рис. 2.14, б зображена одна з конструкцій контактних установок потужністю 150 кВт. Установка призначена для нагрівання заготовок довжиною від 400 до 650 мм і діаметром від 20 до 42 мм.

В даний час є можливість нагрівати електроконтактним способом заготівлі до 75 мм у діаметрі. Нагрівання заготовок діаметром більш 75 мм не застосовується з економічних розумінь, тому що при великих розмірах заготовок надзвичайно зростають розміри силових трансформаторів. Коефіцієнт корисної дії електроконтактних установок коливається від 60 до 80%. Питома витрата

електроенергії при нагріванні вуглецевих сталей складає 0,325 кВт·год/кг, що в півтора рази менше ніж при індукційному нагріванні.

Основними недоліками електроконтактного нагрівання є обмеженість розмірів заготовок, що нагріваються, порівняно мала стійкість затискних контактів, а також складність нагрівання заготовок перемінного перетину.

При застосуванні електроконтактного нагрівання технологію деформації (штампування) рекомендується проектувати так, щоб з однієї заготівлі одночасно виготовлялося кілька кувань; це дозволило б вести нагрівання з великим к. к. д. установки.

У промисловості електроконтактний нагрів часто застосовується безпосередньо в штампувальних агрегатах, наприклад в електровиймаючих машинах. На цих машинах виготовляються, кування типу стрижнів з голівками або кілець.

Контроль температури при обробці тиском

Тому що для обробки тиском досить важливим є суворе дотримання температури нагрівання металу, то необхідний її контроль. У виробничих умовах контроль температури здійснюється шляхом виміру її відповідними приладами, названими *пірометрами*.

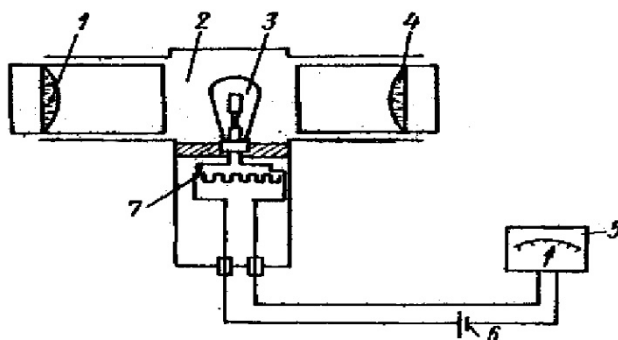


Рисунок 2.15 – Принципова схема оптичний пірометр зі зникаючою ниткою.

Пірометри, що застосовуються, підрозділяються: на термоелектричні, оптичні, радіаційні і фотоелектричні. Пірометри крім безпосереднього виміру температури можуть виконувати функції регуляторів теплового режиму роботи нагрівальних пристроїв. Найбільше застосування одержали *термоелектричні пірометри*, що складаються з термопари і мілівольтметра або потенціометра. Ці пірометри досить зручні внаслідок можливості фіксації й автоматичного запису температури на великій відстані від вимірюваного об'єкта і забезпечують велику точність виміру (до $\pm 5^\circ$). Для виміру температур до 1100°C застосовні хромель-алюмелеві термопари, а для температур до 1500°C платино-платинородієві.

У виробничих умовах для періодичного швидкого контролю температури розігрітого тіла застосовується оптичний пірометр зі зникаючою ниткою,

принципова схема якого зображена на рис. 2.15. Дія цього пірометра засновано на порівнянні випромінювання розпеченого тіла з яскравістю нитки лампи накаливання. Через об'єктив 1 промені розпеченого тіла попадають в окуляр 4, а потім в око спостерігача. У зоровій трубі 2 поміщена лампа накаливання 3, розжарення нитки якої регулюється за допомогою реостата 7, включеного в ланцюг батареї, або акумулятора 6. Зміна ступеня розжарення лампи 3 фіксується міліамперметром 5, градуйованим у градусах Цельсія. При збігу температури розпеченого тіла з температурою нитки остання на тлі тіла зникає (не буде видна). При температурі тіла, більше ніж температура нитки, остання матиме вигляд темної. Точність виміру багато в чому залежить від стану поверхні розпеченого тіла (від наявності або відсутності окалини) і від досвіду пірометриста. Оптичним пірометром можливо вимірювати температури від 700 до 1500°C.

Радіаційні пірометри (ардометри) працюють за допомогою платинової пластинчастої термопари, поміщеної в зоровій трубі, що направляється об'єктивом на розпечене тіло. Теплові промені, випромінювані тілом, фокусуються об'єктивом на спаї платинової термопари. Виникаюча т. е. р. с. фіксується мілівольтметром, градуйованим у градусах Цельсія. Такі пірометри придатні для виміру температури робітника простору печей.

Фотоелектричний пірометр являє собою прилад, що служить для виміру або реєстрації температур за допомогою фотоелемента. Якщо у візуальному оптичному пірометрі очей – спостерігача порівнює яскравість об'єктів, то фотоелемент у фотоелектричному пірометрі порівнює або вимірює світлові потоки від розпечених тіл, що створюють ту або іншу освітленість на його катоді. Фотоелектричний пірометр відрізняється високою точністю вимірів і швидкою дією, завдяки чому він часто застосовується як пристрій, що вимикає при швидких процесах нагрівання, наприклад, таких, як індукційний і електроконтактний.

2.3 Механізми ділянки нагрівальних печей широкоштабових станів гарячої прокатки

Устаткування пічної ділянки широкоштабового стану гарячої прокатки призначено для передачі слябів або зі складу, або безпосередньо зі слябінгу або від установки неперервного розливання сталі (УНРС) на завантажувальний рольганг стану, завантаження слябів в нагрівальні печі і видачі їх з печі на приймальний рольганг. До цього устаткування відносяться транспортери слябів, передавальні візки, зіштовхувачі, підйомні (завантажувальні) столи, штовхачі, буфера (амортизатори), упори, приймачі слябів, а також рольганги, що транспортують сляби уздовж печей перед їх завантаженням в печі і нагріті сляби до стану.

Склад і розташування устаткування пічної ділянки можуть бути різні для кожного стану і залежать від відносного розташування складу слябів і нагрівальних печей, від протяжності прольоту складу слябів і від числа нагрівальних печей.

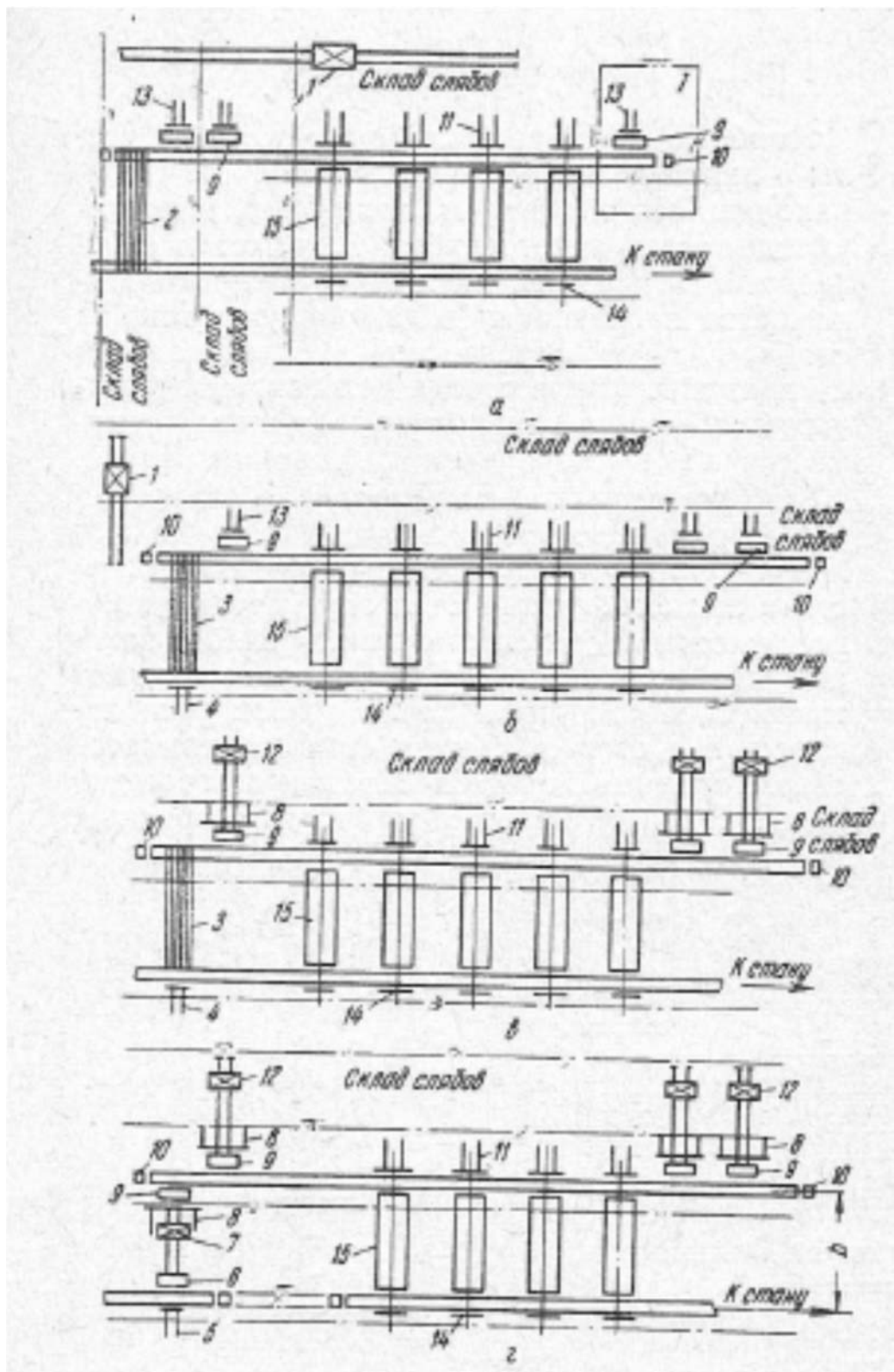
На рис. 2.16 показана схема можливого розташування і складу устаткування пічної ділянки. У кожної з них є відмінна особливість, яка є визначною при виборі складу і розташування устаткування. Вказані схеми розраховані на надходження слябів в пачках (пакетах) зі складу, від слябінгу або від УНРС до завантажувальних пристроїв стану.

Особливістю схеми (рис. 2.16, а) є комбіноване розташування прольотів складу слябів щодо станового прольоту: два прольоти складу розташовано під прямим кутом і один – паралельно. Завантажувальний рольганг стану перетинає всі прольоти складу слябів. У кожному з перпендикулярно розташованих прольотів складу слябів встановлено по одному завантажувальному пристрою і ще один такий пристрій є в третьому паралельному прольоті. У разі відсутності паралельного прольоту ділянка 1 не потрібна. Пакети слябів подаються складськими кранами безпосередньо на завантажувальні пристрої стану. Сляби, що не вимагають проміжного складування для огляду і зачистки, передаються від слябінгу на завантажувальний рольганг ланцюговим транспортером. До ланцюгів транспортера через певний крок прикріплені пальці, які захоплюють сляби безпосередньо на роликах рольганга, тому зіштовхувач 4 тут не встановлюють.

За розташуванням устаткування схеми (рис. 2.16,б і в) є ідентичними. В обох схемах склад слябів розташовують в двох прольотах, паралельних становому прольоту. Від слябінгу на завантажувальний рольганг штабового стану сляби передаються транспортером штангового типу. На першу секцію штанг сляби з рольганга переміщуються зіштовхувачем 4.

Відмінність даних схем полягає в способі передачі слябів зі складу на завантажувальні пристрої стану.

У першому випадку сляби з другого прольоту складу передаються візком в перший проліт, потім краном першого прольоту – безпосередньо на завантажувальні пристрої або складуються в першому прольоті. По схемі в сляби з другого прольоту передаються спеціальними візками безпосередньо до завантажувальних пристроїв стану без участі крана. В обох випадках сляби з першого прольоту укладаються на завантажувальні пристрої краном, але можливе також їх укладання на візки, якщо це не лімітуватиме передачу слябів з другого прольоту.



1 – передавальний візок; 2 – транспортер ланцюговий; 3 – транспортер з крокуючими штангами; 4 – зіштовхувач; 5 – зіштовхувач; 6 – завантажувальний стіл; 7 – передавальний візок; 9 – завантажувальний стіл; 10 – стаціонарний упор; 11 – пічний штовхач; 12 – передавальний візок; 8, 13 – зіштовхувач; 14 – буфер; 15 – нагрівальна піч

Рисунок 2.16 – Схеми можливого розташування і складу устаткування пічної ділянки

Схема (рис. 2.16, а) є найбільш переважною у випадках, коли відстань між осями завантажувального і приймального рольгангів перевищує 30 м і коли застосовують сляби масою більше 23 т. Основна відмінність цієї схеми від двох попередніх полягає в заміні транспортера спеціальним візком. Для укладання слябів в пакет перед завантаженням на передавальний візок і для переміщення пакету на візок, а також для переміщення пакету з візка з подальшою розкладкою по одному слябу застосовано два пристрої, кожен з яких складається з підйомно-опускаючого столу і зіштовхувача.

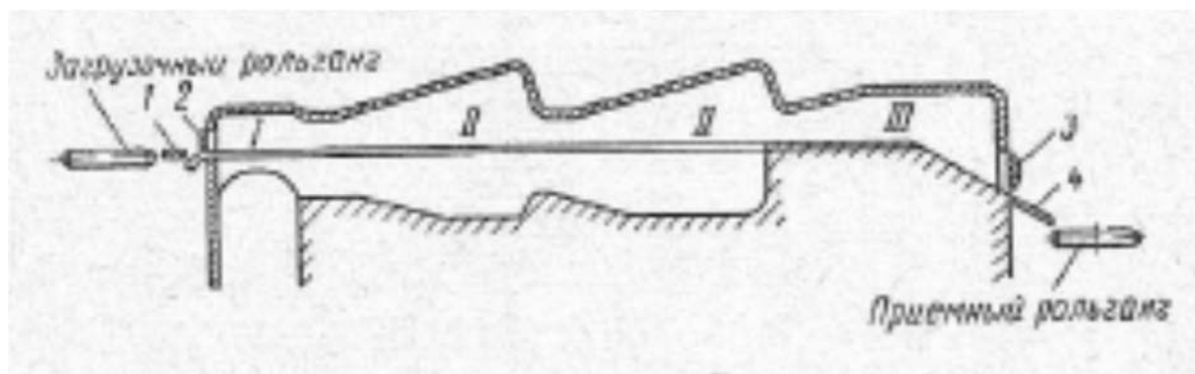
Таку схему можна застосовувати як в компоновці широкоштабового стану зі слябінгом, так і в компоновці з установкою неперервного розливання сталі. У першому випадку рольганги представляють собою єдиним рольганг, а в другому випадку вони можуть бути роз'єднані, як показано на схемі, оскільки передача слябів з установки неперервного розливання сталі безпосередньо до стану не передбачається.

Вимоги, що пред'являються до устаткування пічної ділянки, характеризуються умовами його роботи і в першу чергу високою температурою гарячих слябів і в зоні печей, великими динамічними навантаженнями, які супроводжують навантажувально-розвантажувальні операції, переміщення пакетів і окремих слябів великої маси, наявністю окалини як на слябах тих, що поступають для завантаження в печі, так і видаваних з печей. Тому деталі устаткування пічної ділянки, дотичні з гарячими слябами, повинні бути достатньо масивними щоб уникнути їх викривлення від високих температур, а вузли, що постійно знаходяться під впливом високих температур, тобто розташовані у вікон печей, необхідно охолоджувати водою. Деталі і вузли механізмів необхідно розраховувати з умов динамічних навантажень, рухомі частини і масляні ванни повинні бути надійно захищені від засмічення окалиною, підстави механізмів повинні мати посилене з'єднання з фундаментами.

Нагрівальні печі

На сучасних широкоштабових станах для нагріву слябів застосовують три- або чотиризонні методичні печі з дворядним завантаженням. У тризонній печі є одна зварювальна зона, а у чотиризонній дві. Сляби завантажуються в пакетах холодними або гарячими, тобто що мають температуру до 800° С. Температура в печі біля вікна посадки досягає 900 – 1100° С. Цю частину печі називають методичною зоною. У ній метал нагрівається до температури посадки, тобто до 850 – 1050° С. Дві наступні частини чотиризонної печі (рис. 2.17) називають зварювальними зонами. Тут сляби остаточно нагріваються до необхідної температури. У цих зонах підтримують температуру до 1350° С. Температура нагріву металу залежить від якості металу, вмісту вуглецю, і може досягати 1300° С. Однак у печах з широким подом (понад 10 м) нагрівати метал вище 1200 – 1220° С не рекомендують щоб уникнути рідкого шлакоутворення і значних труднощів, що виникають у зв'язку з цим, при очищенні монолітної частини поду від окалини. У печах з вузьким подом метал нагрівається до температури 1250 –

1280° С. В останній зоні (томильній) температура досягає 1300° С. Тут метал піддають томлінню, тобто витримці, необхідній для рівномірного прогрівання слябу за всім обсягом, тому под цієї зони монолітний (суцільний).



I— методична зона; II—зварювальні зони; III—томильна зона; 1 — приймальний стіл; 2 — заслінка; 3 — кришка; 4—похила плита

Рисунок 2.17 – Схема методичної нагрівальної печі:

Методичні печі широкоштабових станів, як правило, опалюють сумішшю коксового і доменного газів з різною теплотою згорання (від 6700 до 9200 кДж/м³). Розміри поду методичних печей сучасних широкоштабових станів досягають 11 × 38 м; при цьому довжина монолітного поду складає більше 20 % від довжини активного поду печі. Продуктивність такої печі при холодному садінні складає 260 т/год, а напруга активного поду 650 кг (м²· год). При гарячому садінні ці величини приблизно в 1,5 рази більше.

За кордоном для широкоштабового стану активно упроваджуються нагрівальні печі з крокуючим подом. Позитивні результати вирішення цієї проблеми сприятимуть розширенню можливостей нагріву важких слябів довжиною (10 – 12 м) до температури 1300° С.

Контрольні питання

1. Параметри нагріву металу.
2. Калориметрична та дійсна температура горіння палива.
3. Методичні та напівметодичні печі ковальсько-штампувального виробництва.
4. Зміна механічних параметрів металу при нагріванні.
5. Розрахунок горіння палива. Перерахунок складу палива.
6. Камерні печі ковальського виробництва.

Література до розділу 2: [2, 4, 7, 8]

3 ПІДІГРІВ ШТАБИ ПЕРЕД ЧИСТОВИМИ КЛІТЯМИ ІНДУКЦІЙНИМ СПОСОБОМ

Необхідність підігріву сталевих штаб на проміжному рольгангу між чорновими і чистовими клітями стану гарячої прокатки пов'язана із загальними вимогами підвищення якості прокату і зниження енерговитрат при прокатці.

Стабілізація температури на вході в чистову групу стану виключає прискорення при прокатці і дозволяє отримати постійні фізико-механічні властивості по довжині штаб. З'являється можливість підтримувати з високою точністю товщину кінцевого продукту по довжині.

Рівномірне температурне поле по ширині штаб покращує умови експлуатації валків прокатного стану і зменшує нерівномірність зносу валків і відповідно збільшує їх термін експлуатації.

Нерівномірний розподіл температури по ширині підкату штаби перед чистовими клітями має також ряд негативних наслідків, позначається на якості штаб, а саме:

- на кромках може утворитися інша металургійна структура, яка небажана в іншій частині штаби;
- якщо після прокатки необхідний ще один вид термообробки сталі, то температура найбільш холодних зон матеріалу, тобто кромки штаби, повинна бути вище температури перехідного стану;
- якщо кромки недогріті, то це може привести до підвищення крихкості і утворення тріщин на кромках штаби.

За час транспортування штаба втрачає середню температуру, додатково підстивають кромки на деяку температуру і утворюється температурний перепад по довжині штаби. З цих причин, в технологічному процесі, як правило, повинен бути передбачений підігрів штаб розкату.

Для цієї мети можуть бути використані різні нагрівальні установки. Індукційний спосіб нагріву найбільш придатний як для одночасного підвищення загального рівня температури, так і для підігріву кромки і вирівнювання температури по ширині, компенсації температурного градієнта по довжині штаби і забезпечення стабілізації температури на вході в чистову групу клітей.

Підвищення рівня температури штаби перед входом в чистові кліті прокатного стану зазвичай здійснюються в овальних нероз'ємних індукторах з поздовжнім магнітним полем. При використанні відносно високої частоти струму, можна частково компенсувати падіння температури на кромках штаб, але зона впливу обмежена кількома глибинами проникнення струму в метал і не буде перевищувати декількох міліметрів. Тому необхідна компенсація температури на кромці в зоні 100 ... 150 мм при нагріванні в цьому типі індуктора не можлива.

Для підігріву кромки штаб і перетину штаб існують різні методи, пристрої та індуктори.

Для досягнення необхідних показників геометричної точності широких штаб, вирівнювання температури по ширині штаби узгоджується з роботою систем автоматизованого регулювання профілю штаб (САРП) і товщини прокату

(САРТ). Дані процеси безпосередньо пов'язані з функціонуванням механізмів протизгинання валків, навантаження яких залежить від реалізованих в кожному окремому пропуску силових режимів листової прокатки, автоматизований розрахунок яких запропонований у літературі. Для розрахунку перепадів (градієнтів) температур по довжині і ширині штаби запропоновані автоматизовані продукти на основі методів скінчених елементів, які, в тому числі, адаптовані до умов прокатки широких штаб. Використання таких комп'ютерних модулів дозволяє визначати вихідні дані для проектування індукційних нагрівачів (підігрівачів) різних типів (овальних, щілинних, зі змінним кроком витків, двошарових і т.п.), установка яких необхідна для забезпечення необхідної форми градієнтної кривої розподілу температур по ширині розкату перед входом в чистові кліті. Між чорною кліттю і першою чистовою кліттю в системі неперервного широкоштабового стану гарячої прокатки виконується установка одного або декількох підряд (що більш ефективно) індукційних підігрівачів, які включаються і вимикаються узгоджено з ритмом прокатки штаб. Тобто даний спосіб нагріву кромки листового і штабового розкату полягає в тому, що подача розкату в секції щілинного індуктора і поздовжнє його переміщення в електромагнітному полі в міжклітьовому просторі проводиться до забезпечення необхідної температури розкату. Причому секції індукторів включаються в автоматизованому режимі послідовно в момент входу в них передньої кромки розкату і вимикаються при виході з них задньої кромки розкату. В патентній літературі також наведені раціональні технічні рішення, розвиваючі методи градієнтного нагрівання і забезпечення стабільності температурного поля металу перед його обробкою тиском.

3.1 Уточнення методики розрахунку теплових втрат металу на безперервних станах гарячої прокатки

Вимоги ринку щодо розширення асортименту гарячекатаних рулонів вимагають нагальну потребу в освоєнні нових технологій прокатки на широкоштабових станах, таких як 1680 ПАТ «Запоріжсталь» і 1700 ПрАТ «ММК ім. Ілліча». Проектування технології, перед її реалізацією на існуючому обладнанні, і визначення вузьких місць, можливо за допомогою інструментів математичного моделювання технологічного процесу, важливою складовою якого є розрахунок температурного режиму прокатки. Розробка такого інструменту, з урахуванням особливостей устаткування стану 1680 і стану 1700, дозволить оцінити їх технічні можливості і розширити асортимент, у тому числі що виробляється за технологією ТМСП (Thermo-Mechanical Control Process).

Запропоновані рішення орієнтовані як на конкретні комплекси прокатного обладнання, так і на лабораторні зразки станів. Залишаються питання по універсальності існуючих математичних моделей, з можливістю їх застосування для розрахунку прокатних комплексів з різним складом основного технологічного устаткування.

Важливим моментом є потреба в отриманні точних моделей для проектування технології контрольованої прокатки (ТМСП) мікролегованих марок сталі. Також важлива точність визначення температури з метою забезпечення необхідної структури, механічних властивостей і якісних характеристик прокату.

Перспективна установка CoilBox, в тому числі з індукційної піччю, що дозволяє додатково підвищити температуру і знизити навантаження на прокатне обладнання.

Так, в літературі описаний спосіб розрахунку втрат температури на установці CoilBox, який враховує втрати на кожному витку. Даний спосіб представляє інтерес, однак, методика розрахунку і розрахункові залежності в роботі не наведено. Також необхідна перевірка похибки, одержаної при використанні даного методу, так як загальна похибка моделі за даними становить понад 6%. У той же час, були досліджувані технології в широкому діапазоні температур, в тому числі, в двофазній області, що дозволяє застосовувати модель для процесів низькотемпературної контрольованої прокатки.

Точність математичних моделей, розроблених різними вченими, мають відмінності, що пов'язано з різною структурою моделей, підходами і методами розрахунку.

Так, запропонований адаптований спосіб розрахунку, похибка якого не перевищує 3,4% по клітям, в порівнянні з неадаптованих, похибка якого становила до 6% від фактичних даних, по силі прокатки. В роботі загальна похибка моделі також визначена розрахунком сили прокатки.

У вигляді самостійного елементу, запропонована температурна модель, похибка якої визначена в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$). Так, відхилення температури в роботі, визначена двома способами, становить $4,2^{\circ}\text{C}$, відхилення температури на поверхні двох дослідних листів складало від -20°C до $+10^{\circ}\text{C}$ і від $+10^{\circ}\text{C}$ до $+30^{\circ}\text{C}$ відповідно.

В іншій роботі досліджено вплив швидкісних процесів на температурний перепад по довжині штаби, з урахуванням змотування на установці CoilBox, проте сама залежність не приведена. Також, прийнято, що температура металу, змотаного в рулон, не змінюється.

У той же час, наведені залежності для визначення втрат температури при змотування на CoilBox, які базуються на диференціальному рівнянні теплопровідності. Дані рівняння не враховують втрати температури в процесі змотування і розмотування штаби, що обмежує їх застосування.

Таким чином, існуючі залежності і методи для розрахунку втрат температури на установках CoilBox є спрощеними, не враховують частину факторів і не забезпечують необхідну точність розрахунків. Наявної в літературних джерелах інформації недостатньо для універсального математичного опису процесів охолодження металу в установках CoilBox. Розрахунки, що виконуються інжиніринговими компаніями, мають обмежений доступ. Існуючі обмеження обумовлюють необхідність в розробці залежностей для широкого застосування в інженерних розрахунках температурних процесів прокатки в комплексі з обладнанням CoilBox.

Актуальність даних розрахунків обумовлена застосуванням обладнання CoilBox на ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ», а також його установкою в ході майбутньої реконструкції стану 1700 ПрАТ «ММК ім. Ілліча».

Метою роботи є уточнення методики розрахунку втрат температури металу при використанні обладнання CoilBox, що враховує фактори швидкості руху штаб, довжину рольганга і довжини розкату, з урахуванням умов безперервних станів гарячої прокатки ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» і ПрАТ «ММК ім. Ілліча».

Типова модель розрахунку станів гарячої прокатки включає в себе наступні етапи:

розрахунок розмірів вихідної заготовки, який містить розрахунок питомої витрати металу на прокат, перерахунок розмірів заготовки в гарячому стані;

розрахунок енергосилових параметрів прокатки, який включає розрахунок температурного режиму прокатки, коефіцієнт тертя, справжній опір деформації, силу і момент прокатки;

розрахунок швидкісного режиму прокатки, який включає розрахунок часу прокатки залежно від типу швидкісного режиму, циклу прокатки;

розрахунок середнього квадратичного моменту електродвигуна, який складається з розрахунку моментів по кожному циклу прокатки, середньоквадратичного інтеграла, а також потужності двигуна прокатного стану.

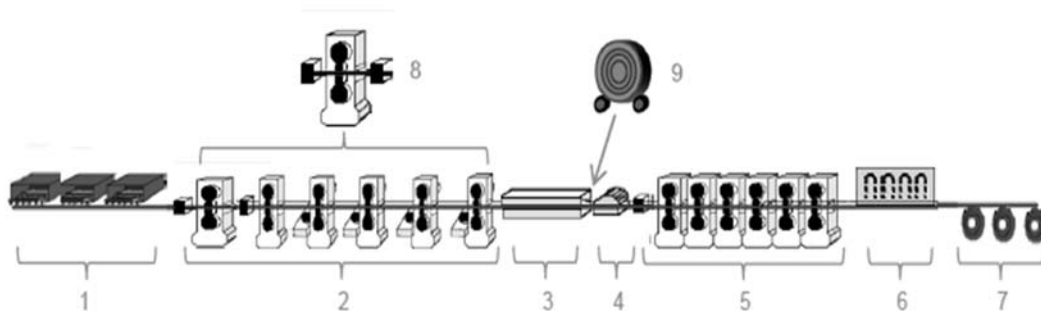
Принципи, викладені в такій структурі розрахунку, є універсальними і можуть бути застосовані для моделювання технології на різних станах гарячої прокатки.

У даній роботі розглянуті особливості моделювання технології гарячої прокатки на безперервних штабових станах на прикладі комплексу обладнання стану 1700 ПрАТ «ММК ім. Ілліча», з урахуванням проекту реконструкції (позиції 8 і 9), рис. 3.1. Типовий проект безперервного стану гарячої прокатки, на прикладі стану 1700 ПрАТ «ММК ім. ІЛЛІЧА», наведено на рис. 3.1.

Основне технологічне обладнання безперервних станів може складатися з однієї або декількох універсальних реверсивних клітей або комбінації реверсивних і нереверсивних клітей замість нереверсивної чорнової групи, проміжного перемотувального пристрою типу CoilBox перед чистової групою, також можливі й інші варіанти.

Розрахунок температурного режиму прокатки враховує такі фактори:

- зниження температури розкату за рахунок втрат тепла випромінюванням;
- втрати тепла конвекцією;
- втрати температури при контакті металу з валками;
- падіння температури внаслідок втрат тепла при гідрозбиванні;
- підвищення температури розкату за рахунок енергії деформації.



1 – ділянка методичних печей; 2 – чорнова група клітей; 3 – теплозберігаючі екрани; 4 – летючі ножиці; 5 – чистова група клітей; 6 – установка прискореного охолодження; 7 – моталки; 8 – реверсивна чорнова кліть; 9 – установка CoilBox

Рисунок 3.1 – Схема розташування основного обладнання стану 1700

У нереверсивних клітях чорнової і чистової груп сумарний час, що витрачається на втрати тепла випромінюванням і конвекцією, визначається залежністю:

$$\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_t$$

де τ – час, що витрачається на прокатку розкату в кліті, с;

τ_t – час, транспортування розкату між клітями чорнової групи, с.

При розрахунку чистової групи, у формулі параметр τ_t замінюється на τ_{tl} – час транспортування розкату між клітями чистової групи, с;

При цьому, для чорнової групи, де прокатка здійснюється послідовно в кожній кліті, час, що витрачається на прокатку τ , визначається розрахунком швидкісного режиму прокатки.

Час транспортування розкату між клітями чорнової групи, визначається залежністю:

$$\tau_t = \frac{l_r - l}{V_r}$$

де V_r – швидкість руху штаб по рольгангу, м/с;

l_r – довжина рольганга, м;

l – довжина розкату, що транспортується, м, за умови $l_r > l$.

Для чистової групи, де прокатка здійснюється одночасно в декількох клітях, час, що витрачається на прокатку в кліті, визначається за формулою:

$$\tau = \frac{l_g}{v_{roll} \times 1000};$$

де l_g – довжина дуги контакту, мм;

v_{roll} – швидкість прокатки, м / сек.

Час транспортування розкату між клітями чистової групи визначаємо за залежністю:

$$\tau_{t1} = \frac{l_r}{V_{roll}},$$

Розрахунок втрат температури металу при змотуванні розкату на установці CoilBox визначається з рівняння Ю.В. Коновалова і В.В. Кисіля:

$$\Delta t = k_{uk} \left(\frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \cdot \frac{\tau_c}{h_c},$$

де h_c - товщина рулону, мм;

t_o - температура розкату, який надходить на установку CoilBox, °C;

t_c - тривалість технологічної операції, с;

K_{uk} - коефіцієнт, який визначається, згідно рекомендацій за графіком [9]

Перетворивши графік [9] для визначення коефіцієнта k_{uk} , отримуємо залежність, **рис. 3.2**:

$$k_{uk} = \frac{(2.0284 \ln(t_o) - 12.195)}{1000}$$

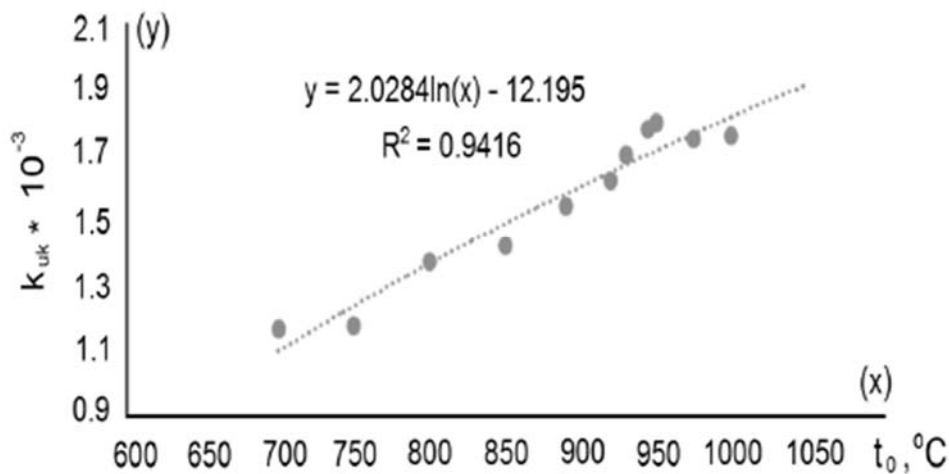


Рисунок 3.2 – Коефіцієнт залежності k_{uk} ,

З урахуванням залежності (5.6), формула для розрахунку втрат температури розкату після установки CoilBox має вигляд:

$$\Delta t_1 = \left[\frac{\left(\frac{2.0284 \ln(t_o) - 12.195}{1000} \right) \cdot \left(\frac{\tau_c}{h_c} \right) \cdot (t_o + 273)}{100^4} \right],$$

Тривалість технологічної операції змотування і розмотування рулону визначаємо наступним чином:

$$\tau_c = \frac{L}{v_w \cdot 1000} + \frac{L}{v_{uw} \cdot 1000} + \tau_p,$$

де L – довжина розкату, мм.

V_w - швидкість змотування, м / с;

V_{uw} - швидкість розмотування, м / с;

T_p - час знаходження змотаного рулону на установці, с.

Товщину рулону визначаємо з рівняння:

$$H \cdot B \cdot L \cdot p = (\pi R^2 - \pi r^2) B \cdot p,$$

де H , B , L - товщина, ширина і довжина змотуваного розкату, мм;

p - щільність стали, 7,85 г / см³;

R - зовнішній радіус рулону після змотування на установці CoilBox, мм;

r - внутрішній радіус рулону, що формується, згідно характеристик установки, мм.

Після перетворення рівняння отримуємо залежність для визначення зовнішнього радіуса рулону:

$$R = \sqrt{\frac{H \cdot L}{\pi} + r^2},$$

Товщина рулону, одержуваного після змотування розраховується:

$$h_c = \left(\sqrt{\frac{H \cdot L}{p} + r^2} - r \right) \cdot 1,05$$

де 1,05 - коефіцієнт нещільності змотування.

З урахуванням вищенаведених залежностей, формула для розрахунку втрат температури розкату після установки CoilBox набуває вигляду:

$$\Delta t_1 = \left(\frac{(2,0284 \ln(t_o) - 12,195)}{1000} \right) \cdot \left(\frac{\frac{L}{v_w \cdot 1000} + \frac{L}{v_{uw} \cdot 1000} + \tau_p}{\left(\sqrt{\frac{H \cdot L}{\pi} + r^2} - r \right) \cdot 1,05} \right) \cdot \left(\frac{t_o + 273}{100^4} \right).$$

Слід зазначити, що отримана залежність враховує втрати температури металу в стаціонарному стані змотаного рулону. Для обліку додаткових втрат температури металу від неврахованих факторів (вплив товщина підкату, втрати температури на початковому етапі змотування і в кінці розмотування, вплив ефекту «термоса» при витримці рулону в змотанім стані) виконана обробка масиву розрахункових даних компанії «Primetals». На **рисунку 3.3** наведена зазначена залежність втрат температури від неврахованих факторів.

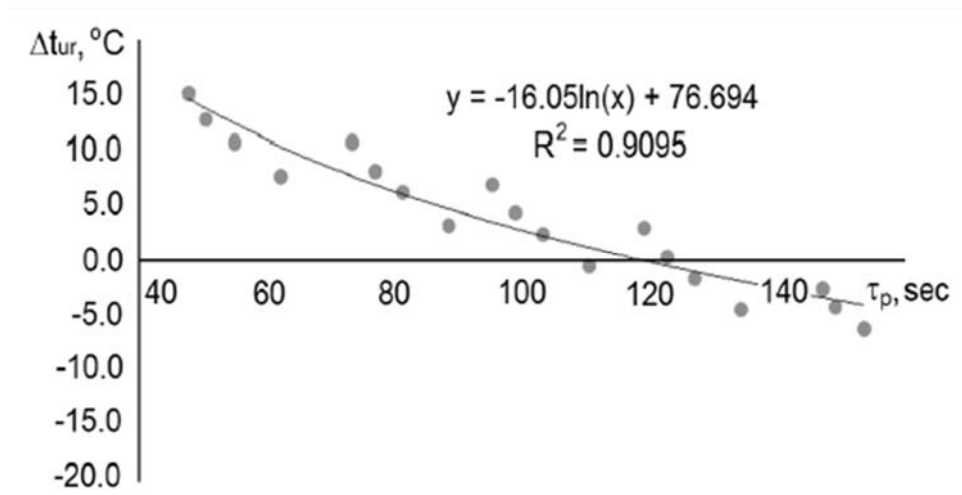


Рисунок 3.3 – Залежність втрат температури від неврахованих факторів, виражених через τ_p

В результаті обробки даних отримана наступна залежність для визначення втрат температури від неврахованих факторів:

$$\Delta t_{ur} = -16.05 \ln(\tau_p) + 76.694.$$

Таким чином, сумарні втрати температури металу після установки CoilBox визначаємо:

$$\Delta t_{\Sigma} = \Delta t_1 + \Delta t_{ur}$$

Зміна температури металу на установці CoilBox в залежності від часу охолодження (зміна швидкості змотування/розмотування) і товщини сформованого рулону, при інших рівних умовах, наведена на **рис. 3.4**

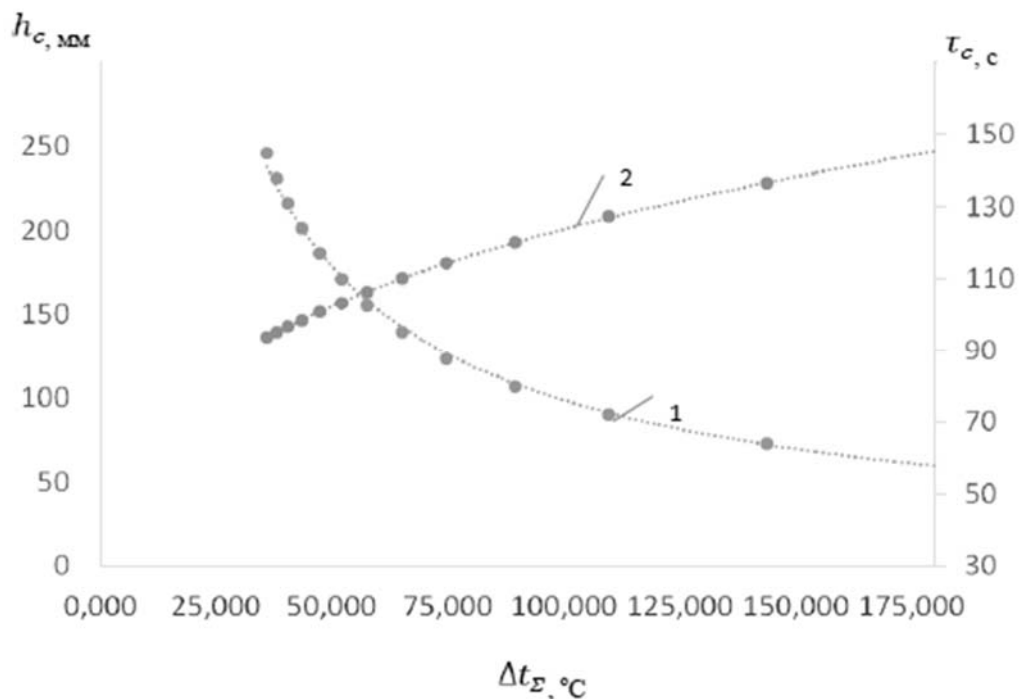


Рисунок 3.4 – Залежність втрат температури від товщини змотаного рулону (1), часу охолодження (2)

Отримані формули застосовні в температурному діапазоні 700-1100°C, часу охолодження рулону на установці від 30 с до 1000 с, для вуглецевих і мікролегованих марок сталей. Для перевірки результатів розрахунків в інших діапазонах потрібно проведення додаткових досліджень.

Відхилення розрахункової температури металу на виході з CoilBox від фактичної склало від - 4,2% до -6,4%, **табл. 3.1**.

Отримані відхилення можуть бути пов'язані з відсутністю інформації про додаткові фактори втрат і місце установки пірометрів для виміру температури.

Також, перевірка виконана на розрахункових даних компанії «Primetals».

Відхилення температури металу на виході з CoilBox, визначено за залежності, від розрахункових даних компанії «Primetals» склало від - 0,91% до 0,39%. Стандартне відхилення склало 2,95 °C.

Перевірка точності розрахунку температурного режиму прокатки з урахуванням залежностей виконана на математичній моделі, адаптованій для умов безперервного стану 1700 ММК «ім. ІЛЛІЧА», **табл. 3.2**.

Таблиця 3.1 – Перевірка залежності для визначення втрат температури металу при змотування на установці CoilBox

$*r$, мм	t_o , °C	L , мм	v_w , м/с	v_{uw} , м/с	$*\tau_p$, с	H , мм	t_1 (факт), °C	h_c , мм	Δt_Σ (факт), °C	τ_c , с	Δt_Σ (расчет), °C	t_1 (расчет), °C	Δ , %
700	1096	64558	2,2	1,79	70	23	992	295,2	104,0	135,4	41,0	1055,0	-6,4
700	1018	243417	6,5	6,25	70	6,1	942	295,2	76,0	146,4	36,4	981,6	-4,2
700	1053	228437	6,5	6,25	70	6,5	965	295,2	88,0	141,7	38,6	1014,4	-5,1

*Дані відсутні, прийняті за характеристиками аналогічного обладнання на ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ».

В табл. 3.1 $t_l = t_o - \Delta t_\Sigma$ – температура металу на виході з CoilBox, °C.

В табл. 3.2, t_l - температура розкату після прокатки у відповідній кліті.

Відхилення розрахункових температур прокату від фактичних в кліті 4а чорнової групи і в клітях 6 - 9 чистової групи, за результатами прокатки гарячекатаних рулонів розмірами 1,2x1000 мм зі сталі марки 08пс по ГОСТ 9045 (аналог DC01 по EN 10130), плавка №262753-3 склали від 0,66% до 1,21%.

Таким чином, точність вдосконаленого розрахунку температурного режиму прокатки, в тому числі з використанням обладнання CoilBox, дозволяє його використовувати при проектуванні технології ТМСП.

Таблиця 3.2 – Перевірка розрахунку температурного режиму прокатки

Параметр	Черновая група	Чистовая група			
		№ клетки			
	кл4а	кл6	кл7	кл8	кл9
t_1 (расчет), °C	1068	972	932	885	854
t_1 (факт), °C	1075	963	921	874	845
Δ , %	-0,66	0,89	1,19	1,21	1,1

Контрольні питання

1. Визначення температурного інтервалу обробки тиском.
2. Визначення кількості повітря та продуктів згорання.
3. Загальна будова нагрівальної печі.
4. Розрахунок тривалості нагрівання тонких заготовок.
5. Основи механіки пічних газів.
6. Кладка печей. Вогнетривкі матеріали.

Література до розділу 3: [5, 6, 10, 11]

4 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РІВНОМІРНОГО РОЗПОДІЛУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

У наш час на підприємстві ПАТ «Запоріжсталь» основною проблемою є охолодження країв штаби, що дуже погано позначається на її механічних властивостях розкату. Удосконалення технології рівномірного розподілу тепла допоможе зробити продукцію більш якісною.

Традиційні шляхи удосконалення технології і устаткування листових станів гарячої прокатки направлені на покращення механічних властивостей і розмірів готового прокату, підвищення продуктивності агрегатів, зниження витрат металу на переділі, розглядаються як непрямий метод зниження енерговитрат. Цим обґрунтовується актуальність даного напрямку робіт щодо вивчення існуючих технологій по збереженню механічних і теплових властивостей металу, що в подальшому допоможе забезпечити економію енергоресурсів.

4.1 Теплозберігаючі екрани

Теплоізоляційні екрануючі установки рольганга штабового стану гарячої прокатки можуть базуватися на тепловідбивному і теплоакумулюючому ефектах. В обох випадках теплоізоляційна установка складається з ряду ідентичних секцій, встановлених на рольгангу.

Відома секція теплоізоляційного екрану рольганга штабового стану гарячої прокатки, що базується на теплоакумулюючому ефекті (див., наприклад, патент РФ N 1519799).

Недоліками відомої секції теплоізоляційного екрану є: по-перше, інерційність в роботі (необхідно проходження під секцією декількох гарячих штаб, щоб секція вийшла на стаціонарний тепловий режим і почала високоефективно екранувати тепло від металу); по-друге, тривалість теплової взаємодії гарячого металу з секцією екрану на різних ділянках рольганга штабового стану гарячої прокатки істотно різна і коливається від десятків до сотень секунд. В результаті там, де тривалість цієї взаємодії незначна, ефект застосування цих секцій екранів дуже низький; по-третє, в цих теплоізоляційних екранах використовують дорогі жаростійкі матеріали.

Відомі секції теплоізоляційного екрану рольганга штабового стану гарячої прокатки, що базуються на тепловідбивному ефекті. Основними їх перевагами є безінерційність в роботі і відносно низька вартість. Відома секція теплоізоляційного екрану рольганга штабового стану гарячої прокатки, що містить несучу раму з закріпленими на ній тепловідбивними листами, виконаними з алюмінію або його сплавів.

Недоліком відомої секції теплоізоляційного екрану є низька його працездатність, яка особливо виявляється на ділянках тривалої теплової взаємодії секції та гарячого металу (наприклад, в районі рольганга перед

летючими ножицями). Останнє зумовлює необхідність установки тепловідбивача на значній відстані від екранування металу (800 ... 850 мм від рольганга), що істотно знижує ефект екранування.

Відома секція теплоізоляційного екрану рольганга штабового стану гарячої прокатки, що містить несучу раму з закріпленими на ній змінними касетами, що складаються з корпусу і змінного тепловідбиваючого елемента, закріпленого на корпусі з утворенням між ними зазору і трубою для підведення теплоносія до цього зазору (див., наприклад, а. с. СРСР 1585044).

За істотними ознаками ця відома секція теплоізоляційного екрану найбільш близька пропонованій секції, тому прийнята за прототип.

Істотним недоліком такої секції теплоізоляційного екрану є те, що зазор між корпусом касети і тепловідбиваючим елементом виконаний не по всьому контуру цього елемента; в конструкції передбачений щільний контакт між корпусом і тепловідбиваючим елементом по всьому його периметру. Відповідно зазначений зазор трансформується в порожнину між корпусом і тепловідбивним елементом. При роботі секції в якості теплоізоляційного екрану має місце інтенсивний теплообмін між тепловідбивним елементом і корпусом касети, що вимагає використання в якості теплоносія води. У реальних умовах роботи штабового стану гарячої прокатки для відводу тепла використовують технічну воду. Наявна в цій воді окалина накопичується в зазначеній порожнині і засмічує її вихідні отвори. Припиняється охолодження корпусу касети, вода в порожнині закипає, різко знижується тепловідбиваючі показники теплоізоляційного екрану. Конструкція секції розігрівается і секція теплоізоляційного екрану виходить зі строю.

В сукупності вказаний недолік виключає високоефективне застосування цих секцій теплоізоляційного екрану на рольгангах штабового стану гарячої прокатки для зниження охолодження металу.

Пропонована секція теплоізоляційного екрану рольганга штабового стану гарячої прокатки вільна від вказаного недоліка. У ній відсутній по суті контакт корпусу касети і тепловідбиваючого елемента і практично виключено теплова взаємодія з гарячим металом елементів конструкції корпусу касети і несучої рами секції екрану, тим самим максимально запобігається розігрів корпусу касети і через нього всієї секції екрану. Крім того, розвинена тепловіддача поверхні тепловідбиваючого елемента, що дозволяє інтенсифікувати відведення от цього елемента тепла, акумульованому в ньому при роботі секції, і здійснює цей тепловідвід подачею стисненого повітря. Відмічене дозволяє тривалий час зберігати високі тепловідбивні властивості екрану, тим самим має установку з високим ефектом зберігання тепла штаб гарячого металу в процесі його знаходження на рольгангах стану. Запобігання конструкції секції екрану від нагріву виключає деформацію несучої рами секції, підвищує працездатність секції теплоізоляційного екрану в цілому.

Перераховані технічні результати досягають за рахунок того, що в секції теплоізоляційного екрану рольгангу штабового стану гарячої прокатки, містить раму із закріпленими на ній змінними касетами, що складаються з корпусу і змінного тепловідбивного елемента, закріпленого на корпусі з утворенням між

ними зазору, і трубкою для відведення теплоносія до цього зазору, згідно з пропозицією зазор виконаний по всьому контуру тепловідбивного елемента, бічні кромки тепловідбивного елемента і корпусу касети закриті додатковими тепловідбивачами, встановленими з зазором щодо цих країв, корпусу касети і несучої рами секції, при цьому на поверхні тепловідбивного елемента, зверненого до корпусу касети, виконані ребра, розташовані уздовж рами секції, а вихідні отвори труби для підведення теплоносія орієнтовані уздовж рами секції. Секція теплоізоляційного екрану рольганга штабового стану гарячої прокатки пояснена кресленнями на рис. 4.1 і 4.2. **На рис. 4.1** показана ділянка рольганга з встановленими секціями теплоізоляційного екрану; **на рис. 4.2** - поперечний перетин секції.

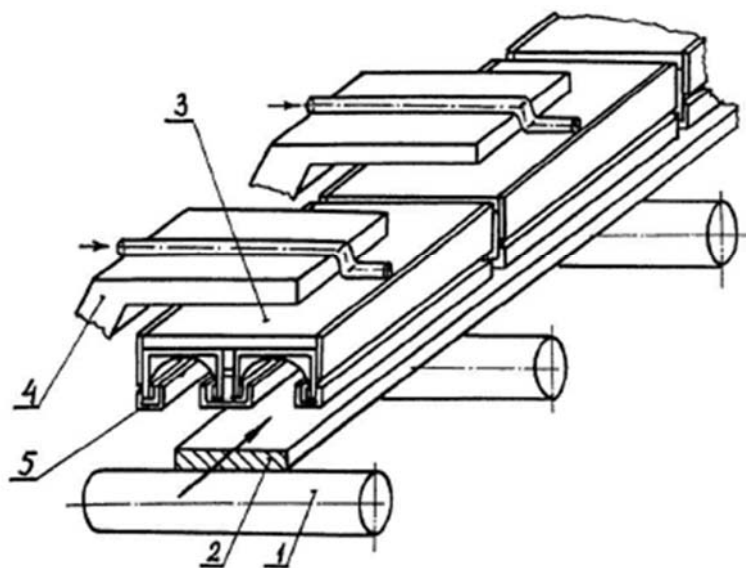


Рисунок 4.1 – Ділянка рольганга з встановленими секціями теплоізоляційного екрану

Над рольгангом 1 (рис. 4.1) штабового стану гарячої прокатки, за яким транспортують гарячий штабовий метал 2, встановлений ряд секцій 3 теплоізоляційного екрану ідентичною конструкції, забезпечених приводом їх переміщення 4 до (від) рольгангу 1; в кожній секції 3 встановлена серія змінних касет 5 ідентичною конструкції.

Кожна секція (рис. 4.2) містить несучу раму 6, на якій на напрямних 7 закріплені касети 5 з можливістю їх заміни. Число касет в секції зазвичай парне (дві, чотири і т.д.), але може бути і одна касета. Це залежить від параметрів штабового стану гарячої прокатки (максимальної ширини штаби, що прокочується на стані). Кожна касета містить корпус 8, до якого через планки 9 болтами 10 прикріплені металеві листи 11, вигнуті у вигляді арки.

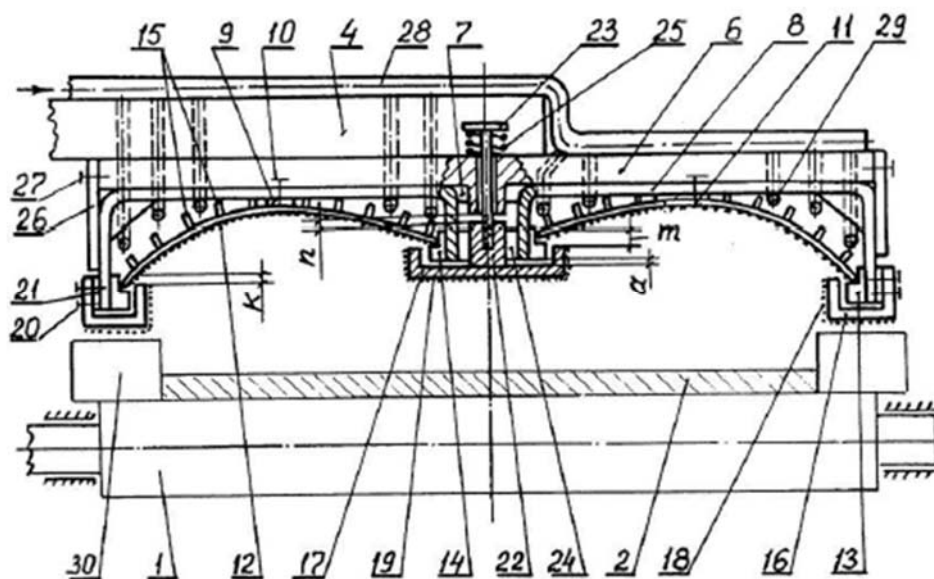


Рисунок 4.2 – Поперечний перетин секції теплоізоляційного екрану

Форма арки може бути симетричною і асиметричною. Останнє залежить від місця установки секції і параметрів штабового стану гарячої прокатки. Листи 11 на увігнутій стороні покриті тонким шаром тепловідбивного матеріалу 12 (на рис. 1.5 показано крапками). Переважно на лист 11 газотермічним способом нанесено алюміній товщиною 0,15 ... 0,25 мм; можлива комбінація алюмінію, нікелю, хрому та інших металів, але в межах зазначених товщин. Лист 11 з нанесеним тепловідбивним матеріалом 12 утворює тепловідбивний елемент касети 5. Лист 11 боковими краями вільно лежить на ребрах 13 і 14, приварених до корпусу касети 8, не входячи в контакт з цим корпусом. По зовнішній поверхні листа 11 (сторона, звернена до корпусу касети) можуть бути розташовані ребра 15, які орієнтовані вздовж рами секції (у напрямку руху металу 2). Таким чином, по всьому периметру тепловідбивного елемента (листа 11) передбачений повітряний зазор, що виключає контакт цього елемента з корпусом касети 8. Бічні кромки листа 11 разом з ребрами 13 і 14 закриті додатковими коритоподібними балками 16 і 17, зовнішня сторона яких покрита тонким шаром тепловідбивного матеріалу 18 і 19 відповідно (на рис. 4.1 показано крапками). В кінцевому підсумку балки 16 і 17 утворюють в конструкції секції додаткові тепловідбивні елементи, що оберігають конструкцію від прямої взаємодії променів від гарячого металу. При цьому балка 16, яка закриває кромки листа 11 із зовнішнього боку секції екрану, встановлена з повітряним зазором щодо листа 11 (розмір K на рис. 4.1) і корпусу касети 8 і закріплена на корпусі 8 болтами 20 через ребра 21. Балка 17, що закриває кромки листа 11 і корпусу 8 двох протилежно встановлених по ширині секції касет 5, встановлена з повітряними зазорами a і m щодо корпусу касети 8 і листа 11 відповідно. До балки 17 з внутрішньої її сторони приварена траверса 22, яка за допомогою болтів 23 підвішена до несучої рами 6. Крім того, між траверсою 22 і корпусом касети 8 передбачено наявність ребр 24. Між болтами 23 і рамою 6 встановлені

пружини 25. Кріплення балки 17 виконано таким чином, що розмір $n < a$ і $n < m$. Із зовнішнього боку секцій 3 касети 5 кріпляться за допомогою пластин 26, прикріплених болтами 27 до несучої рами 6. Складовою частиною конструкції секцій теплоізоляційного екрану може бути труба 28, закріплена на рамі 6, з можливістю підведення по ній стисненого повітря (рис. 4.1 і 4.2 показано стрілками). Вихідні отвори труби 28 розташовані на рівні повітряного зазору між листом 11 і корпусом касети 8 і орієнтовані уздовж рами секції. На рольгангу штабового стану гарячої прокатки, де встановлені секції екранів, можуть бути встановлені напрямні лінійки 30. Секції виконані і розташовані симетрично щодо поздовжньої осі рольганга.

Секція теплоізоляційного екрану рольганга штабового стану гарячої прокатки працює наступним чином.

Гарячий штабовий метал 2 по рольгангу 1 транспортують під рядом ідентичних секцій 3 так (рис. 4.1), що поздовжня вісь штаби приблизно збігається з центральною віссю встановлених над рольгангом секцій теплоізоляційного екрану. Відбувається променистий теплообмін між гарячим металом 2 і тепловідбивним шаром 12 на листах 11 і тепловідбивним шаром 18 і 19 на балках 16 і 17 відповідно (рис. 4.2). Завдяки низькому ступеню чорноти зазначених тепловідбиваючих шарів (для алюмінію, нанесеного газотермічним способом на чорний метал, ступінь чорноти знаходиться на рівні 0,2 ... 0,25) основна частина променевої енергії гарячого металу відбивається і тим самим екран виконує теплоізоляційні властивості: знижує охолодження металу при знаходженні на рольгангу.

При цьому ефект збереження тепла гарячим металом 2 залежить не тільки від ступеня чорноти тепловідбиваючих шарів 12, 18 і 19, а й від висоти їх розташування щодо рольганга 1. Чим ця висота менше, тим ефект екранування вище.

У свою чергу висота розташування секцій теплоізоляційного екрану залежить від умов проходження гарячого штабового металу 2 по рольгангу 1.

Після виходу з чорнової групи клітей можливе пересування штабового металу по рольгангу з надмірно піднятою над рольгангом передньою частиною штаб, що не виключає удару переднього кінця штаб по секції екрану. Останнє небажано, оскільки може зруйнувати секцію екрану.

На виході в чистову групу клітей, точніше перед летючими ножицями, для більш точного орієнтування штабового металу 2 щодо поздовжньої осі рольганга 1 застосовують напрямні лінійки 30. Так як ширина прокатої штаби 2 на стані може бути різною, то і положення, займане лінійками 30 на рольгангу 1, є різним, в тому числі таким, яке показано на рис. 4.1 (де представлений випадок максимальної ширини штабового металу).

Зазначене зумовлює розташування нижньої частини секції екранів щодо рольганга на рівні 270 ... 300 мм в районі перед летючими ножицями і 300 ... 350 мм в районі виходу штабового металу 2 на рольганг 1 після чорнової групи клітей.

Додатково до зазначеного при визначенні умов роботи секцій теплоізоляційного екрану необхідно враховувати, що час їх теплової взаємодії з

гарячою штабою 2 в районі виходу штаб з чорнової групи клітей приблизно в 2 ... 7 разів менше в порівнянні з ділянкою рольганга 1 перед чистової групою клітей (перед летючими ножицями).

Перераховані різні умови експлуатації секцій теплоізоляційного екрану, встановлені на різних ділянках одного і того ж рольганга штабового стана гарячої прокатки, диктують дещо різні вимоги до елементів його конструкції. При цьому природно загальне конструктивне виконання секцій теплоізоляційного екрану має бути однаковим.

Загальне конструктивне виконання секцій теплоізоляційного екрану включає: аналогічність механізму приводу секцій до (від) рольгангу через елемент 4; аналогічність конструкції несучої рами 6 і, відповідно, кріплення до неї на напрямних 7 касет 5; змінність касет 5 і змінність в касетах 5 листів 11 у міру потемніння тепловідбивного шару 12; можливість заміни балок 16 і 17 у міру їх зносу (пошкодження через удар штаб або потемніння тепловідбивних шарів 18 і 19); максимальне вилучення контакту листів 11 і балок 16 і 17 з корпусом касети 8 і рамою 6 секцій (наявність зазначених зазорів, що становлять істотну відмінну ознаку пропонованої конструкції секцій).

У місці виходу штабового металу 2 на рольганг 1 після чорнової групи краще мати симетричну форму арки листа 11, так як інше виконання призводить до збільшення висоти розташування основної тепловідбивної поверхні 12 щодо гарячої штаб 2, тим самим знижується ефективність її теплоізоляції. У разі удару переднього кінця штаб по балці 17 перш за все замикається зазор n і удар через траверсу 22 передається на раму 6. Так як $n < a$ і $n < m$, в цьому випадку не ушкоджуються ребра 14 і 24 і виключається контакт балки 17 з листом 11, не пошкоджується теплоізоляційний шар 12. Пружина 25 амортизує зусилля, що виникають при поверненні балки 17 після удару в початкове положення.

В районі знаходження гарячого штабового металу 2 перед летючими ножицями краща асиметрична форма арки листа 11 (див. рис. 4.2). Асиметричним відповідно прийнято виконання по висоті бічних ділянок корпусу касет 8. Таке виконання, по-перше, частково зменшує висоту розташування тепловідбивної поверхні 12 щодо гарячої штаб 2, по-друге, зменшує розсіювання променевої енергії, що виходить від гарячої штаби, за межі секцій екранів. В цілому посилюється ефект теплоізоляції гарячого штабового металу 2 на рольгангу 1.

При будь-якому виконанні тепловідбивних поверхонь 12, 18 і 19 частина тепла, що виходить від поверхні гарячої штаб 2, акумулюється в листах 11 і балках 16 і 17. Чим нижчий ступінь чорноти цих поверхонь і чим довше взаємодія штаб 2 і секцій екранів, тим вище розігрів листів 11 і балок 16 і 17. Реально при розглянутих умовах взаємодії температура цих частин секцій може досягати 300 ... 500°C. При цьому більш високі значення температури притаманні секціям, розташованим на ділянці рольганга перед летючими ножицями.

Наявність в конструкції касет 5 повітряного зазору між листом 11 і корпусом касети 8 по всьому контуру цього листа (контакт з корпусом касет 8 виконаний тільки через ребра 13 і 14, число яких не перевищує 3 – 4 - х на одну сторону контакту) дозволяє максимально уникнути передачі тепла від листів 11

на корпус касет 8. Аналогічно завдяки ребрам 21 і 24 запобігається передача тепла від балок 16 і 17 на корпус касет 8. У кінцевому наслідку несуча рама 6 секції теплоізоляційного екрану ізольована від тепла гарячого металу, що проходить під нею, тим самим запобігається деформація конструкції секції через її розігрів.

В результаті променистого теплообміну з гарячим металом в листах 11 і балці 17 акумулюється тепло, відбувається їх розігрів. Найбільш істотний розігрів цих частин касет на ділянках тривалої взаємодії секцій з гарячим металом (наприклад, в районі установки летючих ножиць). Цей розігрів небажаний для тепловідбивача, так як інтенсивно знижує тепловідбиваючі властивості шарів 12, 18 і 19 і тим самим сприяє ще більшому розігріванню листів 11 і балки 17. У кінцевому підсумку ефективність роботи теплоізоляційного екрану різко знижується, конструкція по суті стає непрацездатною.

На ділянках рольганга з короткочасною взаємодією секцій з гарячим металом в листах 11 і балці 17 акумулюється відносно менша кількість тепла і можуть не створюватися будь-які додаткові заходи щодо відведення цього тепла (наприклад, в разі застосування секції екрану в чорновій групі клітей).

Але в основному в конструкції касет 5 застосовують листи 11 з ребрами 15, виконаними на поверхні листа 11, зверненими до корпусу касет 8. Тим самим збільшується тепловідвід від листів 11. При цьому зазначені ребра 15 розташовують уздовж рами секції, що сприяє, по-перше, кращому обтіканню теплоносія (повітря) щодо листів 11, по-друге, покращується видалення повітряної окалини з поверхні листів 11.

У місцях рольганга з тривалою взаємодією секцій з гарячим металом для відводу тепла від листів 11 і балки 17 обов'язково використовують стиснене повітря, що подають по трубі 28, вихідні отвори 29 якої розташовані на рівні повітряного зазору між листом 11 і балкою 17 і корпусом касети 8. Стиснене повітря омиває ребра 15, лист 11 і траверсу 22, тим самим відводиться тепло, акумульоване в зазначених елементах конструкції секції. При цьому повітря омиває також корпус касети 8, що додатково зменшує ймовірність розігріву конструкції секції в цілому.

Зазначене застосування повітря в конструкції секції, як вже зазначено, дозволяє також видаляти окалину, що осідає у вигляді пилу на поверхні листа 11 із зовнішнього боку від гарячого металу. Тим самим усувається екрануюча дія окалини, що осіла на лист 1, тобто додатково запобігається розігрів цих листів.

Таким чином, застосування запропонованих секцій теплоізоляційного екрану штабового стану гарячої прокатки дозволяє мати установку з високим ефектом зниження втрат тепла металу, надійно працюючи на різних ділянках рольгангу стану. При цьому високої надійності в роботі досягають завдяки наявності повітряних зазорів між тепловідбивними елементами, корпусом касети і рамою секції. Високого ефекту екранування в конструкції додатково досягають завдяки збереженню екранами тепловідбивних властивостей, яке забезпечують виконанням на зовнішньої від гарячого металу поверхні тепловідбивних елементів ребр і можливістю підведення в повітряний зазор між

тепловідбивними елементами і корпусом касети стисненого повітря. При цьому в повній мірі використовується дуже важлива властивість тепловідбивних екранних установок – ефект безінерційності в збереженні тепла гарячим штабовим металом.

4.2 Індукційний підігрів

Для Чепецького механічного заводу розроблений технічний проект штаб також комбінованого нагріву (індуктор плюс піч опору) мірних заготовок з титану і цирконію із забезпеченням точності нагріву $\pm 7^{\circ}\text{C}$.

Для цього ж заводу розпочато підготовку до роботи з модернізації індукційних печей для нагріву злитків з титану і цирконію діаметром до 450 мм і довжиною до 2-х метрів.

Метод комбінованого нагріву можна рекомендувати, замість чисто газового нагріву, також при нагріванні сталевих слябів і великих заготовок перед прокаткою. Зниження температури підігріву заготовок в газових печах до 750°C з подальшим ефективним підігрівом до температури прокатки в індукторах дозволяє скоротити в кілька разів довжину нагрівального обладнання і час нагрівання, знизити втрати металу на окалину, істотно підвищити працездатність печей, збільшити міжремонтний період.

На багатьох металургійних заводах Європи, Америки, Японії та інших країн вже понад 10 років успішно вирішується надзвичайно актуальне завдання розширення сортаменту листопрокатних станів і підвищення якості штаби з середньовуглецевих і трансформаторних сталей. Індукційні нагрівачі, що вбудовуються в лінії листопрокатних станів, забезпечують можливість підігріву підкату на $150 \dots 250^{\circ}\text{C}$ перед чистовими клітьми, що дозволяє отримувати штабу зі зменшеною товщиною прокату і підвищувати її якість (рис. 4.3).

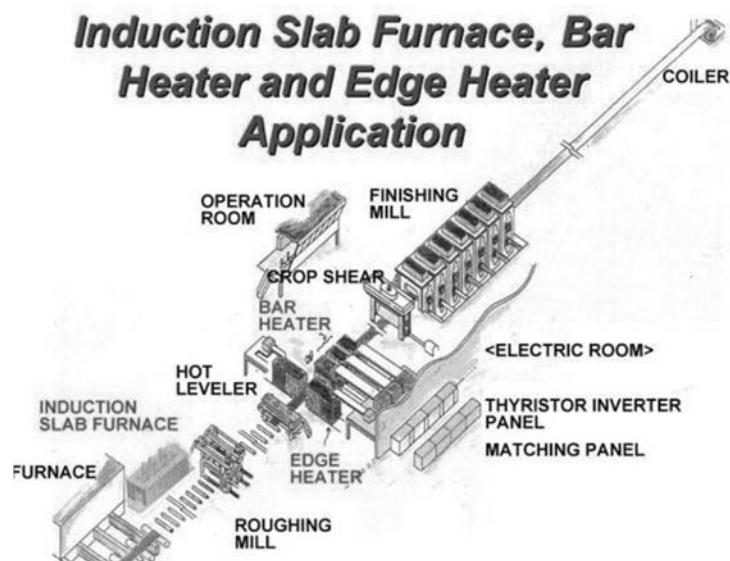


Рисунок 4.3 – Схема листопрокатного стану з індукційним підігрівом підкату

Японська фірма TMEIC створила, починаючи з 1998 року, понад 12 індукційних печей потужністю від 17 до 46 МВт для підігріву підкату в лініях прокатних станів на замовлення Японії, Кореї, Китаю і Тайваню.

Особливо ефективно проявляється можливість підігріву трансформаторних сталей, тому що при цьому з'являється можливість домогтися такої структури сталі, при якій відбувається зниження втрат холостого ходу і, відповідно, витрата електроенергії при використанні їх для виготовлення магнітопроводів потужних трансформаторів.

Одночасно з підігрівом всього перетину підкату можливий підігрів тільки кромek, температура яких при підході до чистових клітей, як правило, нижче середини підкату на 50 ... 70°C. Особливо ефективним є застосування підігріву підкату в листопрокатних станах, де підкат отримують не чорною прокаткою слябів, а шляхом безперервного розливання. Подібний стан з успіхом експлуатується в Італії, м. Кремона.

На замовлення НЛМК у ВНІТВЧ виконано моделювання, розрахунок параметрів і ескізне проектування індукційного нагрівача потужністю 64 МВт для підігріву підкату шириною 1880 мм і товщиною 50 мм з продуктивністю 600 т/год. Комбінуючи і оптимізуючи роботу індукторів з поперечним і поздовжнім магнітними полями, вдалося досягти необхідної величини підігріву і точності розподілу температури по перетину підкату (рис. 4.4 і 4.5). На рис. 4.6 наведені ескізні проробки конструкцій індукторів з поздовжнім і поперечними полями, потужність 3 МВт.

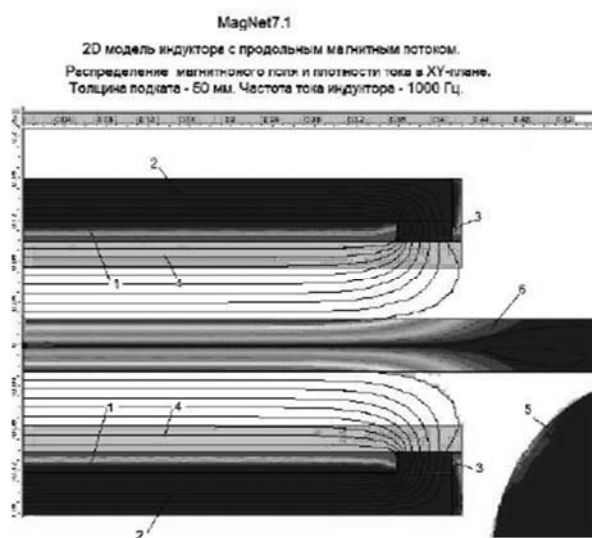


Рисунок 4.4 – Схема нагріву і розподіл магнітного поля в індукторі з поздовжнім полем

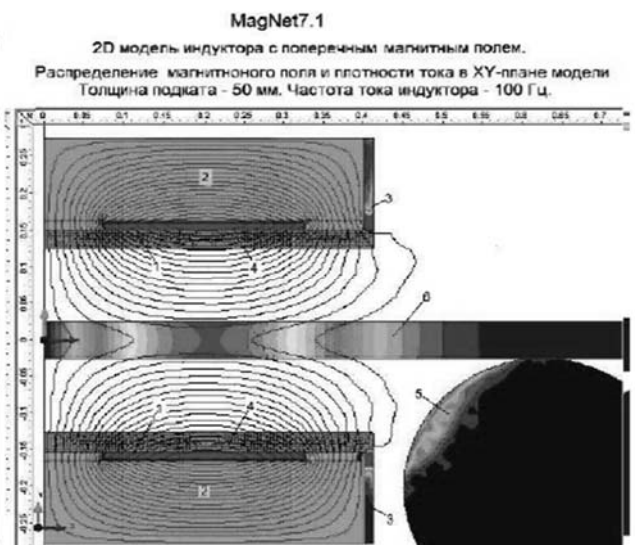
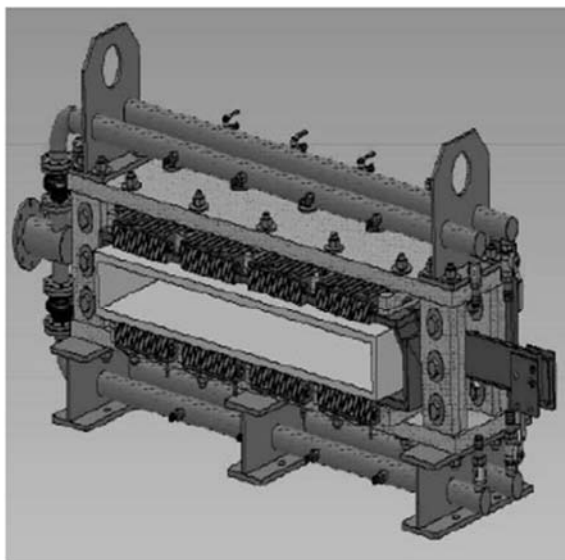
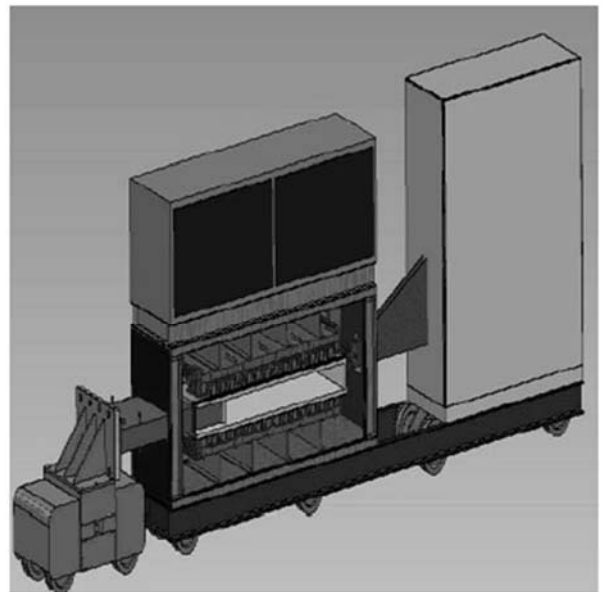


Рисунок 4.5 – Схема нагріву і розподіл магнітного поля в індукторі з поперечним полем



а



б

а – з поздовжнім полем, б – з поперечним полем
Рисунок 4.6 – Ескіз індукторів для нагріву підкату

Моделювання і розрахунки показали теоретичну і практичну можливість реалізації подібного проекту.

Безумовно, набагато більш економічним було б передбачати використання подібних індукційних нагрівачів на етапі розробок нових подібних агрегатів, тому що вбудовування нагрівальних блоків в діючі прокатні агрегати вимагають істотної модернізації їх конструкції.

Контрольні питання

1. Розрахунок тривалості нагрівання товстих заготовок.
2. Передача тепла випромінюванням.
3. Засоби для спалювання рідкого та газового палива.
4. Брак при нагріванні металу.
5. Передача тепла конвекцією.
6. Установки для тепло зберігання. Призначення та особливості рекуператорів та регенераторів.

Література до розділу 4: [5, 7, 12, 13]

5 ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ТА ВІДДІЛКА ХОЛОДНОКАТАНОЇ ЛИСТОВОЇ СТАЛІ

Відділочні операції після холодного прокатування вуглецевої листової сталі виконується в листах або рулонах. У першому випадку потрібна розділка холоднокатаних рулонів на агрегатах, що встановленні за станом холодного прокатування. На них виконують поперечне розрізання рулону на листи мірної довжини. Усі подальші операції відділки (термічну обробку, дресирування та інш.) виконують в листах.

У другому випадку усі відділочні операції після холодного прокатування здійснюють в рулонах масою до 25 т; розділення рулонів на листи є кінцевою операцією.

При холодному прокатуванні листової сталі відбувається зміцнення (наклеп) металу. Для усунення наклепу та отримання структури, що забезпечує необхідні механічні та технологічні властивості листової сталі, холоднокатана листова сталь повинна бути відпалена. В зв'язку з тим, що при холодному прокатуванні вуглецевої листової сталі сумарне обтиснення дорівнює не більше 50 %, звичайною термічною обробкою для такої сталі є рекристалізаційний відпал при температурі 650 – 720°C, який забезпечує достатні механічні та технологічні властивості.

Відпал вуглецевої листової сталі після холодного прокатування є кінцевою термічною обробкою. Його виконують в захисному середовищі, щоб попередити поверхневий шар металу від окислення.

В цехах холодного прокатування для відпалення вуглецевої сталі використовують ковпаків печі: багатостопні та одностопні. Останні отримали більше розповсюдження тому, що мають кращий обігрів, мають меншу масу, що здешевшує будівлю та мостові крани, які використовують для їх обслуговування, мають більш просте завантаження.

Звичайно один нагрівальний ковпак обслуговує 3 – 4 стенда. Нагрівальний ковпак, після того, як посад нагрітий до потрібної температури, знімають та переносять на інший стенд. Такий порядок роботи дозволяє використовувати тепло, що акумульовано у футеровці нагрівного ковпака, для нагрівання нового посаду, що дозволяє збільшити продуктивність нагрівання.

Для прискорення охолодження використовують спеціальні охолоджувальні ковпаки, які розташовують над муфелями після перенесення нагрівального ковпака на інший стенд. Зверху такого ковпака встановлюють вентилятор, який захоплює холодне повітря. При температурі, меншою 300°C для прискорення охолодження використовують воду, яку подають по трубопроводу.

Окрім того, для відпалення листової сталі використовують безперервні печі, що дозволяють прискорити процес виробництва холоднокатаної листової сталі через велику швидкість проходження штаби крізь піч. В безперервних печах рулони розмотуються, кінці їх зварюються і штаба рухається безперервно через піч, де метал нагрівається та охолоджується. По виходу з печі зварні шви вирізають, а штабу змотують в рулони. Великою перевагою безперервного відпалення є те, що штаба має за всією довжиною однакові механічні

властивості, зменшується коробоватість та хвилястість, яка була отримана при холодному прокатуванні.

5.1 Характеристика термічного відділення цеху холодної прокатки ЦХП–1 комбінату «Запоріжсталь»

Термічне відділення цеху холодної прокатки № 1 (ЦХП–1) комбінату «Запоріжсталь» призначено для світлого рекристалізаційного відпалу щільнозмотаних холоднокатаних рулонів. Відділення включає до свого складу 16 блоків печей. У складі блоків 2 – 12, 17 – 19 входить по 15 стендів, 6 нагрівальних ковпаків, 15 муфелей, комплект конвекторних кілець. Стенди блоків №2 і №19 обладнані вдосконаленими направляючими апаратами, крилатками і кільцями. До складу блоків №15, №16 входить по 21 стенду, 8 нагрівальних ковпаків, з 21 муфелем і комплектом конвекторних кілець.

Рекристалізаційний відпал застосовується для зняття наклепу з холоднокатаного металу і відновлення його пластичних властивостей. Приймання металу з прокатного відділення в термічне проводиться комплектно, строго по замовленням, по ваговим відомостям з додатком картки (партії) на кожен рулон. Рулони металу, що приймаються на відпал, повинні відповідати таким вимогам:

- мати щільно прилягаючі зовнішні і внутрішні витки;
- не мати звисаючих кінців;
- повинні бути щільно змотані без телескопічності і виступів окремих витків більше 15 мм;
- кожен рулон повинен бути перев'язаний окремою стрічкою;
- мати чітке маркування;
- бути очищеним на стані перед змотуванням від емульсії;
- внутрішні витки рулонів товщиною до 1,0 мм зі стана «Тандем» повинні бути закріплені скобою по всій ширині штаби.

Як відомо, властивості міцності маловуглецевої сталі пов'язані з величиною зерна: чим дрібніше зерно, тим вище межа плинності і твердість металу, а відносно подовження нижче. Ковпаківій печі, як садочному агрегату, властива нерівномірність нагрівання. Якщо навіть в результаті надзвичайно тривалої витримки вдалося б досягти абсолютно однакової температури у всіх точках садки, то і це не дозволило б отримати рівномірності властивостей металу. При відпалі у ковпаківій печі садка отримує тепло зовні, а при охолодженні, віддає його в зворотному напрямку. Тому нагріта частина металу, що відпалюється, знаходиться протягом більш тривалого часу в інтервалі температур відпалу, ніж найхолодніша. Це положення при відпалі змотаних рулонів не може бути виправлено ніякими конструктивними або технологічними заходами. В результаті при відпалі в ковпаківіях печах неминує деяке розходження в структурі, а отже, і у властивостях металу різних частин садки.

У зв'язку з цією особливістю відпалу металу у ковпаківіях печах, в ГОСТах (ДСТУ) та технічних умовах задають допустимі межі коливання властивостей для кожного виду відпалюємого металу залежно від його призначення. У

відповідності з цими межами коливання властивостей металу, слід розробляти режим його термічної обробки і головним чином вибирати допустимий кінцевий перепад температур в садці при закінченні нагрівання і витримки. Задаючи режим термічної обробки, слід мати на увазі також режим холодної прокатки (ступінь обтиснення) і неминучі втрати пластичності металу при обробці (дресуванні, різанні, покритті тощо).

5.2 Одностопні газові ковпакові печі

Для відпалу металу у відділенні встановлені одностопні газові ковпакові печі. Печі згруповані в блоки, у відділенні 16 блоків печей.

Для прискорення процесу охолодження під муфелем у відділенні використовуються ковпаки прискореного охолодження (КПО). Для видалення продуктів згоряння кожен блок має систему боровів, прийомні патрубки (по два на кожен стенд) і, для посилення тяги, димову трубу висотою 25 – 32 м з ежекторами біля основи.

Газові ковпакові печі опалюються природнім газом. Тиск газу в цеховому колекторі не менше 80 кПа. (0,8 атм.): оптимальне значення в умовах стабільного завантаження відділення 0,85 – 0,9 атм., а в умовах різкого зменшення кількості ковпаків 0,90 – 0,95 атм.

В якості паливо – спалювальних пристроїв на ковпаках блоків 2 – 12 встановлено по 8, а на ковпаках блоків 15 – 19 – по 8 або 12 інжекційно - атмосферних пальників, розташованих тангенціально в один ярус в нижній частині нагрівального ковпака.

Продукти згоряння з-під нагрівального ковпака по двом димовідвідним трубам, обладнаним повітряними ежекторами, віддаляються в систему боровів і далі в димову трубу.

Повітря на ежектори подається від вентиляційної станції цеху з тиском в колекторі 3 – 4 кПа.

На печах блоків 2 – 4 і 15 – 19 застосовується безежекторна система - тяга створюється димовою трубою.

Між димовідвідними трубами нагрівального ковпака і димоприймальними патрубками боровів є розрив, що забезпечує незалежність тиску під нагрівальним ковпаком від розрідження в димопровідній системі.

Для зменшення підсосу повітря з навколишнього середовища в димопровідну систему на прийомних патрубках стендом передбачені відкидні кришки, які повинні бути закриті за відсутності на стенді працюючого нагрівального ковпака.

Муфель, виготовлений з жаростійкої сталі, забезпечує герметичність садки рулонів і тим самим захищає метал від окислюючої дії пічних газів. Матеріал муфеля сталь марок 12X18H10T, 25X14Г14C2Ю.

Технічна характеристика газової ковпакової печі

Максимальна витрата газу на один ковпак, м³/год:

для 8 – пальникового ковпака	62 – 68
для 12 – пальникового ковпака	90–100

Максимальна витрата газу на один пальник, м ³ /год	8,4
Максимальна витрата повітря для двох ежекторів, м ³ /год	400
Теплотворна здатність природного газу, ккал/м ³	8000
Мінімальний тиск захисного газу перед печами, кПа	0,6
Тиск природного газу, атм	0,8–0,95
Загальна кількість димових газів після ежекторів, м ³ /год:	
для 8 - пальникового ковпака	1300
для 12 - пальникового ковпака	1900
Максимальна кількість продуктів згоряння, м ³ /год:	
для 8 - пальникового ковпака	900
для 12 - пальникового ковпака	1500
Витрата захисного газу на один стенд, м ³ /год	8 – 15
Витрата води на охолодження двигуна, м ³ /год	2 – 2,5

Схема печі і охолоджуючого ковпака представлені на рис. 5.1. і 5.2.

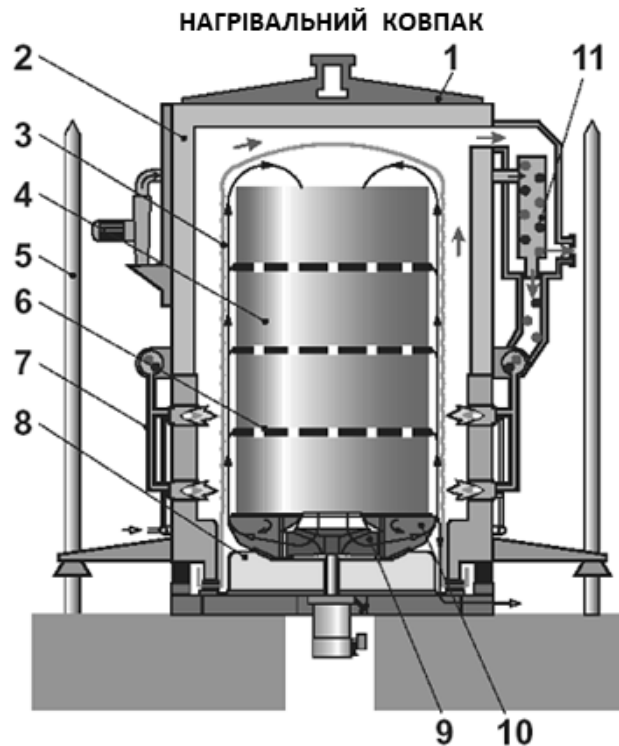
Між рулонами і на опорну плиту направляючого апарату укладаються конвекторні кільця, щоб забезпечити інтенсивну теплопередачу між захисним газом і торцями рулонів. Зверху стопа рулонів закривається спеціальною кришкою.

Ковпак прискореного охолодження являє собою зварену металоконструкцію з вуглецевої сталі, циліндричної форми, з встановленими в нижній частині ковпака в спеціальних каналах трьома електроventильторами для інтенсифікації потоку охолоджуючого повітря, що омиває муфель печі. Вимірювання і регулювання температур в системі печі і садки проводиться за допомогою стаціонарної хромель - алюмелевої термопари і електронного потенціометру типу ФШЛ – 502.

Термопара для регулювання температури металу (стендова термопара) встановлена в спрямовуючий апарат. Робочий спай її виводиться до рівня нижнього конвекторного кільця. Термопара за допомогою компенсаційного дроту приєднується до одного з електронних потенціометрів (дванадцятикраткові прилади з прив'язкою до стендів), встановлених на щитах КВП в приміщеннях КРП. Регулювання температури в системі печі і садки здійснюється двопозиційним регулятором шляхом зміни подачі газу на пальники по сигналу стендової термопари.

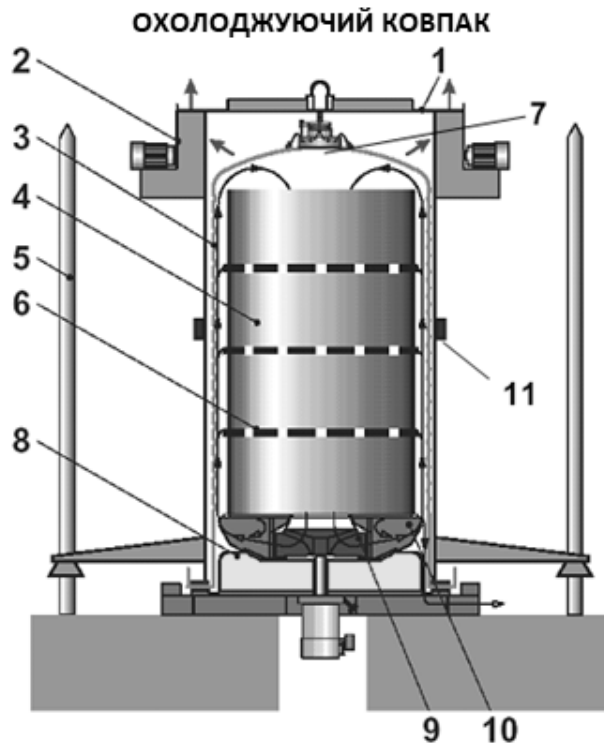
Нагрівання металу відбувається при справно працюючих пальниках і здійснюється: тепловипромінюванням від нагрітої стінки муфеля, конвекцією від циркулюючого захисного газу.

Циркуляційний вентилятор направляє захисний газ в простір між стінкою муфеля і стопою металу, де газ нагрівається від стінки муфеля, піднімається вгору і, проходячи через конвекторні прокладки (кільця), нагріває торці рулонів, а потім опускається вниз. Така подача тепла є найбільш сприятливою, так як теплопровідність рулону в радіальному напрямку через прошарок повітря між витками значно (приблизно, в 10 разів) менше, ніж в напрямку осі.



1 – корпус печі; 2 – футеровка; 3 – муфель; 4 – садка; 5 – направляюча стійка; 6 - конвекторне кільце; 7 – трубна розводка печі; 8 – стенд; 9 – стендовий вентилятор; 10 – направляючий апарат; 11 – рекуператор

Рисунок 5.1 – Ковпакова піч типу HOg 170-535 St-H2-B фірми «Ебнер»



1 – корпус охолоджуючого ковпака; 2 – вентилятор; 3 – муфель; 4 – садка; 5 – направляюча стійка; 6 – конвекторне кільце; 7 – водяний душ; 8 – стенд; 9 – стендовий вентилятор; 10 – направляючий апарат; 11 – розбризкувач

Рисунок 5.2 – Охолоджуючий ковпак ковпакової печі фірми «Ебнер»

Режими термічної обробки (температура і тривалість нагрівання, витримки, охолодження) холоднокатаних рулонів сталі марки 08КП наведена нижче.

ГОСТ	16523-97
Група (клас) точності	K260B
Тривалість гарячої продувки, кВт·год	10
Ширина штаби, мм	1200 – 1350
Вага рулону, т	11,5 – 14,0
Температура відпалу (товщина 0,9 – 2,0 мм), °C	710
Тривалість витримки зі стенової термопари, год	8 – 13
Загальна тривалість відпалу не менше, год	25
Тривалість охолодження, не менше, год:	
– зимовий період/літній період	42/44
Температура розпаковування, не більше, °C:	
– під муфелем/під охолоджувальним ковпаком	140/140

5.3 Захисна атмосфера

Термічна обробка холоднокатаного металу, проводиться в спеціальній захисній атмосфері, що оберігає поверхню металу від окислення і знеуглецювання.

Печі термічного відділення працюють на HNx – газі. Цей газ виробляється на газозахисній станції на агрегатах 400 ПКН.

Виробництво захисного газу регламентується технологічною інструкцією І 236-3-12-2000.

Вихідним продуктом для одержання захисного газу на центральній станції, є природний газ, який спалюється в спеціальній камері з коефіцієнтом надлишку повітря 0,90 – 0,95, з подальшим очищенням продуктів горіння від CO_2 шляхом промивання їх розчином моноетаноламіна в спеціальному апараті – скрубєрі, очищенням продуктів горіння від CO в конверторі поличного типу з очищенням захисного газу від H_2O в загальностанційних системах осушення.

Система осушення газу холодом призначена для осушення газу шляхом його охолодження від 35 °C до 4 °C з подальшою адсорбційним осушенням газу до температури точки роси (т.т.р.) мінус 60°C. Блок осушення газу включає в себе два адсорбера, заповнені цеолітом.

Виробництво захисного газу відбувається з використанням технічного азоту, який додається в повітря, що горить, і в агрегати до установок очищення продуктів горіння від CO .

Склад HNx – газу, що виробляється агрегатами, наступний:

$\text{CO} \approx 0,1 \%$;

$\text{CO}_2 \approx 0,1 \%$;

H_2 - 4,0 – 5,2 % із забезпеченням в колекторі не менше 5,0 %

$\text{O}_2 \approx 0,001 \%$

N_2 – інше.

Захисний газ до стендів газових одностопних печей підводиться в двох місцях. По одній трубі основна кількість захисного газу підводиться під скоси направляючого апарату. Інша труба підводить захисний газ в порожнину між верхнім фланцем і валом вентилятора для уникнення підсосів по валу вентилятора. Газ з під муфеля видаляється через вихлопну трубу на стенді, з'єднану з димоходом. Тиск захисного газу під муфелем газової одностопної печі не нижче 0,6 кПа.

Для запобігання знеуглецювання, відпал холоднокатаних рулонів легованих і високовуглецевих марок сталі виробляється тільки на стендах печей, до яких подається суміш захисного і природного газу за допомогою пропорціонувальних пристроїв.

Регулювання додавання природного газу в захисний газ проводиться залежно від фактичної витрати захисного газу на відповідний стенд або групу стендів.

Суміш захисного і природного газів подається під муфель починаючи з холодної продувки. Відразу після зняття ковпака припиняється подача суміші HN_x – газу (до зняття муфеля) з природним газом включається подача HN_x – газу до зняття муфеля.

У разі відпалу рулонів з порушенням газового режиму, всі рулони даного відпалу контролюються на вміст вуглецю (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Дефекти при термічній обробці металу, їх причини та засоби запобігання

Причини браку (дефекту)	Заходи щодо усунення
1	2
Відкладення сажі на поверхні відпаленого металу	
<p>Підвищення вмісту СО у змісті HN_x – газу</p> <p>Окислення металу в процесі нагрівання за рахунок вологості емульсії, кисню під муфелем, що призводять до реакції</p> $3\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C}$ $2\text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$	<p>а) стежити за газоцільністю стенду і патрубків, підвідних і відвідних, захисний газ;</p> <p>б) створювати щільний піщаний затвор</p> <p>в) ретельно перевіряти муфель на герметичність;</p> <p>г) продувку муфельного простору HN_x – газом проводити при тиску захисного газу під муфелем</p>

Наявність емульсії на поверхні	Слідкувати за виконанням строку гарячої продувки
Кольори мінливості	
Нещільність піщаного затвора	Збільшити висоту піщаного затвора, просіяти пісок
Неякісний склад захисного газу (наявність кисню або вологи)	Відрегулювати склад і тиск захисного газу. Перевірити справність магістралей захисного газу, не допускати засмічень патрубків подачі захисного газу
Несправність муфеля	Перевірити муфель на газощільність
Зняття муфеля при температурі металу вище 160 °C	Дотримуватися заданої температури розпакування
Швидкий підйом ковпака після нагріву	Суворо дотримуватися терміну по тривалості підйому ковпака зі стенду
Непросушений стенд	Дотримуватися інструкції з осушення ковпаків і стендів
Злам по кромці	
Зім'ята кромка	Не допускати травмування кромки рулонів при вантажно-розвантажувальних і передавальних операціях
Злипання смуг в рулонах при відпалі	
Висока температура відпалу	Висока температура відпалу
Недостатня шорсткість поверхні смуг, після прокатки	Застосовувати при прокатці валки з насеченою поверхнею
Забруднення і збіднення емульсії	Дотримуватися встановленого складу і жирності емульсії при прокатці, своєчасно очищати емульсійні баки
Великий натяг при змотуванні штаби в рулон на стані	Дотримуватися встановленого натягу при змотуванні штаби в рулон
Використання коробоватих конвекторних кілець	Використовувати тільки справні і рівні конвекторні кільця

Контрольні питання

1. Охолодження поковок.
2. Передача тепла теплопровідністю.
3. Основи проектування полум'яних печей.
4. Термічна обробка поковок та прокату.
5. Теплообмін в печах.
6. Електричні печі прямого нагріву.

Література до розділу 5: [3, 4, 5, 10]

6 ПРИЗНАЧЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

Призначені параметри роботи печі (температура, тиск під склепінням, витрата палива і ін.) вимірюються і підтримуються на заданому рівні за допомогою контрольно-вимірювальних приладів (КВП).

Теплотехнічні прилади підрозділяють на дві групи: перетворювачі (датчики) і вторинні прилади.

Датчик вимірює фізичні параметри печі (тиск, витрату, температуру) і перетворить їх в ЕРС або тиск, або який-небудь інший сигнал, який по лінії зв'язку (проводам або імпульсним трубкам) передається на вторинний прилад або регулятор.

Вторинні прилади класифікують за призначенням і характером використання. За призначенням їх підрозділяють на такі, що показують, самописні і інтегруючі. Прилади, що показують, дозволяють відлічити значення вимірюваної величини тільки у момент вимірювання. Самописні прилади забезпечуються пристроєм для запису вимірюваного параметра на діаграмний папір. Вони можуть бути одночасно і такими, що показують. Інтегруючі прилади (лічильники) визначають сумарне значення вимірюваної величини (витрата газу) за той або інший проміжок часу.

По характеру використання КВП підрозділяють на робочі і зразкові (еталонні), призначені для перевірки робочих приладів.

Вторинні прилади характеризують класом точності, що визначає точність або погрішність вимірювання параметра. Клас точності визначається величиною погрішності в показаннях приладу, вираженою у відсотках від максимального значення шкали. Якщо клас точності, наприклад, дорівнює 2, то при максимальному значенні шкали приладу для вимірювання температури, рівної 1000°C, помилка у вимірюваннях буде 20°C. При температурі 100°C помилка у вимірюваннях буде також 20°C, а відносна помилка збільшиться до 20%. Промисловість випускає прилади класів точності 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5.

КВП підрозділяють також по вигляду вимірюваного параметра. Існують прилади для вимірювання тиску, витрати, температури, рівня рідини, складу газової фази і так далі.

6.1 Прилади для вимірювання тиску

Позитивний (вище атмосферного) тиск вимірюють манометрами, а негативний (менше атмосферного) – вакуумметрами.

Одиницею вимірювання тиску є Паскаль (Па). Проте малий тиск або розрідження часто вимірюють в міліметрах водяного або ртутного стовпа.

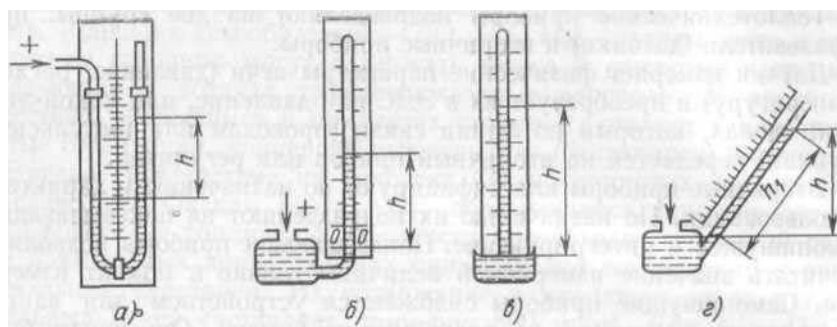
За принципом дії прилади підрозділяють на рідинні і з пружними елементами.

У рідинних мікроманометрах тиск вимірюваного середовища врівноважується тиском стовпа води, спирту або ртуті (рис. 6.1). На рис. 6.1 (а) приведена схема U-подібного скляного мікроманометра. Коліна мікроманометра

можуть бути сполучені з двома місцями відбору тиску в точках газо- або повітропроводу. В цьому випадку різницю рівнів покаже різниця тиску в каналі. Однотрубні мікроманометри (рис. 6.1, б, в і г) мають три основні частини: шкалу, резервуар (чашку) і трубку. Мікроманометр з похилою трубкою (рис. 6.1, г) зазвичай використовують для вимірювання дуже малого тиску або розріджень. Нахил шкали дозволяє значно збільшити ціну ділення шкали. Тиску h відповідає шкала h_1 . Очевидно, що $h_1 > h$.

Рідинні мікроманометри набули поширення в цехах при вимірюваннях надмірного тиску до 10 кПа.

При вимірюванні тиску більше 5,5 кПа зазвичай використовують манометри з пружними елементами, що дозволяють вимірювати тиск до 1000 МПа.



У-подібний; б – однотрубний; у – ртутний; г – з похилою шкалою

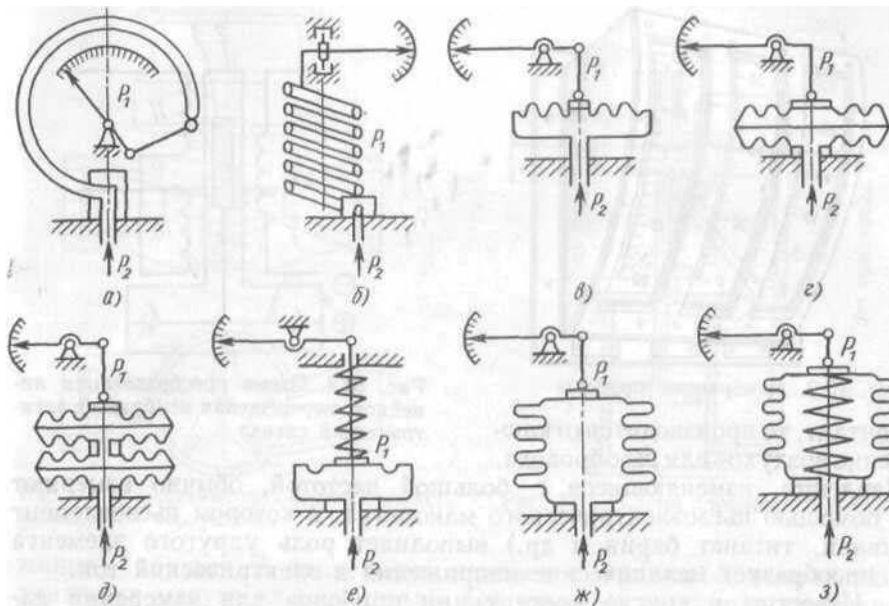
Рисунок 6.1 – Схеми рідинних мікроманометрів:

Принцип дії цих приладів полягає в тому, що сили тиску або розрідження пружно деформують чутливий елемент: пружину, мембрану, сильфон або їх комбінацію. Деформація пружного елемента супроводжується його переміщенням. Спеціальними деталями переміщення чутливого елемента посилюється і передається на вимірювальну частину приладу (рис. 6.2). Чутливими елементами можуть бути одно- і багатовиткові пружини (рис. 6.2, а, б), пружні мембрани (рис. 6.2, в), пружні одинарні і подвійні мембранні коробки (рис. 6.2, г, д), пружини і мембрани (рис. 2, е), сильфони (гофровані тонкостінні трубки) (рис. 6.2, ж), пружини і сильфони (рис. 6.2, з).

Манометри з одновитковою пружиною набули широкого поширення. Вони розраховані на використання при температурі навколишнього середовища від -4 до $+60^{\circ}\text{C}$. Їх випускають такими, що показують, самописними і безшкальними, з вбудованим перетворювачем для дистанційної передачі показів. Пружина в перетині має овальну або еліпсоподібну форму. При підвищенні тиску трубка деформується з еліпсоподібної в круглу. Тому в металі трубки виникає напруження, яке є причиною випрямлення трубки.

Зовнішній вигляд мембранних приладів показаний на рис. 6.3.

Для вимірювання тиску кисню, водню, ацетилену, аміаку і інших газів обов'язково слід використовувати манометри спеціального призначення.



а – одновиткові трубчасті пружини; б – багатовиткові трубчасті пружини; в – пружні мембрани; г – пружні мембранні коробки; д – подвійні мембранні коробки; з – пружинно-мембранні; ж – сільфонні; з – пружинно-сільфонні

Рисунок 6.2 – Схеми пружних елементів

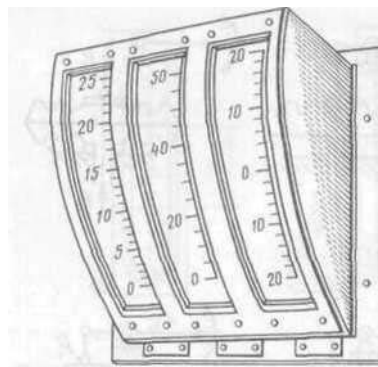


Рисунок 6.3 – Мембранні прилади

На рис. 6.4 показана схема приладу для перетворення перепаду (різниці) тиску в електричний сигнал. Пружна мембрана приладу 1 розміщена у корпусі. Верхня камера, позначена знаком «мінус», забезпечена трубкою 2 з немагнітного матеріалу. Усередині трубки розміщується плунжер з легкого сплаву, сполучений з мембраною. На другому кінці плунжера знаходиться сердечник з магнітного матеріалу 3. Плунжер і сердечник під впливом мембрани можуть переміщатися у вертикальному напрямі усередині диференціально-трансформаторного перетворювача. Перетворювач складається з первинної котушки I і двох вторинних II і III, розташованих симетрично і сполучених зустрічно. При розташуванні сердечника посередині в котушках наводиться струм, рівний по силі, але протилежний по фазі. Тому результуюча напруга буде дорівнювати нулю. Переміщення сердечника під впливом мембрани вгору або вниз супроводжуватиметься наведенням різної напруги у вторинних обмотках.

По величині результуючої напруги можна судити про перепад тиску. Сигнал розбалансу може бути переданий в електронний підсилювач, а з нього на двигун, що приводить в рух регулюючий дросель. Шток може мати кінцеві вимикачі, відповідні максимуму і мінімуму тиску.

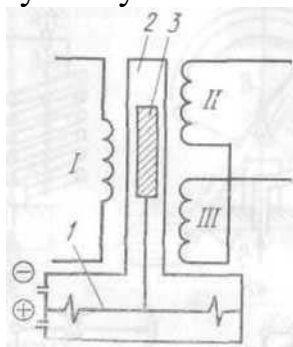


Рисунок 6.4 – Схема перетворення лінійного переміщення мембрани в електричний сигнал

При замиканні максимального контакту двигун за допомогою дроселя зменшує тиск, а якщо буде замкнутий мінімальний контакт, то проводиться відключення воздухо– або газопроводу.

Тиск, що змінюється з великою частотою, зазвичай вимірюють за допомогою п'єзоелектричного манометра, в якому п'єзоелемент (кварц, титанат барію і ін.) виконує роль пружного елементу і перетворює механічну напругу в електричний струм.

Відомі і інші конструкції приладів для вимірювання тиску.

6.2 Прилади для вимірювання витрат рідини і газів

Кількість газу або рідини, що протікають по каналу в одиницю часу, називають витратою ($\text{м}^3/\text{год}$, $\text{кг}/\text{с}$, $\text{л}/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{с}$ і т.д.). Прилади, призначені для вимірювання витрат, називають витратомірами. Якщо прилади проводять підсумовування витрат за який-небудь період часу, то їх називають лічильниками.

Прилади, використовувані в ковальських і термічних цехах, за принципом дії підрозділяють на тахометричні лічильники, витратоміри постійного і змінного перепадів.

В основу вимірювання тахометричними лічильниками закладений принцип вимірювання числа оборотів вертушки або крильчатки, кутова швидкість яких пропорційна швидкості потоку, що протікає через прилад. Їх використовують для вимірювання невеликих кількостей газу або рідини.

Лічильник з вертикальною вертушкою наведений на рис. 6.5. Лічильники використовують для вимірювання витрат води. У литому корпусі 1 розміщені фільтр 2 і струєвипрямляч 3 для стабілізації поля швидкостей потоку. Рухомий потік обертає лопаті крильчатки 4. Обертання крильчатки через передавальний механізм 5 передається на рахунковий механізм 6.

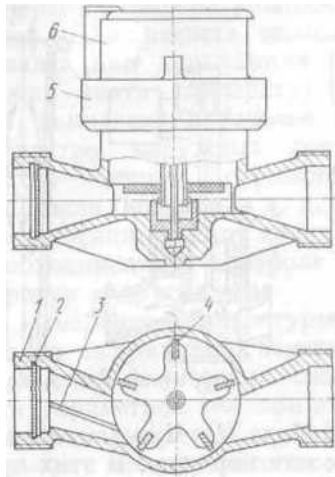


Рисунок 6.5 – Лічильник з вертикальною крильчатою вертушкою

Відомі також лічильники і з горизонтальною вертушкою.

Швидкісні лічильники не можна застосовувати для вимірювання витрати в'язких рідин, наприклад масла або мазуту. Їх витрати вимірюють за допомогою об'ємних лічильників (рис. 6.6). Мазут з магістралі поступає у вертикальний циліндр 1. При крайніх положеннях поршня 2 відбувається зміна краном 3 напрямку руху мазуту з магістралі. Він починає заповнювати вільний простір циліндра, а мазут з другої частини циліндра під впливом поршня витісняється в мережу. Об'єм мазуту, що поступає до печі, буде пропорційний об'єму циліндра і числу ходів поршня.

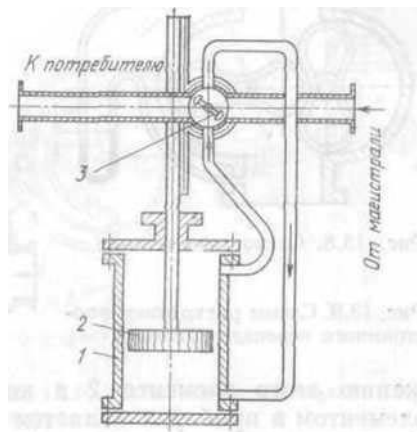


Рисунок 6.6 – Схема поршневого лічильника

Цей же принцип закладений в лічильниках з овальними шестернями для мазуту (рис. 6.7) і ротаційних для газу (рис. 6.8). У першому випадку робочим органом служать овальні шестерні 1, а в другому – дві лопаті у формі вісімок. Потік рідини 2 або газу обертає рухомі елементи, і за один їх оборот вони подають в мережу певний об'єм вимірюваної речовини.

Для вимірювання витрат методом постійного перепаду тиску використовують поплавцеві витратоміри (рис. 6.9, а), поршневі (рис. 6.9, б) і

ротаметри (рис. 6.9, в). Перепад тиску виникає при русі потоку через звужений перетин. Площа цього перетину змінюється відповідно до зміни витрати, а не залишається постійною. Зміна перетину здійснюється за допомогою рухомого чутливого елемента. Про величину витрати судять по положенню цього елемента 2 в корпусі приладу 1. Чутливим елементом в приладах є поплавець або поршень. У цих приладах висота підйому чутливого елемента визначається рівністю сил, що діють на елемент. На нього діють підйомна сила, обумовлена рухом потоку, сили тертя і тяжкості.

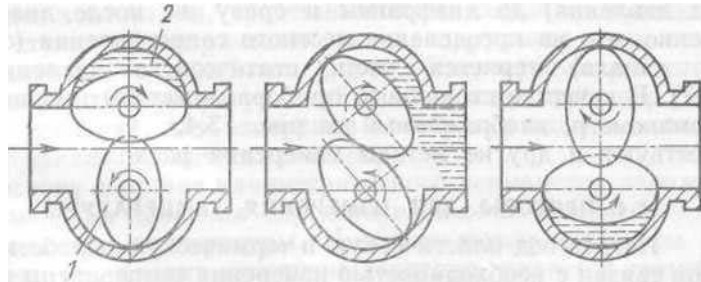


Рисунок 6.7 – Схема шестеренчатого об'ємного лічильника

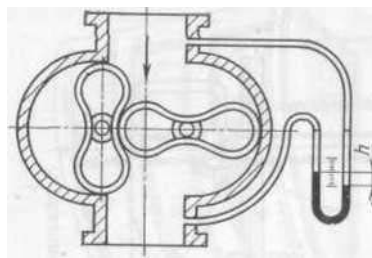


Рисунок 6.8 – Схема газового лічильника

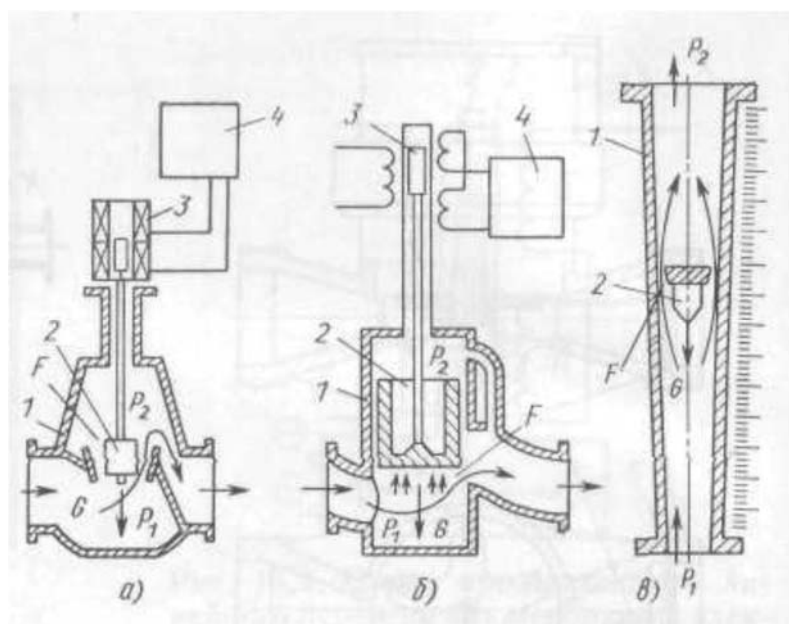


Рисунок 6.9 – Схема витратомірів постійного перепаду тиску

За допомогою диференціально-трансформаторного перетворювача 3 покази лічильника виводяться на реєструючий прилад 4. Поплавкові витратоміри і ротаметри використовують для вимірювання витрат газу. Першими можна вимірювати витрати до 10000 м³/год, а другими до 200–300 м³/год. Поршневі витратоміри зазвичай використовують для вимірювання витрат масла або мазуту.

До приладів для вимірювання витрат методом змінного тиску відносять так звані дросельні прилади (діафрагми або шайби, сопла, труби Вентурі), що набули найбільшого поширення. Суть вимірювань полягає в тому, що усередині каналу встановлюють пристрій, що звужує потік. При проходженні потоку через звуження унаслідок рівняння нерозривності швидкість потоку збільшується, що супроводжується підвищенням динамічного тиску. На підставі рівняння Бернуллі підвищення динамічного тиску повинно супроводжуватися зменшенням статичного тиску. Чим більше витрата, тим більше падіння статичного тиску після звуження. Тому основою вимірювання витрат за цим методом є вимір статичного тиску (перепад тиску) до діафрагми і відразу ж після діафрагми.

Природно, що на подолання місцевого опору (звуження перетину каналу) втрачається частина статичного тиску. Як вторинний прилад може бути використаний і мікроманометр, зображений на рис. 4.

Існують і інші методи вимірювання витрат.

6.3 Прилади для вимірювання температури

Нагрів під пластичну і термічну обробку сталі і сплавів пов'язаний з необхідністю вимірювання температури виробів, що нагрівалися. Регулювання режиму печі пов'язане з необхідністю вимірювання температури пічних газів. Для розрахунку теплового балансу при випробуваннях печі потрібно знати температуру газів, що покидають робочий простір, зовнішніх поверхонь пічних огорож, підігріву повітря і так далі. При експлуатації печі виникає необхідність в контролі температур і інших тіл.

Вимірювання температури засноване на принципах вимірювання зміни фізичних властивостей або параметрів тіл при їх нагріванні (тиск, лінійного розміру, електричного опору, інтенсивності випромінювання).

Прилади, в основу вимірювання температур яких покладено ці принципи, підрозділяють на декілька груп: 1 – рідинні скляні, стрижньові (дилатометричні), біметалічні і манометричні термометри; 2 – термометри опору; 3 – термоелектричні термометри (термопари); 4 – термометри випромінювання.

Не всі групи приладів, перераховані тут, однаково широко використовують в пічній теплотехніці. Тому нижче будуть розглянуті тільки основні прилади, використовувані при контролі і налагодженні теплової роботи печей і вимірюванні температур виробів.

За принципом дії рідинні скляні термометри нічим не відрізняються від звичайних медичних градусників, тобто вони засновані на вимірюванні об'ємного розширення рідин у вузьких капілярах при зміні температури. Межа

вимірювання температур такими термометрами визначається видом рідини, що заповнює капіляр. При заповненні його ртуттю цими термометрами можливо вимірювати температуру з -30 до $+600^{\circ}\text{C}$. Промислові термометри можуть мати не тільки прямолінійну форму. Їх часто забезпечують спеціальними оправами для захисту від механічних ушкоджень. Іноді термометри забезпечують максимальними і мінімальними контактами, що є дротами, упаяними в скло. Електричний сигналізуючий ланцюг замикається або розмикається стовпчиком ртуті. Ці термометри використовують для вимірювання температур вільних кінців термопар, в лабораторних умовах, для вимірювання температур води і масла в гартівних ваннах термічних цехів.

В основу дії манометричного термометра закладений принцип зміни тиску певного об'єму рідини або газу при зміні температури. Чутливим елементом приладу, в якому відбувається зміна тиску, є термобалон 1 (сталевий балон з корозійностійкої сталі, рис. 6.10, а), який сполучений капіляром 2 з манометричною одно– або багатовитковою пружиною 3. Капіляр – сталева або мідна трубка з внутрішнім діаметром 0,35 мм і зовнішнім 2,5 мм. Довжина капіляра змінюється від 0,6 до 60 м, тобто цей прилад дозволяє передавати значення вимірюваної величини на відстань. Зазвичай поперечний перетин манометричної пружини овальний (рис. 6.10, б), але іноді має форму, показану на рис. 6.10, в. Кінець пружини через шарнір 4, повідець 5, сектор 6 сполучений зі стрілкою приладу 7. Межі вимірювання температур цим приладом визначаються видом рідини і газу, що заповнюють систему.

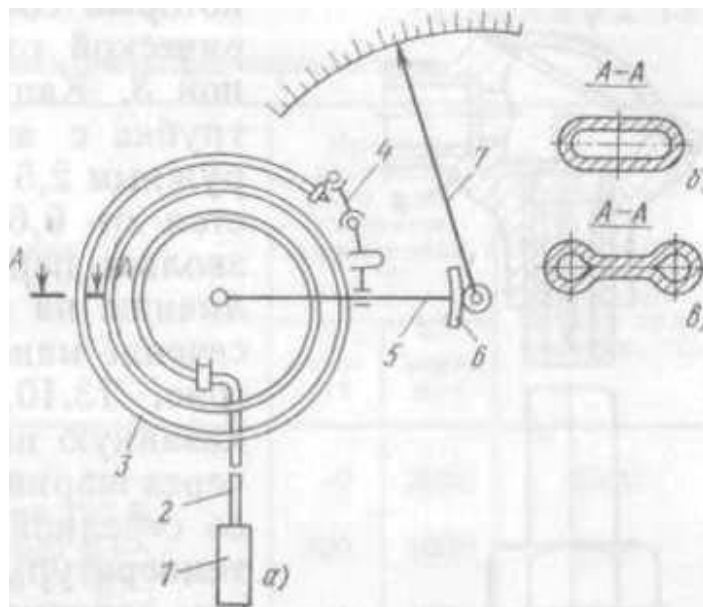


Рисунок 6.10 – Схема манометричного термометра

При заповненні приладу азотом межі вимірювання від -150 до $+600^{\circ}\text{C}$. Прилади випускають різних модифікацій: показуючі, самописні, з сигнальними і регулюючими пристроями. Їх використовують для вимірювання температур води, повітря, газу і так далі.

Іноді вимірювання температур до 600°C виконують електричним термометром опору, в якому використаний принцип вимірювання електричного опору дрітної спіралі з платини або міді.

Електричний опір металів підвищується з підвищенням температури. Тому, знаючи залежність електричного опору чутливого елементу (датчика) від температури, можна судити про температуру середовища, в яке занурений провідник. Вимірювання електричного опору можна проводити з великою точністю і на значній відстані від місця розміщення датчика. Зміна електричного опору пов'язана зі зміною електричної напруги постійного струму у вимірювальному ланцюзі. Ця залежність між опором і напругою може бути використана для автоматичного контролю і регулювання.

Низькі температури вимірюють також за допомогою термометрів опору, проте у вимірювальних схемах замість дрітних спіралей використовують напівпровідники.

Вимірювання температур в інтервалі від -200 до + 2500°C найчастіше проводять за допомогою термоелектричних пірометрів, робота яких заснована на принципі термоелектричного ефекту (термопари). Принцип вимірювання температур полягає в тому, що при нагріванні різнорідних провідників (термоелектродів) в ланцюзі, що утворена провідниками, виникає електричний струм. Електрорушійна сила (ЕРС), що виникає в шарі, пропорційна температурі шару. Вона визначається різницею температур на кінцях провідників, їх складом і не залежить від розмірів термоелектродів (довжини, діаметру), теплопровідності і питомого електроопору.

Матеріал термоелектродів і межі вимірювань температур за їх допомогою приведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Характеристика термоелектричних термометрів

Тип	Градуювання	Матеріал термоелектроду	Межі вимірювання при довгостроковому використанні, °C		Максимальна температура вимірювання при короткостроковому використанні, °C
ТВР	ВР-5/20	Вольфрамрений (5%) – вольфрамрений (20%)	0	2200	2500
ТПР	ПР-30/6	Платинародій (20%) – платинародій (6%)	300	1600	1800
ТПП	ПП	Платинародій (10%) – платина	0	1300	1600
ТХА	ХА	Хромель – алюмель	50	1000	1300
ТХК	ХК	Хромель – копель	50	600	800

Діаметр термоелектродів з благородних металів звичайно 0,5 мм, а з хромеля, копеля і алюмеля – від 0,5 до 3,2 мм. Електроди на робочому (гарячому) кінці скручують і зварюють електричною дугою. Спай 1 і скручування розміщують у фарфоровому наконечнику 2 (рис. 6.11). Вище за скручування їх ізолюють один від одного фарфоровими намистами 3. Для захисту електродів від механічних пошкоджень і хімічної дії вимірюваного середовища їх розміщують усередині сталевій трубки 4 (чохла, кожуха). Зверху чохла знаходиться головка термопари 5 з клемми 6 і кришкою 7.

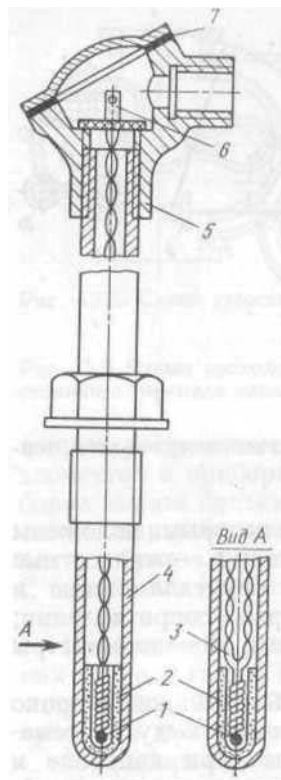


Рисунок 6.11 – Термоелектричний термометр

На величину термо-ЕРС впливає температура вільного кінця. Для зменшення помилок до клем 6 підключають компенсаційні дроти, які при температурах від 0 до 100°C мають такі ж термоелектричні характеристики, як і термопара, що дозволяє перенести вільні кінці термометра безпосередньо до вимірювального приладу.

Вимірювання термо-ЕРС можна здійснити за допомогою мілівольтметра або потенціометра. Перший метод не враховує обов'язкової втрати частини ЕРС на опір електродів і компенсаційних проводів. Другий метод позбавлений цього недоліку, що підвищує точність вимірювання температури. Він полягає в урівноваженні (компенсації) термо-ЕРС з відомою напругою на калібрувальному опорі (реохорді), що дозволяє у момент вимірювання мати у вимірювальному ланцюзі напругу, рівну нулю. Тому виключаються погрешності, пов'язані з впливом температури вільних кінців і падінням напруги в ланцюзі.

Потенціометри підрозділяють на неавтоматичні і автоматичні. Схема неавтоматичного потенціометра приведена на рис. 6.12. Термо-ЕРС врівноважують падінням напруги батареї E на реохорді R_p при переміщенні движка D . Про компенсацію струмів судять по нульовому положенню вимірювального приладу НП. Напругу батареї за допомогою опору R періодично порівнюють з напругою стандартного елемента.

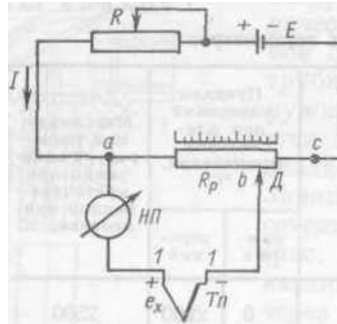


Рисунок 6.12 – Схема неавтоматичного потенціометра

Автоматичні потенціометри набули широкого поширення для вимірювання, реєстрації, сигналізації і автоматичного регулювання температури в печах. На рис. 6.13 приведена спрощена схема автоматичного потенціометра. Сигнал (термо-ЕРС) термоелектричного термометра (ТТ), рівний $E(t_2, t_0)$, порівнюється з компенсуючою напругою U_k , що знімається з діагоналі вимірювального моста ИМ. За наявності дисбалансу в ланцюзі з'являється різниця напруги, яка за допомогою віброперетворювача ВП перетворюється в слабкий пульсуючий змінний струм, який потім посилюється за допомогою підсилювачів напруги і потужності УН і УМ. Посилений сигнал подається на клему реверсивного двигуна РД. Напрямок обертання ротора двигуна залежить від знаку дисбалансу. Тому двигун переміщає движок реохорда в ту або іншу сторону для компенсації напруги, що характеризується нульовим струмом на клемі двигуна і його зупинкою. З ротором двигуна пов'язана стрілка показуючого приладу.

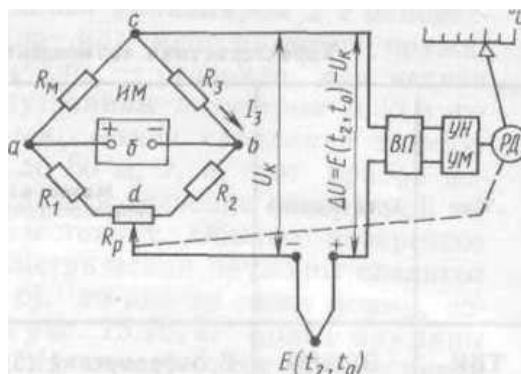


Рисунок 6.13 – Спрощена схема автоматичного потенціометра

Автоматичні потенціометри випускають самописними і такими, що показують. Один потенціометр може послідовно вимірювати і записувати від 1 до 12 показів ТТ. Потенціометри можуть бути регулюючими, з різним часом пробігу шкали стрілкою і так далі.

Вимірювання температури безконтактним методом здійснюють за допомогою оптичних пірометрів на основі використання залежності яскравості або енергії випромінювання нагрітого тіла від температури.

Принцип роботи оптичного пірометра випромінювання (рис. 6.14) заснований на порівнянні яскравості випромінювання нагрітого тіла та ниті електричної лампи 3 при довжині хвилі 0,65 мкм, що пропускається червоним світлофільтром 5. Об'єктив 1 і окуляр 4 прилади для визировання на тіло виконані рухомими. Лампа отримує енергію від батареї 7, напруга якої змінюється реостатом 8 і вимірюється мілівольтметром 6, шкала якого градуйована в градусах міжнародної стоградусної шкали.

Пірометри мають дві шкали. Одна з межамі вимірювання 800 – 1400°C, а друга 1200 – 2000°C. При використанні приладу для вимірювання температур вище 1400°C на шляху променів поміщають додатковий світлофільтр 2, що ослабляє. Вимірювання температур починають з візування приладу на нагріте тіло, а потім за допомогою реостата змінюють яскравість нагрівання до тих пір, поки верхня частина нитки не зникне на тлі нагрітого виробу. Якщо температура нитки вища за температуру тіла, то нить буде яскравішою за фон, що створюється тілом. При підігріві нитки вона буде темнішою за фон тіла, тобто її температура нижче температури виробу.

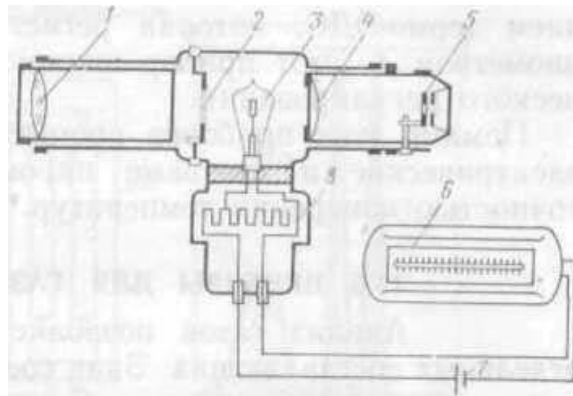


Рисунок 6.14 – Оптичний пірометр

Погрішність вимірювання температур поверхні сталевих виробів при 1200°C складає $\pm 20^\circ\text{C}$, і її величина залежить від ступеню чорноти тіла і ослаблення випромінювання в поглинаючому проміжному середовищі, наприклад в продуктах згорання.

Вимірювання температур від 400 до 2500°C проводять так само радіаційними пірометрами, які реєструють променисті потоки в інтервалі довжин хвиль 0,4 – 2,5 (4) мкм (рис. 6.15). Променистий тепловий потік від

нагрітого тіла 1 концентрується лінзою в пірметрі 2 на чутливому елементі 3, що представляє термобатарею з 10 послідовно сполучених хромель-копелевих термоелектричних термометрів 5. Нагрів батареї супроводжується виникненням термо-ЕРС, яка реєструється автоматичним потенціометром 4. Цей прилад широко використовують в схемах автоматичного регулювання.

Крім цих приладів промисловість випускає також фотоелектричні і кольорові пірметри, що мають підвищену точністю вимірювання температур.

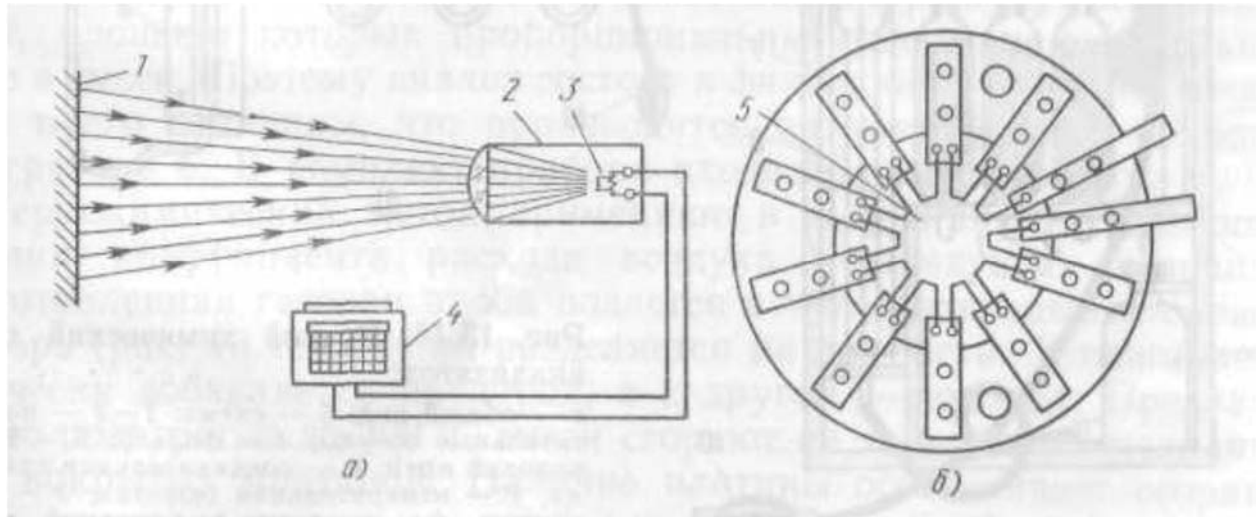


Рисунок 6.15 – Радіаційний пірметр (а), термобатарея телескопу (б)

Контрольні питання

1. Класифікація палива для нагрівальних печей.
2. Тепловий баланс печі.
3. Електричні печі непрямого нагріву.
4. Характеристика рідкого палива.
5. Показники ефективності роботи печі.
6. Індукційних нагрів металу. Сутність процесу.

Література до розділу 6: [3, 6, 8, 9]

7 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

7.1 Визначення окалиноутворення при нагріві сталевих заготовок

Загальні відомості

При нагріві металу в полум'яних печах, окрім процесів, пов'язаних з передачею тепла, відбуваються також процеси хімічної взаємодії між пічними газами і поверхнею металу, що нагрівається. До складу продуктів горіння зазвичай входять вуглекислий газ CO_2 , кисень O_2 , водяна пара H_2O , азот N_2 , а також в невеликих кількостях двоокис сірки SO_2 , оксид вуглецю CO і водень H_2 . При високих температурах кисень, пари води, вуглекислий газ і двоокис сірки можуть окисляти метал. Цей процес є наслідком дифузії кисню з пічних газів до поверхні заготовок, що нагріваються, адсорбції його на поверхні, дифузії реагуючих речовин через шар окалини назустріч кисню і кристалографічних перетворень. При цьому утворюється закис заліза FeO , магнітний оксид заліза Fe_3O_4 і оксид заліза Fe_2O_3 .

На величину кількості окалини (чаду) впливає склад газів, температура і тривалість нагріву, форма і розміри заготовки, хімічний склад металу і інші чинники.

Втрати металу від окислення визначаються декількома кількісними показниками.

1. Вагове окалиноутворення (чад) - кількість металу, що окислився в процесі нагріву і виражена у відсотках від його первинної ваги

$$x = \frac{q_1 - q_2}{q_q} 100\%, \quad (7.1)$$

де q_1 і q_2 – вага заготовки до нагріву і після нагріву і очищення відповідно, *грам*.

2. Поверхневе окалиноутворення – кількість окисленого металу, віднесена до одиниці поверхні заготовки, що нагрівається

$$a = \frac{q_1 - q_2}{S} \text{ грам/см}^2 \quad (7.2)$$

де S – повна поверхня заготовки, см^2 .

3. Швидкість окислення – відношення величини поверхневого окалиноутворення до часу нагріву

$$w = \frac{q_1 - q_2}{S \cdot \tau} \text{ грам/см}^2 \cdot \text{год} \quad (7.3)$$

де w – час нагріву заготовки, *год*.

Мета роботи

Визначення втрат металу від його окислення при нагріві в електричній печі в атмосфері повітря, а також вплив на окалиноутворення тривалість і температури нагріву.

Матеріал, інструмент і устаткування

Заготовки для дослідження процесу окалиноутворення - 2 комплекти по 4 відрізка круглого профілю з вуглецевої сталі діаметром 4-6 мм і завдовжки 60-80 мм.

Електронні ваги з точністю до 0,01 грама.

Електричний нагрівач печі (нагрівальні елементи – ніхромові спіралі або силітові стрижні). Температура печі задається і регулюється за допомогою електронного автоматичного потенціометра. Датчиком регулятора температури служить платинородій - платинова термopapa. Матеріал футерування печі - шамотна цеглина класу А.

Порядок проведення роботи

Чотири заготовки зважити на вагах з точністю до 0,01 грама. Заготовки укласти на шамотні підставки і завантажити в піч. Заготовки і підставки повинні бути пронумеровані.

Температуру печі довести до температури, що декілька перевищує нижній інтервал кувальних температур (приблизно для вуглецевої сталі 850–870 °С). Через кожних 5 хвилин фіксувати температуру нагріву печі і витягувати по одному зразку. Заготівку, що витягується з печі, охолодити у воді для виключення окислення металу при охолодженні на повітрі і очистити від окалини наждачним папером. Після очищення заготівку повторно зважити, результати вимірювань занести до таблиці і визначити кількісні показники за формулами.

Для другого комплекту заготовок весь процес нагріву і вимірювань повторити при максимальній температурі нагріву (приблизно 1200°С). Отримані результати вимірювань занести до таблиці і визначити показники окалиноутворення при максимальній температурі.

Таблиця 7.1 – Результати дослідження окалиноутворення при нагріві сталевих заготовок

Номер заготовки	Вага заготовки до нагріву, грам	Температура нагріву печі, °С	Тривалість нагріву, хвил	Вага заготовки після нагріву, грам	Ваговий угар %	Поверхневий угар, грам/см ²	Швидкість окислення, грам/см ² ·год

Зміст звіту

Вказати тему і мету роботи. Дати коротку характеристику лабораторного обладнання, матеріалу і розмірів заготовок. Стисло викласти суть процесу окалиноутворення і основні його характеристики. Всі експериментальні і розрахункові дані привести в таблиці 7.1.

Побудувати графіки залежностей $x = f(t, \tau)$, $a = f(t, \tau)$, $w = f(t, \tau)$.

Звіт завершити аналізом результатів і висновками.

7.2 Визначення градієнта температур по перетину заготовки і коефіцієнта тепловіддачі металу при нагріві

Загальні відомості

При веденні оптимального технологічного режиму нагріву металів для кування і штампування необхідно уникати утворення тріщин. Причиною тріщиноутворення є внутрішня напруга, обумовлена різницею температур по перетину металу, що нагрівається.

Розглянемо механізм даного процесу. Поверхневі шари металу, нагріті до більш високої температури, ніж внутрішні, розширюються більше, ніж внутрішні. Проте розширення поверхневих шарів пригальмовується сусідніми внутрішніми шарами, які розтягуватимуться за рахунок розширення зовнішніх шарів. В результаті такої взаємодії зовнішні шари металу при нагріві будуть зазнавати стискуючу напругу, а внутрішні – розтягуючу напругу.

Ця напруга, що виникає унаслідок нерівномірного нагріву, називається також температурною напругою. Вона тим більше, чим більше перепад температур в різних частинах матеріалу заготовки або злитка. При певній різниці температур усередині металу температурна напруга може настільки зрости, що перевищить його межу міцності і призведе до утворення тріщин. Це явище особливо небезпечне при швидкому нагріві низькопластичних сталей (наприклад, високовуглецевих і легованих), а також крупних заготовок взагалі. Слід зазначити, що величина внутрішньої напруги залежить не тільки від характеру зміни об'єму металу під впливом температурного розширення, але і від зміни об'єму унаслідок структурних перетворень.

До теплофізичних величин, що характеризують явища, що відбуваються в металі при нагріві, слід віднести теплопровідність, теплоємність і деякі інші, а також коефіцієнт теплопередачі.

Середній коефіцієнт теплопередачі визначається:

$$\alpha = \frac{q \cdot C_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1)}{F \cdot \tau \cdot (t_{\text{печ}} - t_{\text{пов}})}, \quad \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{град}}, \quad (7.4)$$

де q - вага зразка, що нагрівається, кг;

$C_{t_1}^{t_2}$ - середня, в межах t_1 і t_2 теплоємність, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$;

t_1 і t_2 - початкова і кінцева температури зразка при нагріві, °С;

F - бічна поверхня зразка, м²;

τ - час нагріву зразка, год.;

$t_{\text{печ}}$ - середня температура печі, °С;

$t_{\text{пов}}$ - середня температура поверхні заготовки, яка визначається, як середнє арифметичне з показів термопар, встановлених між центром і поверхнею заготовки °С.

Мета роботи

Визначення градієнта температур по перетину заготовок циліндрової форми при нагріві в камерній електропечі.

Визначення середнього коефіцієнта теплопередачі на поверхні заготовки при нагріві.

Матеріал, інструмент, устаткування

Камерна електропеч, апаратура управління процесом нагріву і контролю температури в робочій зоні. Температура в печі регулюється автоматично за допомогою регулятора типу ПРС або аналогічної моделі.

Два мілівольтметри, проградуйовані в °С, для вимірювання температури в двох місцях по товщині заготовки, що нагрівається.

Три термопари (платинородій - платина), одна з яких вимірює температуру печі, а дві інші вводяться в отвори заготовки, просвердлені в двох місцях на різну глибину по її перетину.

Заготівка з вуглецевої сталі розмірами $\varnothing 45-50$ мм, $l = 100-120$ мм.

Пристосування з рукояткою для введення заготовки в піч.

Порядок проведення роботи

Температуру печі встановити регулятором на необхідну величину, при якій повинно відбуватися дослідження процесу нагріву заготовки.

Заготовку зважити і зміряти, після чого її змонтувати на пристосуванні, а в наявні в ній отвори встановити термопари.

По закінченню підготовчих робіт заготовку ввести в піч і зафіксувати час початку нагріву. Через кожні 0,5-1,0 хвил. вести запис температури поверхні і центру заготовки.

Результати вимірювання температури заготовки за її перетином звести в табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Результати вимірювання температури заготовки за її перетином

Час початку дослідів	Температура печі, °C	Температура поверхні заготовки, °C	Температура центру заготовки, °C	Примітки

Після того, як температура центру заготовки порівнюється з температурою печі (або відрізнятиметься від неї не більш, ніж на 20°C), заготовку вийняти з печі і зафіксувати час закінчення нагріву.

Зміст звіту

Вказати тему і мету роботи. Дати коротку характеристику камерної електропечі і матеріалу заготовки. Стисло викласти основні теоретичні положення по роботі. У вигляді протоколу випробувань помістити таблицю результатів вимірювання температури заготовки по її перетину по приведеній формі. За табличними даними температури поверхні і центру зразка побудувати два суміщені графіки $t_{\text{пов}} = f(\tau)$ і $t_{\text{цен}} = f(\tau)$, а також графік $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}} = f(\tau)$. По формулі (2.1) визначити середній коефіцієнт теплопередачі, і його величину порівняти з теоретичним значенням для даної марки сталі. Проаналізувати отримані результати.

7.3 Визначення втрат тепла при транспортуванні заготовки до ковальського агрегату

Загальні відомості

Заготовки після нагріву транспортуються до ковальсько-штампувального агрегату, встановлюються і орієнтуються на бойку або штампі. За цей час відбувається їх охолодження на повітрі, причому температура поверхні заготовок знижується швидше, ніж у центральній частині. На початку кування - штампування в поперечному перетині заготовки виникає перепад температур. Для розрахунків роботи деформації, а також вибору потужності ковальсько-штампувального обладнання необхідно знати температуру заготовки у момент початку деформації.

Якщо відома температура нагріву металу в нагрівальному пристрої, тривалість і спосіб транспортування, габаритні розміри заготовки і теплофізичні параметри металу, то зміну температури поверхні і температури глибинних шарів заготовки можна визначити за наступною методикою.

Тривалість руху заготовки від нагрівального пристрою до ковальсько - штампувального устаткування:

$$\tau = \frac{s}{v} \quad (7.5)$$

де S - відстань між нагрівальним пристроєм і обладнанням, м;
 v - середня швидкість руху заготовки, м/год.

Критерії Фур'є і Біо для моменту початка кування - штампування визначаються:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}, \quad (7.6)$$

де a - коефіцієнт температуропровідності, м²/год;

τ - час транспортування заготовки, год;

l - характерний лінійний розмір, який дорівнює, наприклад, для циліндричної заготовки її радіусу, м;

$$Bi = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (7.7)$$

де α - коефіцієнт теплообміну, ккал/м² год·град;

d - діаметр заготовки, м;

λ - коефіцієнт теплопровідності, ккал/м год·град.

Температура поверхні заготовки до моменту початку пластичної деформації:

$$t_{\text{п}} = \theta_{\text{п}} \cdot (t_0 - t_c) + t_c, \quad (7.8)$$

де $\theta_{\text{п}} = f(Fo, Bi)$ - безрозмірна відносна температура поверхні заготовки;

t_0 - температура заготовки при винесенні її з нагрівального пристрою, °С;

t_c - температура навколишнього середовища, °С.

Температура в центральній частині заготовки до моменту початку деформації:

$$t_{\text{ц}} = \theta_{\text{ц}} \cdot (t_0 - t_c) + t_c, \quad (7.9)$$

де $\theta_{\text{ц}} = f(Fo, Bi)$ - безрозмірна відносна температура в центральній частині заготовки.

Мета роботи

Експериментальне і теоретичне визначення температур поверхні і центральної частини нагрітих заготовок до моменту початку пластичної деформації.

Матеріали, інструмент, устаткування

Циліндричні заготовки з вуглецевої сталі Ø 40, 70, 100 мм і завдовжки до 150 мм - по 3 шт. кожного розміру.

Платинородій - платинова термопара, гарячий спай якої вмонтований у внутрішню поверхню губок кліщів, що служать для витягання заготовок з нагрівального пристрою (печі). Термопара приєднується до мілівольтметра, проградуєваного в °С.

Камерна лабораторна електропіч, що має систему управління тепловим режимом. Щоб уникнути появи окалини на нагрітому металі і впливу її на процес вимірювання температури поверхні, робочу камеру печі слід заповнити інертним газом, наприклад, аргоном.

Порядок проведення роботи

Всі заготовки помістити в піч з температурою в робочій зоні порядку 1300°C і нагрівати за режимом, відповідному прийнятій марці сталі. Час нагріву заготовок залежно від їх геометричних розмірів приймаємо:

Ø 40 мм – 7-8 хвил;

Ø 70 мм – 12-13 хвил;

Ø 100 мм – 18-20 хвил.

Після нагріву до технологічно максимальних температур заготовки Ø 40 мм по одній витягувати з печі кліщами з термопарою. Зафіксувати температуру нагріву поверхневих шарів заготовки у момент витягання.

З метою варіювання різного часу транспортування заготовки до ковальсько-штампувальної машини заміряти поверхневу температуру першої заготовки через 0,5 хвил, другої - через 1,0 хвил, третьої, - через 1,5-2,0 хвил. Аналогічно провести вимірювання для заготовок Ø 70 і Ø 100 мм.

Для теоретичного визначення температур поверхні і глибинних шарів заготовок до моменту початку кування-штампування за формулами (7.6) і (7.7) знайти критерії Fo і Bi . За даними критеріями визначити безрозмірну відносну температуру поверхневих і глибинних шарів заготовок за методикою.

За формулами (7.8) і (7.9) підрахувати теоретичну температуру у момент початку пластичної деформації для прийнятих умов транспортування.

Результати вимірювань звести в табл. 7.3.

Таблиця 7.3 – Результати вимірювань втрат тепла при транспортуванні заготовки до ковальського агрегату

Діаметр заготовки, мм	Температура заготовки при винесенні з печі t_0 , °C	Температура навколишнього середовища t_c , °C	Час транспортування заготовки τ , хвил.	Температура поверхні заготовки перед деформуванням, °C		Теоретична температура нейтральної частини заготовки $t_{\text{ц}}^{\text{теор}}$, °C
				$t_{\text{п}}^{\text{експ}}$	$t_{\text{п}}^{\text{теор}}$	

Зміст звіту

Вказати тему і мету роботи. Охарактеризувати лабораторний нагрівальний пристрій, інструмент. Викласти основні теоретичні положення за темою роботи. Всі експериментальні і розрахункові дані звести в таблицю. Побудувати графіки $t_{\text{п}}^{\text{теор}} = f(\tau)$, $t_{\text{п}}^{\text{експ}} = f(\tau)$ і $t_{\text{ц}}^{\text{теор}} = f(\tau)$ для всіх заготовок.

Проаналізувати результати і зробити висновки.

7.4 Визначення коефіцієнта корисної дії (к.к.д.) електропечі

Загальні відомості

При розрахунку параметрів теплової роботи печі, а також для порівняльної оцінки нагрівальних пристроїв розрізняють термічний і ефективний коефіцієнт корисної дії пічних агрегатів.

Термічним коефіцієнтом корисної дії є відношення кількості корисного тепла, що йде на нагрів металу, до всієї кількості тепла, що утворилася в нагрівальному пристрої при його тепловій роботі:

$$\eta_T = \frac{Q_M}{Q_T} \cdot 100 \%, \quad (7.10)$$

де Q_M - кількість тепла, що йде на нагрів металу, ккал;

Q_T - загальна кількість тепла, що утворилася в печі, при спалюванні палива, ккал.

Ефективний коефіцієнт корисної дії - відношення кількості корисно використовованого тепла в нагрівальному пристрої до кількості тепла, що залишилася в печі:

$$\eta_e = \frac{Q_M}{Q_{oc}} \cdot 100 \%, \quad (7.11)$$

де Q_{oc} - кількість тепла, що залишилося, в печі при горінні палива, ккал.

Для нагрівальних пристроїв найбільш показовим є термічний коефіцієнт корисної дії.

Стосовно електричної печі опір η_T можна визначити таким чином.

Потужність, що витрачається піччю

$$W = \frac{I \cdot u}{1000} \text{ кВт}, \quad (7.12)$$

де I - сила струму, А;

u - напруга в силовому колі, В.

Загальна кількість теплової енергії, що еквівалентна електричній, буде:

$$Q_T = 860 \cdot W_{cp} \cdot \tau, \text{ ккал}, \quad (7.13)$$

де W_{cp} - середня потужність за час нагріву, кВт;

τ - тривалість роботи печі, год.

Кількість тепла, що йде на нагрів металу, визначається:

$$Q_M = q \cdot (C_2 \cdot t_2 - C_1 \cdot t_1), \text{ ккал}, \quad (7.14)$$

де q - вага заготовки, кгс;

C_1 і C_2 - відповідно початкова і кінцева теплоємність металу заготовки, ккал/кгс · град;

t_1 і t_2 - відповідно початкова і кінцева температура заготовки, °С.

Залежно від типу нагрівального пристрою, його конструктивного виконання, роду палива, ступеню використання тепла пічних газів, що відходять, термічний коефіцієнт корисної дії може коливатися в широких межах (від 8 до 35%).

Мета роботи

Визначення термічного коефіцієнту корисної дії лабораторної електричної печі при нагріві сталевих заготовок.

Матеріал, інструмент, устаткування

Заготівка з вуглецевої сталі Ø50-60 мм і $l = 150$ мм. У заготівці висвердлюється радіальний отвір Ø2-4 мм на глибину 25-30 мм для установки платинородій - платинової термопари, що є датчиком для визначення температури металу, що нагрівається.

Лабораторна однофазна електрична піч. Перетворення електричної енергії на теплову здійснюється в опорах, виготовлених у вигляді спіралі з ніхромового дроту або силітових стрижнів.

Амперметр і вольтметр, які включаються в силовий ланцюг печі для визначення параметрів споживаного струму. Піч оснащена системою автоматичного управління тепловим режимом з електронним потенціометром.

Платинородій - платинова термопара і мілівольтметр, проградуєований в градусах для вимірювання температури заготовки.

Порядок проведення роботи

Робота полягає у визначенні загальної кількості енергії, що витрачається піччю протягом нагріву, і кількості енергії, корисно використаної на нагрів металу.

Заготовку зважити, в заздалегідь висвердленому отворі встановити гарячий спай термопари і помістити в робочу зону печі.

Включити піч, автоматичним електронним потенціометром задати певну температуру нагріву.

Через кожні 5-7 хвил. реєструвати покази амперметра, вольтметра і мілівольтметра.

Після того, як температура заготовки досягає заданої, піч відключити з фіксацією часу припинення дослідів.

Покази приладів занести до табл. 7.4.

Таблиця 7.4 – Результати вимірювань коефіцієнта корисної дії електропечі

Час, години- хвилини	I , А	U , В	W , кВт	Температура, °С	Примітка

Зміст звіту

За формулами (7.13) і (7.14) визначити Q_m і Q_t . Термічний коефіцієнт корисної дії отримаємо за формулою (7.10). На підставі табличних даних побудувати графіки потужності печі, витраченої при нагріві, і температури заготовки у функції часу нагріву.

Дати електричну принципову схему лабораторної печі.

Контрольні питання

1. Чинники, що впливають на процес окалиноутворення.
2. Структура окалини на поверхні сталевих заготовок.
3. Вплив окалини на якість готової продукції.
4. Способи зменшення окалиноутворення при нагріві в печах відкритого полум'я.
5. Суть тріщиноутворення при нагріві.
6. Умови тріщиноутворення при нагріві.
7. Зв'язок внутрішньої напруги із структурними перетвореннями при нагріві.
8. Методи боротьби з внутрішньою напругою і тріщиноутворенням.
9. Основні способи транспортування заготовок від нагрівальних пристроїв до ковальсько-пресових машин.
10. Вплив розмірів заготовок на процес втрат тепла при транспортуванні.
11. Вплив способу транспортування на втрати тепла заготовками.
12. Визначення ефективного і термічного к. к. д. нагрівального пристрою.
13. Термічний к. к. д. як метод оцінки теплоізоляції печі.
14. Способи підвищення к. к. д. печей.

Література до розділу 7: [7, 8, 9, 10]

8 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ І ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

8.1 Розрахунок камерної печі

В камерній нагрівальній печі на монолітному поді нагрівають круглі заготовки діаметром $d = 80$ мм і довжиною $l = 800$ мм. Висота робочого простору 1 м. Температура нагрівання заготовок по поверхні задана рівною 1200°C . Сталь заготовок – слабколегована.

Піч отоплюється природним газом, що має теплоту згоряння $Q_{\text{гп}} = 36000$ кДж/м³. Газ спалюється з коефіцієнтом витрати повітря $\alpha = 1,05$. Температура підігрівання повітря, що використовується для горіння, складає $t_{\text{в}} = 300^\circ\text{C}$.

Визначити тривалість нагрівання заготовок і розміри поду печі, якщо її продуктивність повинна бути $G = 900$ кг/год. Кімнатна температура $t_{\text{кімн}} = 20^\circ\text{C}$.

Розрахунком горіння палива при $\alpha = 1,05$ визначено, що дійсна витрата повітря $L_{\alpha} = 10,4$ м³/м³, а об'єм продуктів згоряння $V_{\alpha} = 11,4$ м³/м³. Вони містять 9 % CO₂ ($p_{\text{CO}_2} = 0,09$) і 17 % H₂O ($p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,17$). Орієнтовно приймаємо, що напруженість поду печі при температурі газів ($t_{\text{г}} = 1280^\circ\text{C}$) повинна дорівнювати $g = 300$ кг/(м²·год).

Тоді площа печі

$$F = G/g = 900/300 = 3 \text{ м}^2.$$

Приймаємо, що заготовки від передньої і задньої стінки розташовуються на відстані 250 мм. Тоді ширина робочого простору складає:

$$B = l + 2 \cdot 0,25 = 0,8 + 0,5 = 1,3 \text{ м.}$$

Тому довжина поду печі буде дорівнювати:

$$L = F/B = 3/1,3 = 2,3 \text{ м.}$$

Отже, обсяг робочого простору печі

$$V = B \cdot L \cdot H = 1,3 \cdot 2,3 \cdot 1 = 3 \text{ м}^3.$$

Поверхні стінок, що обмежують газовий об'єм

$$F_{\text{п}} = 2 \cdot L \cdot B + 2 \cdot H \cdot B + 2 \cdot L \cdot H = 2 \cdot 2,3 \cdot 1,3 + 2 \cdot 1 \cdot 1,3 + 2 \cdot 2,3 \cdot 1 = 13,2 \text{ м}^2.$$

Тоді ефективна довжина променю

$$s_{\text{еф}} = 0,9 \cdot 4 V/F_{\text{п}} = 0,9 \cdot 4 \cdot 3/13,2 = 0,82 \text{ м.}$$

Відповідно до формули О.М. Гурвича спектральний коефіцієнт ослаблення

$$k_{\lambda} = (0,8 + 1,6 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot (1 - 0,00038 \cdot (t_{\text{г}} + 273)) / \sqrt{(p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}_2}) \cdot s_{\text{еф}}} = \\ = (0,8 + 1,6 \cdot 0,17) \cdot (1 - 0,00038 \cdot (1280 + 273)) / \sqrt{(0,17 + 0,09) \cdot 0,82} = 0,953 \frac{1}{\text{м}}.$$

Тоді ступінь чорноти газів

$$\varepsilon_{\text{г}} = 1 - \exp \left[-k_{\lambda} \cdot (p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}_2}) \cdot s_{\text{еф}} \right] = 1 - \exp [-0,953 \cdot (0,17 + 0,09) \cdot 0,82] = 0,2.$$

Розраховану ступінь чорноти газів помножимо на поправочний коефіцієнт, який враховує виділення сажі у полум'ї і який дорівнює 1,5. Тоді

$$\varepsilon_r = 0,2 \cdot 1,5 = 0,3.$$

Ступінь чорноти сталі можна прийняти $\varepsilon_m = 0,8$. Тоді коефіцієнт

$$\beta = \varepsilon_m + \varepsilon_r \cdot (1 - \varepsilon_m) = 0,8 + 0,3 \cdot (1 - 0,8) = 0,86.$$

Заготовки розміщуються на поду печі із зазором, рівним половині їх діаметру. При відстані від бокових стінок до заготовок, рівним по 0,55 м, на поду одночасно можна розмістити 10 заготовок. Тоді поверхня металу, яка приймає променевий потік від газів

$$F_m = n \cdot l \cdot \pi \cdot d = 10 \cdot 0,8 \cdot 3,14 \cdot 0,08 = 2,01 \text{ м}^2.$$

Внутрішня поверхня кладки печі

$$\begin{aligned} F_k &= F_{cb} + 2 \cdot F_{bc} + 2 \cdot F_{tc} = L \cdot B + 2 \cdot B \cdot H + 2 \cdot L \cdot H = \\ &= 2,3 \cdot 1,3 + 2 \cdot 1,3 \cdot 1 + 2 \cdot 2,3 \cdot 1 = 10,2 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Тому ступінь розвитку обмуровки (футеровки або кладки)

$$\omega = F_k / F_m = 10,2 / 2,01 = 5,08.$$

Тоді коефіцієнт, що визначає умови теплообміну в печі

$$\begin{aligned} k &= (\omega + 1 - \varepsilon_r) / \left[\omega + (1 - \varepsilon_r) \cdot \frac{\beta}{\varepsilon_r} \right] = \\ &= (5,08 + 1 - 0,3) / \left[5,08 + (1 - 0,3) \cdot \frac{0,86}{0,3} \right] = 0,79. \end{aligned}$$

Зведений коефіцієнт випромінювання системи газ – кладка - метал

$$C_{гкм} = C_0 \cdot \varepsilon_m \cdot k = 5,67 \cdot 0,8 \cdot 0,79 = 3,59 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Середня температура поверхні заготовки, при приблизно параболічній її зміні у часі

$$t_{пов} = 0,67 \cdot 1200 = 804^\circ\text{C}.$$

Тому коефіцієнт тепловіддачі від газів до металу

$$\begin{aligned} \alpha &= C_{гкм} \cdot \frac{\left(\frac{t_r + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{пов} + 273}{100}\right)^4}{t_r - t_{пов}} = \\ &= 3,59 \cdot \frac{\left(\frac{1280 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{804 + 273}{100}\right)^4}{1280 - 804} = 337 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \end{aligned}$$

Теплопровідність сталі в залежності від температури нагріву має наступні значення

t, °C	0	200	400	600	800	1000	1200
λ, Вт/(м²·°C)	46,1	44,8	39,8	34,3	26,4	27,2	29,8

Середня теплопровідність сталі в інтервалі нагрівання

$$\lambda = \frac{(46,1 + 44,8 + 39,8 + 34,3 + 26,4 + 27,2 + 29,8)}{7} = 35,5 \text{ Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}.$$

При середній теплоємності сталі $c_0 = 0,71 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ і щільності сталі $7500 \text{ кг}/\text{м}^3$ коефіцієнт температуропровідності сталі

$$a = \frac{\lambda \cdot 3600}{c_0 \cdot \rho \cdot 1000} = 0,024 \text{ м}^2/\text{год}.$$

Число Біо дорівнює

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \frac{d}{2 \cdot 1000}}{\lambda} = \frac{337 \cdot \frac{80}{2 \cdot 1000}}{35,5} = 0,38.$$

Відповідно до табл. 1 при $Bi = 0,38$ коефіцієнти дорівнюють:

$$\mu^2 = 0,693; P_0 = 0,908; M_0 = 0,998; N_0 = 1,092.$$

Відносна температура поверхні

$$\theta_{\text{пов}} = \frac{t_{\Gamma} - t_{\text{пов}}}{t_{\Gamma} - t_{\text{кімн}}} = \frac{1280 - 1200}{1280 - 20} = 0,063.$$

Таблиця 8.1 – Коефіцієнти для розрахунку нагрівання або охолодження довгого циліндра діаметром d

Bi	μ^2	P_0	M_0	N_0	Bi	μ^2	P_0	M_0	N_0
0,000	0,000	1,000	1,000	1,000	0,800	1,322	0,815	0,989	1,172
0,010	0,020	0,998	1,000	1,002	0,900	1,453	0,795	0,987	1,190
0,020	0,040	0,995	1,000	1,005	1,000	1,580	0,774	0,985	1,208
0,040	0,079	0,990	1,000	1,010	1,200	1,810	0,738	0,979	1,239
0,060	0,118	0,985	1,000	1,014	1,400	2,030	0,704	0,973	1,268
0,080	0,157	0,980	1,000	1,019	1,600	2,220	0,671	0,967	1,295
0,100	0,195	0,975	1,000	1,024	1,800	2,390	0,639	0,961	1,319
0,120	0,233	0,970	1,000	1,029	2,000	2,550	0,610	0,955	1,340
0,140	0,270	0,965	1,000	1,034	2,200	2,700	0,584	0,949	1,357
0,160	0,308	0,960	1,000	1,039	2,400	2,840	0,558	0,943	1,375
0,180	0,344	0,956	1,000	1,044	2,600	2,970	0,534	0,937	1,392
0,200	0,381	0,951	1,000	1,048	2,800	3,090	0,513	0,931	1,406
0,220	0,417	0,946	0,999	1,053	3,000	3,200	0,492	0,925	1,420
0,240	0,452	0,941	0,999	1,057	3,500	3,440	0,446	0,910	1,449
0,260	0,488	0,937	0,999	1,062	4,000	3,640	0,407	0,896	1,472
0,280	0,523	0,932	0,999	1,067	4,500	3,810	0,374	0,884	1,489
0,300	0,557	0,927	0,999	1,071	5,000	3,960	0,345	0,873	1,504
0,350	0,642	0,915	0,998	1,082	6,000	4,200	0,229	0,854	1,527
0,400	0,726	0,903	0,998	1,093	7,000	4,380	0,262	0,837	1,541
0,450	0,806	0,891	0,997	1,103	8,000	4,530	0,234	0,823	1,551
0,500	0,888	0,880	0,996	1,114	9,000	4,650	0,210	0,812	1,560
0,550	0,962	0,869	0,995	1,124	10,000	4,750	0,191	0,803	1,566
0,600	1,036	0,858	0,993	1,134	20,000	5,240	0,095	0,755	1,590
0,700	1,184	0,836	0,991	1,154	50,000	5,550	0,040	0,719	1,603
0,800	1,322	0,815	0,989	1,172	100,000	5,680	0,020	0,704	1,606

Тривалість нагрівання заготовок

$$\tau = \frac{\left(\frac{d}{2 \cdot 1000}\right)^2}{a \cdot \mu^2} \cdot \ln \frac{P_o}{\theta_{\text{пов}}} = \frac{\left(\frac{80}{2 \cdot 1000}\right)^2}{0,024 \cdot 0,693} \cdot \ln \frac{0,908}{0,063} = 0,256 \text{ год.}$$

При часі нагрівання заготовок 0,256 год. число Фур'є буде дорівнювати:

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{\left(\frac{d}{2 \cdot 1000}\right)^2} = \frac{0,024 \cdot 0,256}{\left(\frac{80}{2 \cdot 1000}\right)^2} = 3,84.$$

Тоді відносна температура осі заготовки

$$\theta_{\text{осі}} = N_o \cdot \exp(-\mu^2 \cdot F_0) = 1,089 \cdot \exp(-0,693 \cdot 3,84) = 0,076.$$

Температура осі заготовки

$$t_{\text{осі}} = t_{\text{г}} - (t_{\text{г}} - t_{\text{кімн}}) \cdot \theta_{\text{осі}} = 1280 - (1280 - 20) \cdot 0,076 = 1184 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Відносна температура маси

$$\theta_{\text{мас}} = M_o \cdot \exp(-\mu^2 \cdot F_0) = 0,998 \cdot \exp(-0,693 \cdot 3,84) = 0,0698,$$

а її абсолютне значення

$$t_{\text{мас}} = t_{\text{г}} - (t_{\text{г}} - t_{\text{кімн}}) \cdot \theta_{\text{мас}} = 1280 - (1280 - 20) \cdot 0,0698 = 1192 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Враховуючи, що заготовки розміщуються в печі не впритул, а на відстані, що дорівнює $0,5d$, розрахований час нагрівання помножимо на поправочний коефіцієнт $k = 1,4$. Тому тривалість нагрівання

$$\tau_{\text{факт}} = 1,4 \cdot \tau = 1,4 \cdot 0,256 = 0,358 \text{ год.}$$

При часі нагрівання заготовок, що дорівнює приблизно $1/3$, в печі повинно одночасно знаходитись $900/3 = 300$ кг сталі. Для прийнятих розмірів заготовки і щільності сталі, маса однієї заготовки дорівнює

$$m_{\text{загот}} = \frac{G}{3 \cdot n} = \frac{900}{3 \cdot 10} = 30 \text{ кг.}$$

Тому одночасно у печі повинно знаходитись 10 заготовок. Тоді довжина поду печі, зайнята заготовками з урахуванням зазорів між ними

$$l = n \cdot \frac{d}{1000} + 0,5 \cdot (n - 1) \cdot \frac{d}{1000} = 10 \cdot \frac{80}{1000} + 0,5 \cdot (10 - 1) \cdot \frac{80}{1000} = 1,16 \text{ м.}$$

При повній довжині поду печі $L = 2,3$ м, з кожної сторони між заготовками і боковими стінками буде зазор

$$\text{Зазор} = 0,5 \cdot (L - l) = 0,5 \cdot (2,3 - 1,16) = 0,57 \text{ м.}$$

За відомими розмірами печі необхідно скласти ескіз печі (рис. 8.1), що дозволить розрахувати тепловий баланс печі на 1 сек.

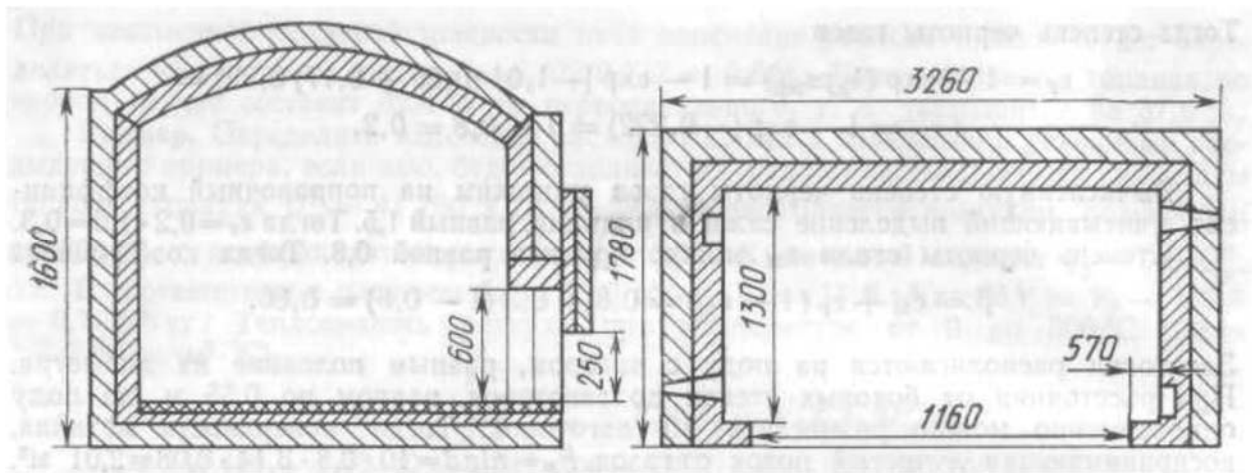


Рисунок 8.1 – Ескіз камерної печі

8.1.1 Приходні статті балансу

1. Хімічна теплота палива

$$Q_x = Q_{\text{нр}} \cdot V_{\text{невід}} = 3600 \cdot V_{\text{невід}}, \text{ кВт},$$

де $Q_{\text{нр}}$ – нижча теплота згоряння палива, кДж/м³;

$V_{\text{невід}}$ – невідома, поки що, витрата палива, м³/с.

2. Фізична теплота повітря. При 300°C ентальпія 1 м³ повітря $i_6 = 420$ кДж/м³:

$$Q_B = L_\alpha \cdot i_6 \cdot V_{\text{невід}} = 4368 \cdot V_{\text{невід}}, \text{ кВт}.$$

3. Теплота екзотермічних реакцій. Для малолегованої сталі величина угару може бути прийнята рівною 1%. Секундна продуктивність печі дорівнює

$$g = G/3600 = 900/3600 = 0,25 \text{ кг/с}.$$

Теплота екзотермічних реакцій буде дорівнювати

$$Q_{\text{екз}} = 0,01 \cdot g \cdot 5652 = 0,01 \cdot 0,25 \cdot 5652 = 14,13 \text{ кВт}.$$

8.1.2 Витратні статті балансу

1. Теплота, що витрачається на нагрівання сталі. При середній теплоємності низьковуглецевих сталей $c = 0,707$ кДж/кг·°C

$$Q_1 = g \cdot c \cdot (t_{\text{мас}} - t_{\text{кімн}}) = 0,25 \cdot 0,707 \cdot (1192 - 20) = 207,2 \text{ кВт}.$$

2. Теплота, що виноситься з печі димовими газами. При температурі $t_r = 1280^\circ\text{C}$ питома ентальпія газів дорівнює $i_2 = 2100$ кДж/м³. З урахуванням підсосів повітря обсяг газів підвищуємо на 5 %. Тому

$$Q_2 = 1,05 \cdot V_\alpha \cdot i_2 \cdot V_{\text{невід}} = 1,05 \cdot 11,4 \cdot 2100 \cdot V_{\text{невід}} = 25137 \cdot V_{\text{невід}}, \text{ кВт}.$$

3. Втрати теплоти з хімічним недопалом

$$Q_3 = 0,02 \cdot Q_{\text{нр}} \cdot V_{\text{невід}} = 0,02 \cdot 36000 \cdot V_{\text{невід}} = 720 \cdot V_{\text{невід}}, \text{ кВт}.$$

Втрати теплоти кладкою (футеровкою) печі. Теплопровідність матеріалів (цеглин), що використовуються, має наступні значення, Вт/(м·°C):

шамот $\lambda_{\text{ш}} = 1,14$;

магнезит $\lambda_{\text{м}} = 3,15$;

діатоміт $\lambda_{\text{д}} = 0,27$.

Товщина одного шару кладки, м:

шамоту $s_{ш} = 0,116$;
 магнезиту $s_{м} = 0,116$;
 діатоміту $s_{д} = 0,125$.

Суми теплових опорів окремих частин кладки, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$:

$$\text{под печі } R_{\Sigma \text{ под}} = \frac{s_{м}}{\lambda_{м}} + \frac{s_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{2 \cdot s_{д}}{\lambda_{д}} = \frac{0,116}{3,15} + \frac{0,116}{1,14} + \frac{2 \cdot 0,125}{0,27} = 1,065;$$

$$\text{склепіння печі } R_{\Sigma \text{ свод}} = \frac{2 \cdot s_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{s_{д}}{\lambda_{д}} = \frac{2 \cdot 0,116}{1,14} + \frac{0,125}{0,27} = 0,666;$$

$$\text{стіни печі } R_{\Sigma \text{ стіни}} = \frac{2 \cdot s_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{2 \cdot s_{д}}{\lambda_{д}} = \frac{2 \cdot 0,116}{1,14} + \frac{2 \cdot 0,125}{0,27} = 1,129.$$

В розрахунок теплових втрат у навколишнє середовище закладаємо декілька завищені значення поверхні кладки, приймаючи її рівній зовнішній поверхні.

Поверхні стін, склепіння та поду за ескізом на рис. 1, м^2 :

- передня $F_{\text{передня}} = 0,4 \cdot 3,264 = 1,306$;
- задня $F_{\text{задня}} = 1,6 \cdot 3,264 = 5,22$;
- торцеві $F_{\text{торцеві}} = 1,78 \cdot 1,6 \cdot 2 = 5,7$;
- склепіння $F_{\text{свод}} = 3,264 \cdot 1,78 = 5,81$;
- под $F_{\text{под}} = 3,264 \cdot 1,78 = 5,81$.

Коефіцієнти тепловіддачі для зовнішніх поверхонь кладки, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$:

$$\alpha_{\text{своду}} = 35, \quad \alpha_{\text{стінок}} = 25, \quad \alpha_{\text{поду}} = 15.$$

Теплові втрати кладкою в навколишнє середовище розраховуємо за формулою, Вт

$$Q = \frac{(t_{\text{г}} - t_{\text{кімн}}) \cdot F}{\left(\frac{1}{\alpha} + R_{\Sigma \text{ кладки}} + \frac{1}{\alpha_{\text{кладки}}} \right)}.$$

Тут $\frac{1}{\alpha}$ – тепловий опір тепловіддачі від газів до внутрішньої поверхні кладки, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Тоді втрати тепла склепінням

$$Q_{\text{св}} = \frac{(t_{\text{г}} - t_{\text{кімн}}) \cdot F_{\text{свод}}}{\left(\frac{1}{\alpha} + R_{\Sigma \text{ свод}} + \frac{1}{\alpha_{\text{своду}}} \right)} = \frac{(1280 - 20) \cdot 5,81}{\left(\frac{1}{337} + 0,666 + \frac{1}{35} \right)} = 10488 \text{ Вт.}$$

Втрати тепла подом

$$Q_{\text{под}} = \frac{(t_{\text{г}} - t_{\text{кімн}}) \cdot F_{\text{под}}}{\left(\frac{1}{\alpha} + R_{\Sigma \text{ под}} + \frac{1}{\alpha_{\text{поду}}} \right)} = \frac{(1280 - 20) \cdot 5,81}{\left(\frac{1}{337} + 1,065 + \frac{1}{15} \right)} = 6455 \text{ Вт.}$$

Втрати тепла торцевими стінками

$$Q_{\text{тор}} = \frac{(t_{\text{г}} - t_{\text{кімн}}) \cdot F_{\text{торцеві}}}{\left(\frac{1}{\alpha} + R_{\Sigma \text{ стіни}} + \frac{1}{\alpha_{\text{стінок}}} \right)} = \frac{(1280 - 20) \cdot 5,7}{\left(\frac{1}{337} + 1,129 + \frac{1}{25} \right)} = 6122 \text{ Вт.}$$

Втрати тепла передньою стінкою

$$Q_{\text{пс}} = \frac{(t_{\text{г}} - t_{\text{кімн}}) \cdot F_{\text{передня}}}{\left(\frac{1}{\alpha} + R_{\Sigma \text{ стіни}} + \frac{1}{\alpha_{\text{стінок}}} \right)} = \frac{(1280 - 20) \cdot 1,306}{\left(\frac{1}{337} + 1,129 + \frac{1}{25} \right)} = 1403 \text{ Вт.}$$

Втрати тепла задньою стінкою

$$Q_{зс} = \frac{(t_{\Gamma} - t_{\text{кімн}}) \cdot F_{\text{задня}}}{\left(\frac{1}{\alpha} + R_{\Sigma \text{ стіни}} + \frac{1}{\alpha_{\text{стінок}}}\right)} = \frac{(1280 - 20) \cdot 5,22}{\left(\frac{1}{337} + 1,129 + \frac{1}{25}\right)} = 5613 \text{ Вт.}$$

Крім цих витрат мають місце втрати теплоти через напівприкриту заслонку. При температурі внутрішньої поверхні футеровки 1250°C щільність теплового потоку через заслонку $q = 2,2$ кВт, розміри заслонки $a = 0,4$ м, $b = 2,3$ м. Тоді

$$Q_{\text{засл}} = q \cdot (a + 0,4) \cdot (b + 0,4) \cdot 1000 = 2,2 \cdot (0,4 + 0,4) \cdot (2,3 + 0,4) \cdot 1000 = 4752 \text{ Вт.}$$

Усього втрати теплоти кладкою печі в навколишнє середовище складуть

$$Q_{5T} = Q_{\text{св}} + Q_{\text{под}} + Q_{\text{тор}} + Q_{\text{пс}} + Q_{\text{зс}} + Q_{\text{засл}} = 10488 + 6455 + 6122 + 1403 + 5613 + 4752 = 34832 \text{ Вт.}$$

Втрати теплоти випромінюванням через відкрите вікно при коефіцієнті діафрагмування $\Phi = 0,6$

$$Q_{5Л} = C_0 \left[\left(\frac{t_{\Gamma} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{кімн}} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,2 \cdot b \cdot \frac{\Phi}{2} = \\ = C_0 \left[\left(\frac{t_{\Gamma} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{кімн}} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,2 \cdot b \cdot \frac{\Phi}{2} = 45457 \text{ Вт.}$$

Невраховані втрати приймаємо рівними 5 % від витрат тепла кладкою в навколишнє середовище

$$Q_{5\text{неврах}} = (Q_{5T} + Q_{5Л}) \cdot 0,05 = (34832 + 45457) \cdot 0,05 = 4014 \text{ Вт.}$$

Тому рівняння теплового балансу буде мати вигляд:

$$Q_{\text{х}} \cdot B_{\text{витр}} + Q_{\text{В}} \cdot B_{\text{витр}} + Q_{\text{екз}} = Q_1 + Q_2 \cdot B_{\text{витр}} + Q_3 \cdot B_{\text{витр}} + \frac{Q_{5T}}{1000} + \frac{Q_{5Л}}{1000} + \frac{Q_{5\text{неврах}}}{1000},$$

або

$$36000 \cdot B_{\text{витр}} + 4368 \cdot B_{\text{витр}} + 14,13 = 207,2 + 25137 \cdot B_{\text{витр}} + 720 \cdot B_{\text{витр}} + \frac{34832}{1000} + \frac{45457}{1000} + \frac{4014}{1000}.$$

В результаті вирішення цього рівняння знаходимо

$$B_{\text{витр}} = 0,01911 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Значення окремих статей балансу, пов'язаних з витратами палива B , будуть рівними, кВт

$$Q_1 = B_{\text{витр}} \cdot Q_{\text{нр}} = 0,01911 \cdot 36000 = 688;$$

$$Q_{\text{В}} = B_{\text{витр}} \cdot Q_{\text{В}} = 0,01911 \cdot 4368 = 83,5;$$

$$Q_2 = B_{\text{витр}} \cdot Q_2 = 0,01911 \cdot 25137 = 480,4;$$

$$Q_3 = B_{\text{витр}} \cdot Q_3 = 0,01911 \cdot 720 = 13,8.$$

Тепловий баланс представимо у формі таблиці (табл. 8.2).

8.1.3 Тепловий баланс камерної печі

Таблиця 8.2 – Тепловий баланс камерної печі

Статті приходу	Числові значення		Статті витрат теплоти	Числові значення	
	кВт	%		кВт	%
Хімічна теплота палива	688,00	87,6	На нагрівання сталі	207,20	26,4
Фізична теплота повітря	83,50	10,6	З димовими газами	480,40	61,1
Теплота екзотермічних реакцій	14,13	1,8	З хімічним недопалом	13,80	1,8
Усього	785,63	100,0	Теплопровідністю через кладку	34,83	4,4
			Випромінюванням через вікно	45,46	5,8
			Невраховані витрати	4,01	0,5
			Разом	785,70	100,002
			Нев'язка балансу	-0,07	-0,002
			Усього	785,63	100,000

Термічний коефіцієнт корисної дії печі

$$\eta = \frac{Q_1 \cdot 100}{B_{\text{вир}} \cdot 3600 \cdot 10} = \frac{207,2 \cdot 100}{0,01911 \cdot 3600 \cdot 10} = 30,1 \%$$

Питомі витрати умовного палива

$$b = \frac{B_{\text{вир}} \cdot Q_{\text{нр}} \cdot 3600}{(0,9 \cdot 29310)} = \frac{0,01911 \cdot 36000 \cdot 3600}{(0,9 \cdot 29310)} = 93,9 \text{ кг/т.}$$

Умовним прийнято називати паливо з найнижчою теплотою згоряння (29310 кДж/кг).

За цими розрахунковими даними повинні йти розрахунки рекуператору і механіки газів.

У табл. 8.3 наведено варіанти індивідуальних завдань для розрахунку камерної печі.

8.1.4 Варіанти індивідуальних завдань для розрахунку камерної печі

Таблиця 8.3 – Варіанти індивідуальних завдань для розрахунку камерної печі

Варіанти	d	l	H	t _{пов}	Q _{нр}	α	t _в	G	L _{α}	V _{α}	t _г	g	l _{расст}	t _{кімн}
Приклад	80	800	1	1200	36000	1,05	300	900	10,4	11,4	1280	300	250	20
1	85	820	0,9	1190	36100	1,04	290	850	10,3	11,5	1275	280	255	25
2	85	820	0,9	1190	36100	1,04	290	850	10,3	11,5	1275	280	245	25
3	85	820	0,9	1190	36100	1,04	290	850	10,3	11,5	1275	290	245	25
4	85	820	0,9	1190	36100	1,04	290	850	10,3	11,5	1275	290	255	25
5	85	820	0,9	1190	36100	1,04	290	850	10,3	11,5	1275	280	245	25
6	85	780	0,9	1190	36100	1,04	290	850	10,3	11,5	1275	280	245	25
7	85	780	1,1	1190	35900	1,06	310	850	10,3	11,5	1275	280	245	25
8	85	780	1,1	1190	35900	1,06	310	950	10,3	11,3	1275	280	255	25
9	85	780	1,1	1190	35900	1,06	310	950	10,3	11,3	1275	280	245	25
10	85	780	1,1	1190	35900	1,06	310	950	10,3	11,3	1275	320	245	25
11	75	810	1,1	1210	35900	1,06	310	950	10,3	11,3	1270	320	245	15
12	75	810	1,1	1210	35900	1,06	310	950	10,5	11,3	1270	320	255	15
13	75	810	1,1	1210	35900	1,06	310	950	10,5	11,3	1270	320	255	15
14	75	810	1,1	1210	35900	1,04	285	950	10,5	11,3	1270	320	255	15
15	75	810	1,1	1210	35900	1,04	285	880	10,5	11,35	1270	320	255	15
16	75	790	1,1	1210	36000	1,04	285	880	10,5	11,35	1270	320	255	15
17	75	790	1,1	1210	36000	1,04	285	880	10,5	11,35	1270	320	255	15
18	75	790	1,1	1210	36000	1,06	285	880	10,5	11,35	1270	310	255	15
19	75	790	1,1	1210	36000	1,06	285	880	10,5	11,35	1270	310	255	15
20	75	790	1,1	1210	36000	1,06	285	880	10,5	11,35	1270	310	255	15

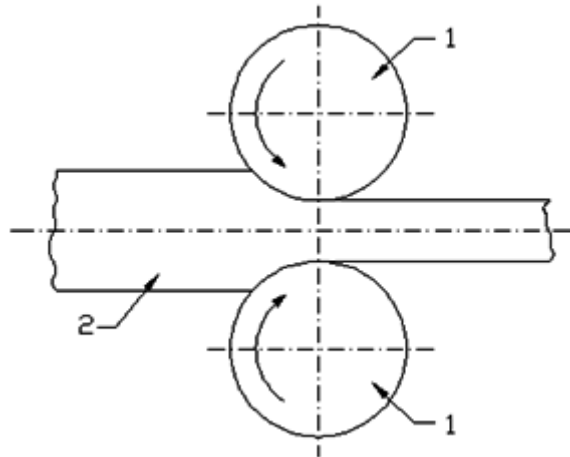
8.2 Розрахунок параметрів формозмінювання при поздовжньому прокатуванні штаби

8.2.1 Теоретичний вступ

Прокатка є основним способом обробки металів тиском. Методом прокатки отримують вироби найрізноманітнішої форми: тонкі і товсті листи, профілі квадратною і круглого перетинів, куточки, швелери, двотаврові балки, рейки, труби і багато інших виробів.

Прокаткою називається процес пластичної деформації металу між двома або декількома валками, що обертаються.

Проста і основна схема прокатки наведена на рис. 8.2. Оброблюване тіло, яке в загальному випадку називається штабою, пропускається між двома валками, що обертаються в протилежні сторони.



1 – валки; 2 – штаба

Рисунок 8.2 – Схема процесу поздовжньої прокатки

При проходженні між валками товщина штаби зменшується, а довжина і ширина збільшуються. При прокатуванні виробів типу листів застосовуються валки, робоча частина (бочка) яких має форму циліндра без будь яких вирізів і виступів (рис.8.3, а). Прокатку в таких валках часто називають прокаткою «на гладкій бочці». При виробництві складніших (сортових) профілів застосовуються калібровані валки і деформація штаби здійснюється в калібрах (рис.8.3, б).

Метал втягується в валках завдяки силам тертя, що з'являються на поверхні контакту металу з валками. Штаба піддається деформації не одночасно по всій довжині, а тільки на деякій ділянці, яка називається геометричним осередком деформації і характеризується поздовжнім (рис.8.4, а) і поперечним (рис.8.4, б) перетинами.

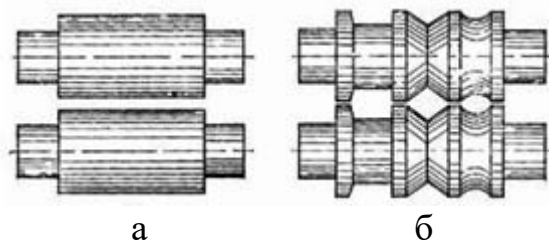
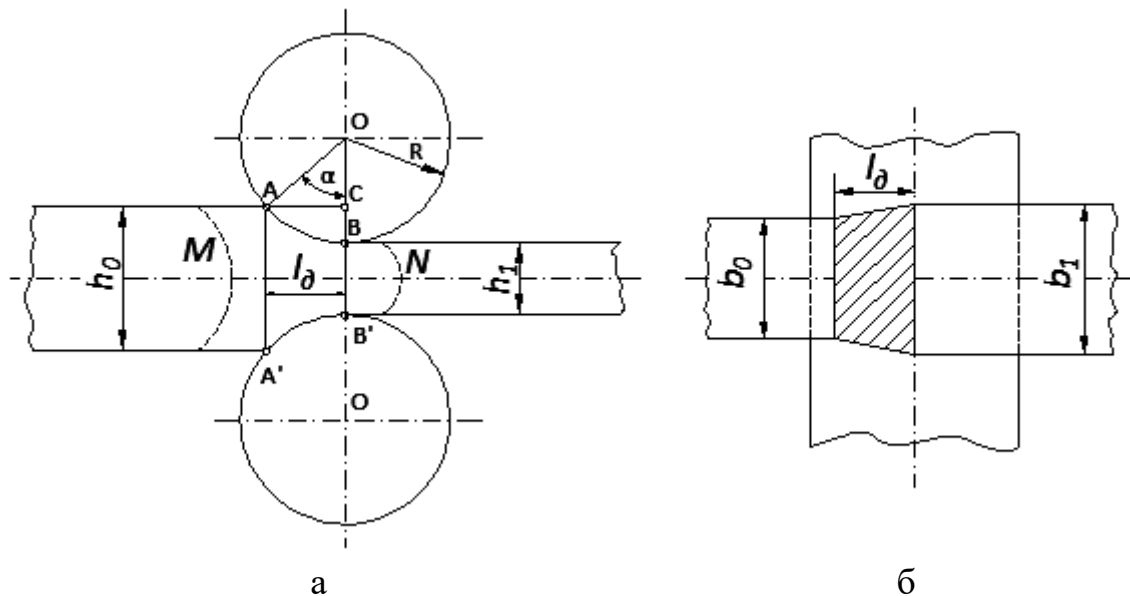


Рисунок 8.3 – Валки с гладкою бочкою (а) і калібровані валки (б)



а – поздовжній перетин; б – поперечний перетин
Рисунок 8.4 – Осередок деформування при прокатуванні

Геометричний осередок деформування – це об'єм металу $ABV'A'$, обмежений дугами кіл валків AB і $A'B'$, площинами входу металу у валки AA' і виходу металу з валків BB' і боковими гранями штаби.

Проте експериментальними дослідженнями встановлено, що пластична деформація розповсюджується і на зони, прилеглі до геометричного осередку деформування, які називаються позаконтактними зонами деформації. Тому фактичний осередок деформування (область, що знаходиться між лініями M і N) більше геометричного і включає поза контактні зони.

Форма поперечного перетину осередка деформації залежить від форми поперечного перетину профілю, що прокатується і може бути круглою, овальною, квадратною, а також мати форму куточка, балки, рейки і інших простих і складних перетинів. Коли деформацію здійснюють на гладких, циліндрових валках (прокатка листів, стрічки, штаби), форма поперечного перетину осередку деформування має простий вид прямокутного перетину.

До основних понять, які характеризують осередок деформування, відносяться:

- дуга AB (також $A'B'$), по якій метал контактує з валком, називається *дугою захвату*;
- центральний кут AOB (α) називається *кутам захвату*;

– горизонтальна проекція дуги захвату відповідає довжині осередка деформації і позначається l_d .

В процесі прокатки змінюються лінійні розміри штаби - товщина, ширина і довжина. Розглянемо систему показників, які характеризують величину деформації в кожному з цих напрямів.

Зміна товщини штаби характеризується величиною абсолютного і відносного обтиснення, а також коефіцієнтом обтиснення.

1. *Абсолютне обтиснення* - різниця між початковою і кінцевою товщиною штаби

$$\Delta h = h_0 - h_1 \quad (8.1)$$

де Δh - абсолютне обтиснення, мм;

h_0 - товщина штаби перед проходом, мм;

h_1 - товщина штаби після проходу, мм.

2. *Умовне відносне обтиснення* - відношення абсолютного обтиснення до початкової товщини штаби

$$\varepsilon_h = \Delta h / h_0 \quad (8.2)$$

де ε_h - умовне відносне обтиснення.

3. *Істинне відносне обтиснення* - визначається як натуральний логарифм відношення початкової товщини штаби до кінцевої

$$\delta_h = \ln(h_0 / h_1) \quad (8.3)$$

де δ_h - істинне відносне обтиснення.

Відносне обтиснення визначається в долях одиниці або у відсотках; в останньому випадку результати розрахунку по формулах (8.2) і (8.3) множаться на 100 %.

4. *Коефіцієнт обтиснення* - відношення початкової товщини штаби до кінцевої

$$1/\eta = h_0 / h_1 \quad (8.4)$$

де $1/\eta$ - коефіцієнт обтиснення.

Зміна поперечних розмірів штаби називається розширенням. Показники розширення аналогічні показникам висотної деформації.

5. *Абсолютне розширення* - різниця між кінцевою і початковою шириною штаби

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad (8.5)$$

де Δb - абсолютне розширення, мм;

b_1 - ширина штаби після проходу, мм;

b_0 - ширина штаби перед проходом, мм.

6. *Умовне відносне розширення* - відношення абсолютного розширення до початкової ширини штаби

$$\varepsilon_b = \Delta b / b_0 \quad (8.6)$$

де ε_b - умовне відносне розширення.

7. *Істинне відносне розширення* - натуральний логарифм відношення кінцевої ширини штаби до початкової

$$\delta_b = \ln b_1 / b_0 \quad (8.7)$$

де δ_b – істинне відносне розширення.

Умовне і істинне відносне розширення також визначається в долях одиниці або у відсотках.

8. *Коефіцієнт розширення* - відношення ширини штаби після проходу до початкової ширини штаби

$$\beta = b_1/b_0 \quad (8.8)$$

де β – коефіцієнт розширення.

9. *Показник розширення* - відношення абсолютного розширення до абсолютного обтиснення

$$a = \Delta b / \Delta h \quad (8.9)$$

де a – показник розширення.

10. *Абсолютне подовження* - різниця між кінцевою і початковою довжинами штаби

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad (8.10)$$

де Δl - абсолютне подовження, мм;

l_1 - довжина штаби після проходу, мм;

l_0 - довжина штаби перед проходом, мм.

11. *Умовне відносне подовження* - відношення абсолютного подовження до початкової довжини штаби

$$\varepsilon_l = \Delta l / l_0 \quad (8.11)$$

де ε_l – умовне відносне подовження.

12. *Істинне відносне подовження* - натуральний логарифм відношення кінцевої довжини штаби до початкової

$$\delta_l = \ln(l_1/l_0) \quad (8.12)$$

де δ_l – істинне відносне подовження.

Величини Δl , ε_l і δ_l не часто застосовуються на практиці для характеристики подовжньої деформації, проте дуже широко використовується показник, який називається коефіцієнтом витягання.

13. *Коефіцієнт витягання* - відношення довжини штаби після проходу до початкової довжини штаби

$$\lambda = l_1/l_0 \quad (8.13)$$

де λ – коефіцієнт витягання.

Якщо технологічний процес включає декілька проходів штаби через валки, то в цьому випадку розрізняють окремі коефіцієнти витягання (у кожному проході) і загальний коефіцієнт витягання

$$\lambda_{\text{заг}} = l_k/l_0 \quad (8.14)$$

де $\lambda_{\text{заг}}$ – загальний коефіцієнт витягання;

l_k – кінцева довжина штаби після прокатки, мм.

Загальний коефіцієнт витягання можна визначити і з іншої формули

$$\lambda_{\text{заг}} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \dots \cdot \lambda_n \quad (8.15)$$

де $\lambda_1 \div \lambda_n$ – окремі витягання в проходах;

n – число проходів.

Існує також поняття *середнього коефіцієнта витягання* в декількох проходах. Під величиною середнього коефіцієнта витягання мається на увазі такий коефіцієнт витягання, який був би в тому випадку, якщо б коефіцієнти витягання у всіх проходах були однаковими. Тоді можна записати

$$\lambda_{\text{заг}} = \lambda_{\text{сер}} \cdot \lambda_{\text{сер}} \cdot \lambda_{\text{сер}} \dots \cdot \lambda_{\text{сер}} = \lambda_{\text{сер}}^n \quad (8.16)$$

З формули (1.16) отримуємо величину середнього коефіцієнта витягання

$$\lambda_{\text{сер}} = \sqrt[n]{\lambda_{\text{заг}}} \quad (8.17)$$

де $\lambda_{\text{сер}}$ – середній коефіцієнт витягання при прокатуванні.

Довжина осередку деформування визначається по формулі

$$l_d = \sqrt{R_B \cdot \Delta h} \quad (8.18)$$

де l_d – довжина осередку деформування, мм;

R_B – радіус валків кліті, мм, який дорівнює

$$R_B = D_B/2 \quad (8.19)$$

де D_B – діаметр валків, мм.

Кут захвату визначається по формулі

$$\alpha = \arccos[1 - (\Delta h/D_B)] \approx \sqrt{\Delta h/R} \quad (8.20)$$

Об'єм тіла при пластичній деформації змінюється не значно. Тому в теорії пластичної деформації приймається умова сталості об'єму металу: об'єм тіла при пластичній деформації залишається незмінним. Насправді об'єм тіла в процесі пластичної деформації не залишається незмінним. Так при гарячій обробці литого металу відбувається його ущільнення в результаті заварювання раковин, порожнеч, мікротріщин і, відповідно, деяке зменшення об'єму металу. При холодній обробці тиском, навпаки, відбувається деяке збільшення об'єму в результаті утворення мікротріщин. Проте всі ці зміни незначні, і їх можна не враховувати.

Умова сталості об'єму широко використовується в розрахунках зміни форми тіл при всіх процесах обробки тиском.

Тоді маємо

$$V_0 = V_1 \quad (8.21)$$

де V_0, V_1 - відповідно об'єм штаби до и після проходу в кліті.

$$h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1$$

звідки слідує

$$(h_1/h_0) \cdot (b_1/b_0) \cdot (l_1/l_0) = \eta \cdot \beta \cdot \lambda = 1 \quad (8.22)$$

Таким чином, коефіцієнти деформації в трьох основних напрямках зв'язані між собою умовою сталості об'єму металу.

Виходячи з умови сталості об'єму металу можна отримати

$$\lambda = l_1/l_0 = (h_0 \cdot b_0)/(h_1 \cdot b_1) = F_0/F_1 \quad (8.23)$$

де F_0, F_1 – відповідно площа поперечного перетину штаби до и після проходу в кліті, мм².

Таким чином, коефіцієнт витягання характеризує не тільки зміну довжини штаби, але і зміну її площі поперечного перетину.

Оскільки об'єм металу при деформації залишається постійним, то через будь-який поперечний перетин осередку деформування в одиницю часу повинна проходити однакова кількість металу. Ця умова в теорії прокатки називається умовою сталості секундних об'ємів.

Об'єм металу, що проходить через будь-який поперечний перетин осередку деформування в одиницю часу (секунду), складає:

$$F_i \cdot l_i / \tau = F_i \cdot v_i \quad (8.24)$$

де F_i - площа поперечного перетину штаби у будь-якому перетині, мм²;

l_i - поздовжнє переміщення штаби через цей перетин за час τ , мм;

v_i - швидкість руху штаби в даному перетині, м/с.

Тобто умова сталості секундних об'ємів записується

$$\begin{aligned} F_i \cdot v_i &= \text{const}, \\ F_0 \cdot v_0 &= F_i \cdot v_i = F_1 \cdot v_1 \end{aligned} \quad (8.25)$$

де v_0, v_1 - відповідно швидкості руху штаби на вході і виході з валків, м/с.

Площі поперечного перетину штаби у міру просування її від площини входу у валки до площини виходу з валків зменшуються. Тому, щоб зберігалась рівність секундних об'ємів, швидкості часток металу у відповідних перетинах повинні поступово зростати.

З формули (8.25) отримаємо

$$\begin{aligned} v_1 &= F_0 \cdot v_0 / F_1 \\ v_1 &= \lambda \cdot v_0 \end{aligned} \quad (8.26)$$

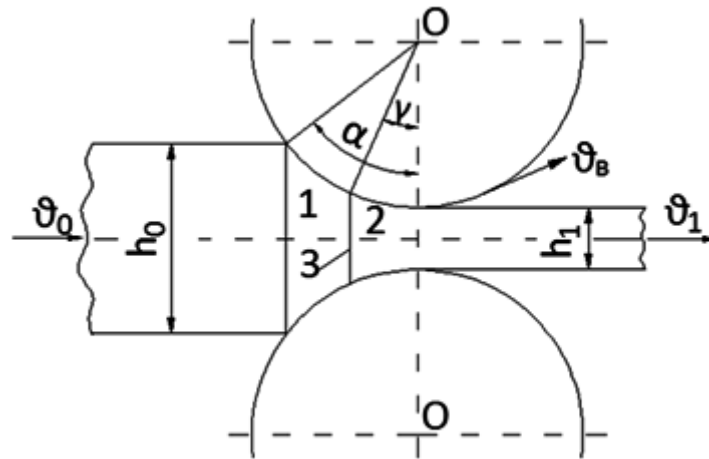
Таким чином, швидкість виходу штаби з валків більше швидкості входу штаби у валки на величину коефіцієнта витягання.

Окрім цього, дослідження показують, що при сталому процесі прокатки швидкість виходу штаби з валків більше окружної швидкості валків, а швидкість входу штаби у валки менше окружної швидкості валків. Це пов'язано з тим, що при обтисненні штаби по висоті деяка кількість металу видавлюється вперед по ходу прокатки: швидкість цих частинок, отримана в результаті деформації, складається з окружної швидкістю валків. Інша частина зміщеного об'єму металу віджимається назад, проти ходу прокатки: швидкість цих частинок віднімається від окружної швидкості валків.

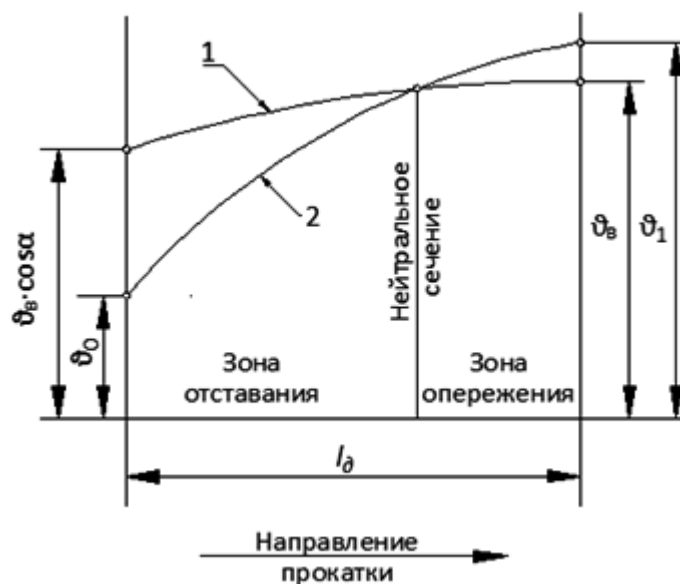
Таким чином, в осередку деформування є дві зони: зона позаднього руху металу або зона відставання (де швидкість штаби менше окружної швидкості валків) і зона попутного руху металу або зона випередження (де співвідношення швидкостей зворотне) (див. рис. 8.5).

Перетин, де швидкості руху штаби і валків однакові, називається нейтральним перетином, а кут, відповідний цьому перетину, - нейтральним кутом.

Отже, випередження - це перевищення швидкості виходу металу з валків в порівнянні з їх окружною швидкістю, а відставання - зменшення швидкості входу металу в валки в порівнянні з їх окружною швидкістю. На рис. 8.6 представлена діаграма, що відображає співвідношення швидкостей валків і металу на всьому протязі осередку деформування.



1 – зона відставання; 2 – зона випередження; 3 – нейтральний перетин
Рисунок 8.5 – Зони відставання і випередження в осередку деформування



1 – горизонтальна складова окружної швидкості валків; 2 – швидкість металу

Рисунок 8.6 – Співвідношення швидкості валків і металу в осередку деформування

Випередження

$$S_{h1} = (v_1 - v_B)/v_B \quad (8.27)$$

де S_{h1} – випередження;

v_B – окружна швидкість обертання валків, м/с.

Випередження можна виразити у відсотках

$$S_{h1} = [(v_1 - v_B)/v_B] \cdot 100\%.$$

Відставання

$$S_{h0} = \frac{\vartheta_B \cdot \cos \alpha - \vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha} = 1 - \frac{\vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha} \quad (8.28)$$

Випередження в розрахунках процесу прокатки визначається за формулою Екелунда

$$S_{h1} = \frac{\gamma^2}{2} \cdot \left(\frac{D_B}{h_1} - 1 \right) \quad (8.29)$$

де γ - нейтральний кут (див. рис. 8.5), град.;

D_B - діаметр валків, мм.

Для знаходження нейтрального кута можна скористатися формулою Екелунда - Павлова

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \beta} \right) \quad (8.30)$$

де β - кут тертя, град., який визначається з формули

$$\beta = \arctan f \quad (8.31)$$

де f - коефіцієнт тертя.

Коефіцієнт тертя розраховується за формулою

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_M) \quad (8.32)$$

де k_1 - коефіцієнт, що враховує матеріал валків;

k_2 - коефіцієнт, що враховує вплив швидкості прокатки;

k_3 - коефіцієнт, що характеризує марку сталі;

T_M - температура металу в даному проході, °С.

Якщо прокатка здійснюється на сталевих валках, то коефіцієнт $k_1 = 1$, якщо на чавунних валках - $k_1 = 0,8$.

Коефіцієнт, що враховує вплив швидкості прокатки, визначається за формулою

$$k_2 = 1,67 \cdot \vartheta_1^{-0,25} - 0,4 \quad (8.33)$$

При швидкостях прокатки менше 2 м/с коефіцієнт $k_2 = 1$, при швидкостях прокатки більше 20 м/с коефіцієнт $k_2 = 0,4$.

Коефіцієнт, що характеризує марку сталі

$$k_3 = 0,97926 + [C] \cdot (0,0031 \cdot [Ni] + 0,00175 \cdot [W]) + 0,02457 \cdot [Mn] + 0,02144 \cdot [Cr] + 0,001 \cdot [Mo] \quad (8.34)$$

де [...] - вміст даного елементу в сталі у відсотках.

Для вуглецевих сталей коефіцієнт $k_3 = 1$.

8.2.2 Завдання на виконання розрахунків параметрів формозмінювання при подовжньому прокатуванні штаб

Для виконання розрахунку студентам указуються вихідні дані, які є обов'язковими і не можуть бути змінені в процесі розрахунку.

Як приклад нижче приведений розрахунок параметрів формозмінювання при прокатуванні заготовки товщиною $h_0=180$ мм, шириною $b_0=500$ мм і довжиною $l_0=5000$ мм в реверсивній кліті за 7 проходів з обтисненнями в

кожному проході $\Delta h_1 \dots \Delta h_7$ відповідно 45, 40, 25, 20, 15, 10, 5 мм. При цьому розширення в кожному проході склало $\Delta b_1 \dots \Delta b_7$ 15, 14, 12, 12, 11, 9, 7 мм відповідно.

В результаті розрахунку повинні бути визначені:

- товщина штаби після кожного проходу;
- відносне і істинне відносне обтиснення після кожного проходу;
- ширина штаби після кожного проходу;
- довжина штаби після кожного проходу;
- коефіцієнти обтиснення, розширення і витягання;
- загальний коефіцієнт витягання;
- середній коефіцієнт витягання.

8.2.3 Приклад визначення параметрів формозмінювання при прокатуванні

Проведемо розрахунок всіх параметрів деформації для першого проходу. Товщину штаби після проходу визначаємо по формулі

$$h_1 = h_0 - \Delta h_1 = 180 - 45 = 135 \text{ мм.}$$

Відносне обтиснення в першому проході

$$\varepsilon_{h1} = \Delta h_1 / h_0 = 45 / 180 = 0,25 \text{ или } 25 \text{ \%}.$$

Істинне відносне обтиснення розраховуємо по формулі

$$\delta_{h1} = \ln(h_0 / h_1) = \ln(180 / 135) = 0,288 \text{ или } 28,8 \text{ \%}.$$

Ширина штаби після проходу

$$b_1 = b_0 + \Delta b_1 = 500 + 15 = 515 \text{ мм.}$$

Довжину штаби після проходу можна знайти, використовуючи умову сталості об'єму металу при прокатуванні

$$h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1.$$

З умови сталості об'єму отримуємо

$$l_1 = \frac{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{h_1 \cdot b_1} = \frac{180 \cdot 500 \cdot 5000}{135 \cdot 515} = 6472 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт обтиснення в першому проході

$$1/\eta_1 = h_0 / h_1 = 180 / 135 = 1,333.$$

Коефіцієнт розширення

$$\beta_1 = b_1 / b_0 = 515 / 500 = 1,030.$$

Коефіцієнт витягання

$$\lambda_1 = l_1 / l_0 = 6472 / 5000 = 1,294.$$

Загальний коефіцієнт витягання для 1-го проходу дорівнює:

$$\lambda_{\text{заг1}} = l_1 / l_0 = 6472 / 5000 = 1,294,$$

для 2-го проходу $\lambda_{\text{заг2}} = l_2 / l_0$, і т. д. до 7-го проходу.

Для решти проходів вищенаведені параметри розраховуються аналогічно.

Кінцеві результати розрахунку зведені в таблицю 8.4.

Таблиця 8.4 – Результати розрахунку параметрів формозмінювання при поздовжньому прокатуванні штаби

Номер проходу (n)	h , мм	b , мм	l , мм	ε_h , %	δ_h , %	$\frac{1}{\eta}$	β	λ	$\eta \cdot \beta \cdot \lambda$	$\lambda_{\text{заг}}$
1	135	515	6472	25,0	28,8	1,333	1,030	1,294	1,0	1,294
2	95	529	8954	29,6	35,1	1,421	1,027	1,383	1,0	1,791
3	70	541	11882	26,3	30,5	1,357	1,023	1,327	1,0	2,377
4	50	553	16274	28,6	33,6	1,400	1,022	1,370	1,0	3,255
5	35	564	22795	30,0	35,7	1,429	1,020	1,401	1,0	4,559
6	25	573	31412	28,6	33,6	1,400	1,016	1,378	1,0	6,283
7	20	580	38791	20,0	22,3	1,250	1,012	1,235	1,0	7,759

Середній коефіцієнт витягання

$$\lambda_{\text{сер}} = \sqrt[7]{\lambda_{\text{заг}}} = \sqrt[7]{7,757} = 1,340.$$

Варіанти вихідних даних для виконання завдання № 1 приведені в табл. 8.5.

Побудувати графік залежності загального коефіцієнту витягання $\lambda_{\text{заг}}$ від номера проходу за прикладом рис. 8.7.

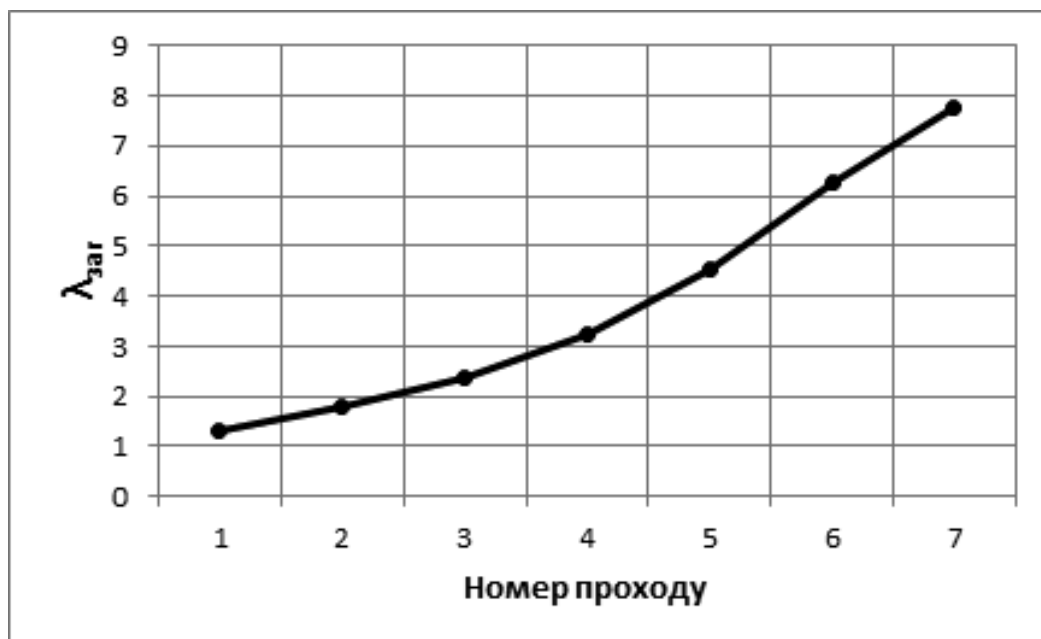


Рисунок 8.7 – Залежність загального коефіцієнту витягання $\lambda_{\text{заг}}$ від номера проходу

8.2.4 Варіанти індивідуальних завдань

Таблиця 8.5 – Вихідні дані для розрахунку параметрів формозмінювання при поздовжньому прокатуванні штаби

№ варіанту	h ₀ , мм	b ₀ , мм	l ₀ , мм	Δh ₁ , мм	Δh ₂ , мм	Δh ₃ , мм	Δh ₄ , мм	Δh ₅ , мм	Δh ₆ , мм	Δh ₇ , мм	Δb ₁ , мм	Δb ₂ , мм	Δb ₃ , мм	Δb ₄ , мм	Δb ₅ , мм	Δb ₆ , мм	Δb ₇ , мм	D _в , мм
1	200	550	4500	45	35	30	20	10	10	5	20	17	16	14	12	10	8	950
2	180	450	5000	30	30	25	20	15	10	5	15	15	13	12	10	9	7	850
3	220	530	4800	45	40	35	25	15	10	10	19	17	15	15	11	10	7	1000
4	150	500	5200	30	25	20	15	10	10	10	13	10	9	9	7	6	5	800
5	190	520	4600	40	30	30	20	15	10	5	17	15	11	10	8	7	6	900
6	210	500	5200	50	35	25	25	15	10	10	15	14	14	12	10	9	7	930
7	160	490	4600	35	30	20	10	10	10	5	18	16	15	12	9	8	8	1050
8	220	600	4500	50	40	30	20	20	10	10	20	18	14	12	12	7	6	800
9	170	500	5000	30	25	15	15	15	10	5	16	14	13	10	9	9	7	950
10	200	480	4900	45	35	25	20	15	10	5	20	17	15	14	11	10	6	900
11	240	650	5300	55	45	35	25	15	10	10	15	12	11	9	9	7	5	1000
12	140	500	4700	25	25	20	15	10	10	5	13	10	9	6	5	4	4	1200
13	210	570	5400	40	30	30	20	20	10	10	16	14	13	12	10	9	7	800
14	170	580	4900	35	25	20	20	10	5	5	15	12	10	9	9	6	5	930
15	160	550	5500	25	20	20	15	15	10	5	14	14	12	10	8	8	5	850
16	200	640	5000	45	30	20	15	15	10	10	18	15	13	13	9	8	7	800
17	140	480	5300	25	25	20	15	10	10	5	13	13	10	9	7	5	4	800
18	230	500	4900	45	35	25	20	15	15	10	17	15	15	12	11	9	7	950
19	190	620	6000	30	30	20	20	20	10	10	14	13	11	9	8	6	4	850
20	220	650	5000	40	30	30	20	15	15	10	19	16	15	12	9	9	6	1000

8.3 Розрахунок змінювання температури металу при гарячому прокатуванні в реверсивній кліті

8.3.1 Теоретичний вступ

Тепловий режим є одним з визначальних чинників технології прокатки. Він безпосередньо пов'язаний з режимами обтиснень, швидкостей, натягнень; від нього залежать енергосилові параметри прокатних станів, зусилля, що діють на валки і інші деталі робочих клітей, механічні властивості, точність розмірів профілю, форма, структура і якість поверхні готового прокату, профілізація і стійкість прокатних валків, стабільність всього технологічного процесу.

Тепловий режим розраховується з урахуванням теплового балансу, залежного від процесів конвективного, контактного, променевого теплообміну штаби і прокатних валків з рідиною, що охолоджує, навколишнім середовищем і деталями прокатного стану. Ці процеси протікають при гарячому і холодному прокатуванні з істотними відмінностями, що вимагають принципово різного підходу до методів розрахунку основних параметрів теплового режиму: температури штаби по проходах, температури і теплового профілю робочих і опорних валків, витрати рідини, необхідної для їх охолодження.

При гарячому прокатуванні визначальним параметром теплового режиму є температура штаби, заздалегідь нагрітої до 1100 – 1280°C і яка остигає в процесі деформації до 800 – 1100°C. Втрата тепла штабою відбувається шляхом контактного теплообміну з валками, випромінювання в навколишнє середовище, конвекції охолоджуючої води і навколишнього повітря. Одночасно з охолодженням штаби під час прокатки відбувається і деяке підвищення її температур за рахунок виникнення тепла в результаті роботи, що витрачається на деформацію і тертя між металом і валками. Температура валків при гарячому прокатуванні на порядок нижче за температуру штаби (60 – 120°C) і визначається нею, як незалежний початковий параметр. Коливання температури валків, викликані зміною витрати і температури води, що подається на валки, мало впливають на температуру прокатуваного металу.

Через деякий час після початку роботи стану середня температура валків, проводкової арматури і інших деталей стану, дотичних з гарячою штабою, встановлюється приблизно постійною і змінюється лише при зміні сортаменту, ритму або режиму прокатки.

При холодному прокатуванні визначальним параметром теплового режиму є тепловиділення за рахунок пластичної деформації і тертя в зоні контакту штаби і валків. При цьому в стан зазвичай поступає штаба, що має температуру, близьку до температури навколишнього середовища (20 – 40°C); по мірі обтиснення температура штаби збільшується і на виході із стану досягає 150 – 300°C. Температура валків при холодному прокатуванні одного порядку з температурою штаби і залежить від розподілу тепла, що виділилося, між штабою і валками, і інтенсивності теплообміну їх з охолоджувальною рідиною і навколишнім середовищем.

Отже, на відміну від гарячої прокатки, температура штаби при розрахунку теплового режиму холодної прокатки не може бути незалежним початковим параметром і підлягає визначенню одночасно з температурою валків.

Враховуючи істотні відмінності теплових процесів, що протікають на станах гарячої і холодної прокатки, тепловий розрахунок цих станів проводиться по-різному.

У даних методичних вказівках розглянута тільки методика теплового розрахунку станів гарячої прокатки. Розрахунок полягає в наступному.

Спочатку задається температура нагріву металу під прокатку, що є початковим параметром теплового режиму стана.

Потім визначаються послідовно, від проходу до проходу, зміни температури металу, викликані контактом з валками, виділенням тепла за рахунок пластичної деформації, гідрозбивом окалини, охолодженням на рольгангах, тощо. При виконанні цих розрахунків температуру валків вважають заздалегідь відомою, приймаючи її наближене середнє значення. Зміни температури металу, викликані кожним з чинників, обчислюються незалежно один від одного. Для розрахунків вказаних змін температури використовуються або емпіричні формули, що виправдали себе на практиці, або формули, засновані на теорії теплопередачі, уточнені за практичними даними.

При виведенні формул для розрахунку зниження температури штаби за рахунок втрат тепла випромінюванням приймають наступні допущення:

температурний градієнт по товщині, ширині і довжині охолоджуваного металу відсутній;

тепловипромінювання верхньої і нижньої поверхонь штаби однакове;

теплоємність, щільність і коефіцієнт випромінювання є постійними величинами, не залежними від температури і стана випромінюючої поверхні.

Залежності, що описують падіння температури унаслідок випромінювання, зазвичай отримують сумісним вирішенням рівняння Стефана - Больцмана і рівняння, що характеризує зміни тепловмісту штаби за час τ :

$$dQ = F \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{серед}}}{100} \right)^4 \right] \cdot d\tau \quad (8.34)$$

$$dQ = c \cdot \rho \cdot V \cdot dT \quad (8.35)$$

де dQ – змінення тепловмісту за час $d\tau$;

F – поверхня випромінювання, м^2 ;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – коефіцієнт випромінювання;

σ – коефіцієнт Стефана – Больцмана, $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

T_0 – початкова температура металу, К ;

$T_{\text{серед}}$ – температура навколишнього середовища, К ;

c – коефіцієнт теплоємності, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

ρ – щільність металу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

V – об'єм металу, м^3 .

Не враховуючи величину $\left(\frac{T_{\text{серед}}}{100}\right)^4$, як істотно меншу, ніж величина $\left(\frac{T_0}{100}\right)^4$, отримаємо:

$$\frac{dT}{T^4} = \frac{10^{-8} \cdot F \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot d\tau}{c \cdot \rho \cdot V} \quad (8.36)$$

Після інтегрування формули (8.36) можна отримати формулу для визначення температури металу після втрат тепла випромінюванням

$$T_{\text{випр}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot 10^9 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot V}\right) + \left(\frac{1000}{T_0}\right)^3}} \quad (8.37)$$

де $T_{\text{випр}}$ – температура штаби після втрат тепла випромінюванням, К;

τ - час охолодження, с.

Для спрощення розрахунку можна користуватися формулою Г.П. Іванцова

$$T_{\text{випр}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot \tau}{h}\right) + \left(\frac{1000}{T_0}\right)^3}} \quad (8.38)$$

де h – товщина охолоджуваної штаби, мм.

Зміну температури за рахунок конвективних втрат тепла визначають вирішенням наступної системи рівнянь

$$dQ = \alpha_k \cdot (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot F \cdot d\tau \quad (8.39)$$

$$dQ = c \cdot \rho \cdot V \cdot dT \quad (8.40)$$

де α_k – коефіцієнт конвективної теплопередачі, Дж/(м² К).

Тоді, вирішуючи систему рівнянь при допущеннях, розглянутих при описанні втрат тепла випромінюванням, отримаємо

$$dT = \frac{\alpha_k \cdot (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot F}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot d\tau \quad (8.41)$$

Втрати тепла металом при конвективному теплообміні можна розраховувати по формулі

$$\Delta T_{\text{конв}} = (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot e^{-\frac{\alpha_k \cdot F \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot V}} + T_{\text{серед}} \quad (8.42)$$

де $\Delta T_{\text{конв}}$ – втрати тепла металом при конвективному теплообміні, К.

Також для спрощення розрахунку зміни температури штаби за рахунок конвективного теплообміну можна скористатися наступною формулою

$$\Delta T_{\text{конв}} = (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot e^{-\frac{0,445 \cdot \tau}{h}} + T_{\text{серед}} \quad (8.43)$$

Втрати тепла конвекцією різні на різних ділянках технологічного потоку, і збільшуються по мірі збільшення швидкості прокатки, зменшення температури і товщини штаби, тобто збільшуються від нагрівальних печей до ділянки змотування.

Тому втрати теплоти конвекцією в основному розраховують при розрахунку зміни температури металу в чистових клітках, в останніх міжкліткових проміжках, на відвідному рольгангу і нехтують цими втратами при розрахунку зміни температури штаби в чорнових клітках і на проміжному рольгангу. Не врахування конвективних втрат в цьому випадку дає неточність кінцевого результату розрахунку температури не більш, ніж на $0,2 \div 0,3 \%$.

Розрахунок втрат тепла штабою за рахунок контакту з робочими валками заснований на припущенні відсутності теплообміну з навколишнім середовищем. Зміна температури металу за рахунок втрат тепла при контакті з валками визначається по формулі Х. Венцеля

$$\Delta T_{\text{кв}} = \frac{4,87}{(h_0 + h_1)} (T_0 - T_{\text{в}}) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_0 \cdot l_{\text{д}}}{1000 \cdot (h_0 + h_1) \cdot v_{\text{сер}}}} \quad (8.44)$$

де $\Delta T_{\text{кв}}$ – падіння температури металу в проході за рахунок втрат при контакті з валками, К;

$T_{\text{в}}$ – температура валків, К;

$v_{\text{сер}}$ – середня швидкість прокатки в даному проході, м/с.

Середня швидкість прокатки в проході

$$v_{\text{сер}} = (v_0 + v_1) / 2 \quad (8.45)$$

Швидкість входу заготовки в кліть можна визначити, використовуючи формулу (8.26), якщо відомі швидкість прокатки в даному проході і коефіцієнт витягання у цьому ж проході.

Підвищення температури прокатуваної штаби за рахунок енергії деформації визначається рівнянням

$$\Delta T_{\text{деф}} = \frac{A_{\text{деф}}}{c \cdot \rho \cdot V} \quad (8.46)$$

де $\Delta T_{\text{деф}}$ – деформаційний розігрів, °С;

$A_{\text{деф}}$ – робота, що витрачається на пластичну деформацію, Дж.

Робота деформації

$$A_{\text{деф}} = -p_{\text{сер}} \cdot \frac{V}{h} \cdot dh \quad (8.47)$$

де $p_{\text{сер}}$ – середнє нормальне контактне напруження, МПа.

Виконуючи інтегрування формули (8.47) отримаємо формулу для визначення повної роботи деформації

$$A_{\text{деф}} = p_{\text{сер}} \cdot V \cdot \ln(h_0/h_1) \quad (8.48)$$

Оскільки при прокатуванні $80 \div 90 \%$ роботи йде на підвищення температури металу, то відповідно деформаційний розігрів, згідно формулам (8.46) і (8.48) можна розрахувати по формулі

$$\Delta T_{\text{деф}} = 0,85 \cdot \frac{p_{\text{сер}}}{c \cdot \rho} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (8.49)$$

Середнє нормальне контактне напруження розраховується по формулі

$$p_{\text{сер}} = \beta \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_s \quad (8.50)$$

де β – коефіцієнт Лодє, який враховує вплив головної нормальної напруги, що діє у напрямку осі бочки валків;

n_σ - коефіцієнт напруженого стану;

σ_s – опір металу пластичній деформації, МПа.

Коефіцієнт Лодє при плоскій (двовірній) деформації дорівнює $\beta = 1,15$.

Коефіцієнт напруженого стану визначається по формулі

$$n_\sigma = n'_\sigma \cdot n''_\sigma \cdot n'''_\sigma \cdot n_b \quad (8.51)$$

де n'_σ – коефіцієнт, що враховує вплив зовнішнього тертя на напружений стан в осередку деформування;

n''_σ – коефіцієнт, що враховує вплив зовнішніх зон на напружений стан в осередку деформування;

n'''_σ – коефіцієнт, що враховує вплив натягнення штаби на напружений стан в осередку деформування;

n_b – коефіцієнт, що враховує вплив ширини штаби на напружений стан в осередку деформування.

При розрахунку коефіцієнта n'_σ враховується геометрія осередку деформування, а саме відношення довжини осередку деформування до середньої товщини штаби в проході $l_d/h_{\text{сер}}$

$$\text{при } \frac{l_d}{h_{\text{сер}}} > (4 \div 5) \quad n'_\sigma = 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{l_d}{h_{\text{сер}}} \quad (8.52)$$

де $h_{\text{сер}}$ - середня розрахована товщина штаби в проході, мм

$$h_{\text{сер}} = (h_0 + h_1)/2 \quad (8.53)$$

$$\text{при } 2 < \frac{l_d}{h_{\text{сер}}} < 4 \quad n'_\sigma = \frac{2 \cdot h_n}{\Delta h \cdot (\delta - 1)} \cdot \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right] \quad (8.54)$$

де h_n - висота нейтрального перетину, мм;

δ – коефіцієнт, який визначається за формулою Целікова А.И.

$$\delta = 2 \cdot f \cdot (l_d/\Delta h) \quad (8.55)$$

$$\frac{h_n}{h_1} = \left(\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right)^{\frac{1}{\delta}} \quad (8.56)$$

$$\text{при } \frac{l_d}{h_{\text{сер}}} < 2 \quad n'_\sigma = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{l_d}{h_{\text{сер}}} \quad (8.57)$$

Коефіцієнт n''_σ при $l_d/h_{\text{сер}} < 1$ визначається по формулі

$$n''_\sigma = (l_d/h_{\text{сер}})^{-0,4} \quad (8.58)$$

Якщо $l_d/h_{\text{сер}} > 1$, то $n''_\sigma = 1$.

Коефіцієнт n_{σ}''' , якщо немає напруження, дорівнює 1.

У випадку, коли напруження має місце, то коефіцієнт n_{σ}''' розраховується по формулі

$$n_{\sigma}''' = 1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2 \cdot p'_{\text{сер}}} \quad (8.59)$$

де σ_0 і σ_1 – відповідно величини заднього і переднього натягань, МПа;

$p'_{\text{сер}}$ - середній нормальний контактний тиск без урахування натягання штаби, МПа.

Коефіцієнт n_{σ}''' можна розраховувати і по формулі Корольова (для холодної прокатки)

$$n_{\sigma}''' = \left(\varphi - \frac{\sigma_1}{1,15 \cdot \sigma_{s0}} \right) \cdot \frac{1}{m_1} \cdot (e^{m_1 \cdot \psi_n} - 1) + \left(1 - \frac{\sigma_0}{1,15 \cdot \sigma_{s0}} \right) \cdot (e^{m_0 \cdot (1 - \psi_n)} - 1) \quad (8.60)$$

де φ – коефіцієнт зміцнення в даному проході;

σ_{s0} – опір металу деформації перед проходом, МПа;

m_0, m_1 - коефіцієнти;

ψ_n - коефіцієнт, який характеризує положення нейтрального перетину в осередку деформування.

Коефіцієнт зміцнення знаходиться з формули

$$\varphi = \sigma_{s1} / \sigma_{s0} \quad (8.61)$$

де σ_{s1} - опір металу деформації після проходу, МПа.

Коефіцієнти m_0 і m_1 в кожному проході

$$m_0 = 2 \cdot f \cdot (l_d / h_0) \quad (8.62)$$

$$m_1 = 2 \cdot f \cdot (l_d / h_1) \quad (8.63)$$

де f - коефіцієнт тертя.

Коефіцієнт тертя розраховується за формулою

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_m) \quad (8.64)$$

де k_1 - коефіцієнт, що враховує матеріал валків;

k_2 - коефіцієнт, що враховує вплив швидкості прокатки;

k_3 - коефіцієнт, що характеризує марку сталі;

T_m - температура металу в даному проході, °С.

Якщо прокатка здійснюється на сталевих валках, то коефіцієнт $k_1 = 1$, якщо на чавунних валках - $k_1 = 0,8$.

Коефіцієнт, що враховує вплив швидкості прокатки знаходиться по формулі

$$k_2 = 1,67 \cdot v_1^{-0,25} - 0,4 \quad (8.65)$$

При швидкостях прокатки менше 2 м/с коефіцієнт $k_2 = 1$; при швидкостях більше 20 м/с коефіцієнт $k_2 = 0,4$.

Коефіцієнт, що характеризує марку сталі, визначається за формулою

$$k_3 = 0,97926 + [C] \cdot (0,0031 \cdot [Ni] + 0,00175 \cdot [W]) + 0,02457 \cdot [Mn] + 0,02144 \cdot [Cr] + 0,001 \cdot [Mo] \quad (8.66)$$

де [...] - содержание данного элемента а стали в процентах.

Для вуглецевих сталей коефіцієнт k_3 дорівнює 1.

Коефіцієнт ψ_n визначається по формулі

$$\psi_n = \frac{m_0}{m_0 + m_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{m_0} \cdot \ln \left(\frac{\varphi - \frac{\sigma_1}{\sigma_{s0}}}{1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{s0}}} \right) \right] \quad (8.67)$$

Коефіцієнт n_b залежить від відношення середньої ширини штаби до довжини осередку деформування, тобто $b_{сер}/l_d$, де $b_{сер}$ - середня ширина штаби, мм:

$$b_{сер} = (b_0 + b_1)/2 \quad (8.68)$$

При $b_{сер}/l_d > 5$ $n_b = 1$.

При відношенні середньої ширини штаби до довжини осередку деформування менше п'яти, коефіцієнт n_b розраховується по формулі

$$n_b = \frac{1 + \left(\frac{3 \cdot b_{сер} - l'_d}{6 \cdot b_{сер}} \right) \cdot f \cdot \frac{l'_d}{h_{сер}}}{1 + \frac{f}{2} \cdot \frac{l'_d}{h_{сер}}} \quad (8.69)$$

де l'_d - приведена довжина осередку деформування, мм.

$$l'_d = l_d \cdot \left[1 - \frac{tg\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{f} \right] \quad (8.70)$$

Опір металу деформації визначається по формулі

$$\sigma_s = k \cdot \sigma_0 \cdot \xi^a \cdot (10 \cdot \varepsilon)^b \cdot (T/1000)^c \quad (8.71)$$

де k, a, b, c - коефіцієнти для конкретної марки сталі;

σ_0 - базовий опір металу деформації, який отримано методом розтягнення при стандартних умовах: $\varepsilon = 10\%$; $\xi = 1\text{с}^{-1}$; $T = 1000^\circ\text{C}$;

T - температура металу при входе в клеть (см. формулу 8.38);

ξ - швидкість деформації, с^{-1} , яка визначається по формулі

$$\xi = \vartheta_1 \cdot \varepsilon_h / l_d \quad (8.72)$$

Коефіцієнти k, a, b, c визначаються по таблиці 8.7.

8.3.2 Завдання для розрахунку змінювання температури металу по проходам при реверсивному прокатуванні

У завданні необхідно визначити температуру металу після кожного проходу при прокатуванні заготовки в реверсивній кліті. Вихідні дані беруться відповідно до варіанту домашнього завдання по таблиці 8.5 і додатковими даними, представленими в таблиці 8.8.

Нижче приведений розрахунок змінювання температури металу при реверсивному прокатуванні заготовки із сталі мазкі 3сп товщиною $h_0=180$ мм, шириною $b_0=500$ мм і довжиною $l_0=5000$ мм за 7 проходів з обтисненнями в кожному проході відповідно $\Delta h_1 \dots \Delta h_7 = 45, 40, 25, 20, 15, 10, 5$ мм. Прокатка здійснюється на сталевих валках діаметром $D_B=930$ мм зі швидкостями $v_1 \dots v_7 = 2,3; 2,4; 2,5; 2,7; 2,9; 3,0; 3,2$ м/с відповідно по проходах. Температура нагріву заготовки в методичній печі складає $T_0=1280^\circ\text{C}$; відстань від печі до кліті $L=20$ м; швидкість транспортування заготовки до кліті $v_{\text{тр}} = 1,7$ м/с.

8.3.3 Приклад визначення змінювання температури металу по проходах

Розрахунок будемо вести для центральної по довжині точки розкату. Відповідно до умов завдання заготовка нагрівається в методичній печі до температури 1280°C . Після видачі з печі вона транспортується по рольгангу до робочої кліті, внаслідок чого відбувається зниження температури металу із-за втрат теплоти випромінюванням в навколишнє середовище. Для визначення температури металу після втрат тепла випромінюванням можна скористатися формулою (8.38).

Для нашого випадку час охолодження заготовки при транспортуванні її від печі до кліті визначатиметься часом її транспортування

$$\tau_{\text{охл1}} = \frac{L}{v_{\text{тр}}} + \frac{l_0/2}{v_0}$$

де $\tau_{\text{охл1}}$ - час охолодження металу при транспортуванні його від печі до кліті, с;

L - відстань від печі до кліті, м;

$v_{\text{тр}}$ - швидкість транспортування заготовки від печі до кліті, м/с.

Швидкість входу заготовки в кліть визначаємо, використовуючи формулу (8.26)

$$v_0 = v_1/\lambda_1 = 2,3/1,294 = 1,78 \text{ м/с.}$$

Отже, час охолодження заготовки при її транспортуванні від печі до кліті складе

$$\tau_{\text{охл1}} = \frac{20}{1,7} + \frac{5/2}{1,78} = 13,2 \text{ с.}$$

Тепер можна визначити температуру металу перед першим проходом після втрат теплоти випромінюванням (формула 8.38). Температуру металу визначатимемо не в Кельвінах, а відразу в градусах за Цельсієм, і позначимо її $T_{\text{вх}}$, тобто температура металу при вході в прокатну кліть

$$T_{\text{вх1}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot \tau_{\text{охл1}}}{h_0}\right) + \left(\frac{1000}{T_0 + 273}\right)^3}} - 273 =$$

$$= \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot 13,2}{180}\right) + \left(\frac{1000}{1280 + 273}\right)^3}} - 273 = 1272^\circ\text{C}.$$

Таким чином, в кліть заготівка входить з температурою 1272°C .

Далі визначаємо втрати тепла за рахунок контакту з ватками. При цьому приймаємо температуру валків $T_B = 80^\circ\text{C}$.

Середня швидкість прокатки в першому проході (формула 8.45)

$$\vartheta_{\text{сер1}} = (\vartheta_0 + \vartheta_1)/2 = (1,78 + 2,3)/2 = 2,04 \text{ м/с}.$$

Радіус валків кліті (формула 8.19)

$$R_B = 930/2 = 465 \text{ мм}.$$

Тоді довжина осередку деформування в першому проході (формула 8.18)

$$l_{\text{д1}} = \sqrt{R_B \cdot \Delta h_1} = \sqrt{465 \cdot 45} = 144,7 \text{ мм}.$$

Таким чином, падіння температури при контакті з валками в першому проході (формула 8.44) дорівнює

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{кв1}} &= \frac{4,87}{(h_0 + h_1)} (T_{\text{вх1}} - T_B) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_0 \cdot l_{\text{д1}}}{1000 \cdot (h_0 + h_1) \cdot \vartheta_{\text{сер1}}}} = \\ &= \frac{4,87}{(180 + 135)} (1272 - 80) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 180 \cdot 144,7}{1000 \cdot (180 + 135) \cdot 2,04}} = 5^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Для визначення деформаційного розігрівання приймаємо коефіцієнт теплоємності для сталі $c = 683,2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$, щільність металу $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$.

Оскільки для виведення диференціального рівняння контактного тиску використовується умова пластичності при двовимірній деформації, то в цьому випадку нехтуємо розрахованим раніше розширенням і для розрахунку середнього контактного тиску приймаємо коефіцієнт Лоді рівним 1,15.

Для нашого випадку в першому проході (формула 8.53)

$$h_{\text{сер1}} = (h_0 + h_1)/2 = (180 + 135)/2 = 157,5 \text{ мм}.$$

Тому відношення $l_{\text{д1}}/h_{\text{сер1}} = 144,7/157,5 = 0,918 < 2$ (формула 8.57), звідки отримуємо

$$n'_{\sigma 1} = 1 + 0,918/6 = 1,153.$$

Для першого проходу (оскільки $l_{\text{д1}}/h_{\text{сер1}} = 144,7/157,5 = 0,918 < 1$, формула 8.58), то

$$n''_{\sigma 1} = (0,918)^{-0,4} = 1,035.$$

Оскільки в нашому прикладі розрахунку натягнення відсутнє, то коефіцієнт $n'''_{\sigma} = 1$.

Середня ширина штаби в першому проході (формула 8.68)

$$b_{\text{сер1}} = (b_0 + b_1)/2 = (500 + 515)/2 = 507,5 \text{ мм}.$$

Відношення $b_{\text{сер1}}/l_{\text{д1}} = 507,5/144,7 = 3,507 < 5$, тому розраховуємо коефіцієнт n_{b1} по формулі (8.69).

Спочатку визначаємо кут захвату (формула 8.20)

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_1}{D_B}\right) = \arccos\left(1 - \frac{45}{930}\right) = 17,9^\circ.$$

Далі визначаємо коефіцієнт тертя. Оскільки в нашому випадку прокатка відбувається на сталевих валках, то коефіцієнт $k_1 = 1$.

Для першого проходу коефіцієнт k_2 дорівнює (формула 8.65)

$$k_2 = 1,67 \cdot \vartheta_1^{-0,25} - 0,4 = 1,67 \cdot 2,3^{-0,25} - 0,4 = 0,956.$$

Для сталі марки 3сп приймаємо $k_3 = 1$. Таким чином, коефіцієнт тертя в першому проході (формула 8.64) дорівнює

$$f_1 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_{\text{вх1}}) = \\ = 1 \cdot 0,956 \cdot 1 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot 1272) = 0,40.$$

Тоді по формулі 8.70

$$l'_{\text{д1}} = l_{\text{д1}} \cdot \left[1 - \frac{tg\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}{f_1}\right] = 144,7 \cdot \left[1 - \frac{tg\left(\frac{17,9}{2}\right)}{0,40}\right] = 87,1 \text{ мм.}$$

По формулі (8.69) знаходимо

$$n_{b1} = \frac{1 + \left(\frac{3 \cdot b_{\text{сер1}} - l'_{\text{д1}}}{6 \cdot b_{\text{сер1}}}\right) \cdot f_1 \cdot \frac{l'_{\text{д1}}}{h_{\text{сер1}}}}{1 + \frac{f_1}{2} \cdot \frac{l'_{\text{д1}}}{h_{\text{сер1}}}} = \frac{1 + \left(\frac{3 \cdot 507,5 - 87,1}{6 \cdot 507,5}\right) \cdot 0,40 \cdot \frac{87,1}{157,5}}{1 + \frac{0,40}{2} \cdot \frac{87,1}{157,5}} = 0,994.$$

Таким чином, коефіцієнт напруженого стану в першому проході нашого прикладу дорівнює (формула 8.51)

$$n_{\sigma1} = n'_{\sigma1} \cdot n''_{\sigma1} \cdot n'''_{\sigma1} \cdot n_{b1} = 1,153 \cdot 1,034 \cdot 1 \cdot 0,994 = 1,186.$$

Швидкість деформації в першому проході (формула 8.72)

$$\xi_1 = \vartheta_1 \cdot \varepsilon_{h1} / l_{\text{д1}} = 2,3 \cdot 0,25 / 144,7 \cdot 10^{-3} = 3,97 \text{ с}^{-1}.$$

Для сталі 3сп коефіцієнти дорівнюють:

$$k = 0,96, \sigma_0 = 90,7 \text{ МПа}, a = 0,124, b = 0,167, c = -2,54.$$

Тому опір металу деформації в першому проході складе (формула 8.71)

$$\sigma_{s1} = k \cdot \sigma_0 \cdot \xi_1^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_{h1})^b \cdot (T_{\text{вх1}}/1000)^c = \\ = 0,96 \cdot 90,7 \cdot 3,97^{0,124} \cdot (10 \cdot 0,25)^{0,167} \cdot (1272/1000)^{-2,54} = 65,3 \text{ МПа.}$$

Отже, тепер можна знайти середнє нормальне контактне напруження (формула 8.50)

$$p_{\text{сер1}} = \beta \cdot n_{\sigma1} \cdot \sigma_{s1} = 1,15 \cdot 1,186 \cdot 65,3 = 89,1 \text{ МПа.}$$

Тоді деформаційним розігрівом в першому проході буде (формула 8.49):

$$\Delta T_{\text{деф1}} = 0,85 \cdot \frac{p_{\text{сер1}}}{c \cdot \rho} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} = 0,85 \cdot \frac{89,1 \cdot 10^6}{683,2 \cdot 7850} \cdot \ln \frac{180}{135} = 4^\circ\text{C}.$$

Знаючи втрати температури при контакті з валками і деформаційний розігрів, можна знайти температуру металу при виході його з кліті після першого проходу:

$$T_{\text{вих1}} = T_{\text{вх1}} - \Delta T_{\text{кв1}} + \Delta T_{\text{деф1}} = 1272 - 5 + 4 = 1271^\circ\text{C}.$$

Після виходу з кліті після першого проходу розкат починає охолоджуватися за рахунок випромінювання, тому так само, як і для першого

проходу визначаємо температуру металу перед входом в кліть в другому проході (формула 8.38):

$$T_{\text{вх2}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot \tau_{\text{охл2}}}{h_1}\right) + \left(\frac{1000}{T_{\text{м1}} + 273}\right)^3}} - 273$$

де $\tau_{\text{охл2}}$ - час охолодження металу перед другим проходом, с.

Час охолодження розкату буде дорівнювати

$$\tau_{\text{охл2}} = \tau_{\text{вих1}} + \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{вх2}}$$

де $\tau_{\text{вих1}}$ - час виходу штаби з кліті в першому проході, с;

$\tau_{\text{п}}$ - час паузи, с;

$\tau_{\text{вх2}}$ - час входу штаби в кліть при другому проході, с.

$$\tau_{\text{охл2}} = \frac{l_1/2}{v_1} + \tau_{\text{п}} + \frac{l_2/2}{v_2}$$

Час паузи приймаємо $\tau_{\text{п}} = 3$ с.

Тоді

$$\tau_{\text{охл2}} = \frac{6,472/2}{2,3} + 3 + \frac{8,954/2}{2,4} = 6,3 \text{ с.}$$

Температура металу перед другим проходом

$$T_{\text{вх2}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot 6,3}{135}\right) + \left(\frac{1000}{1271 + 273}\right)^3}} - 273 = 1267^\circ\text{C.}$$

Далі аналогічно визначаємо втрату температури при контакті з валками, деформаційний розігрів і, відповідно, температуру металу при виході з кліті після другого проходу. Для решти всіх проходів розрахунок проводиться аналогічним чином.

Всі результати розрахунку зведені в таблицю 8.6.

Варіанти вихідних даних для виконання завдання № 2 наведені в таблицях 8.5, 8.7 і 8.8.

Таблиця 8.6 – Результати розрахунку температури металу по проходам при реверсивному прокатуванні

Номер проходу	Температура металу перед входом в кліть, $T_{\text{вх}}$, °C	Падіння температури при контакті с валками, $\Delta T_{\text{кв}}$, °C	Деформаційний розігрів, $\Delta T_{\text{деф}}$, °C	Температура металу на виході з кліті, $T_{\text{вих}}$, °C
1	1272	5	4	1271
2	1267	7	5	1265
3	1258	8	5	1255
4	1243	10	6	1240
5	1222	12	7	1217
6	1187	15	8	1180
7	1138	15	5	1128

Таким чином, температура кінця прокатки складає 1128 °C.

Побудувати графіки залежності температур $T_{\text{вх}}$ і $T_{\text{вих}}$ від номера проходу (рис. 8.8).

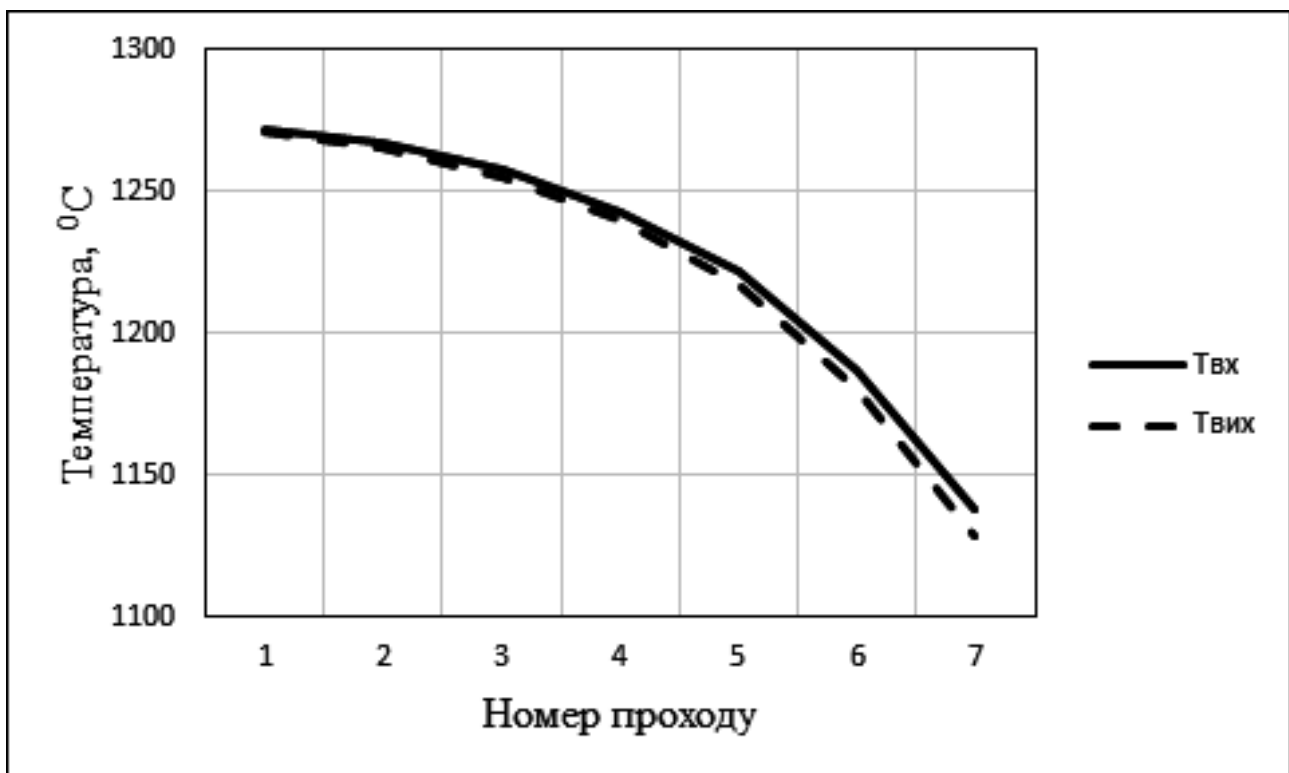


Рисунок 8.8 – Залежність температури металу перед входом в кліть ($T_{\text{вх}}$) і на виході з кліті ($T_{\text{вих}}$) від номера проходу

8.3.4 Варіанти індивідуальних завдань

Таблиця 8.7 – Розрахункові коефіцієнти до формули (8.71)

Номер варіанту	Марка сталі	k	σ_0 , МПа	a	b	c
1	10	0,934	87,6	0,125	0,266	-2,46
2	40X	0,979	87,5	0,130	0,170	-3,62
3	15Г	0,842	103,0	0,126	0,188	-2,74
4	45	1,000	87,4	0,143	0,173	-3,05
5	20X13	0,900	136,0	0,132	0,210	-3,26
6	60C2	0,921	105,0	0,153	0,197	-3,46
7	40XH	0,935	88,5	0,134	0,234	-3,47
8	35ГС	0,975	89,6	0,136	0,187	-2,79
9	5сп	0,917	89,5	0,144	0,208	-3,35
10	У10А	0,995	80,5	0,163	0,194	-3,57
11	ШХ15	1,010	79,6	0,137	0,220	-4,07
12	Х17Н2	0,866	126,0	0,130	0,063	-4,72
13	15Х13	0,950	145,0	0,102	0,125	-3,50
14	15Х25Т	1,028	58,5	0,124	0,052	-3,70
15	30ХГСА	0,996	92,4	0,134	0,250	-3,34
16	3сп	0,960	90,7	0,124	0,167	-2,54
17	15ХСНД	0,880	93,2	0,122	0,226	-2,90
18	20ХГ2С	1,011	95,8	0,125	0,213	-3,65
19	У7А	0,948	78,3	0,159	0,197	-2,87
20	38ХМЮА	1,016	100,0	0,114	0,273	-3,72

Таблиця 8.8 – Варіанти завдань для розрахунку змінення температури металу при реверсивному прокатуванні

№ варіанту	Марка сталі	D _в , мм	Матеріал валків	T _о , °C	Відстань від печі до кліті, L, м	Швидкість транспортування, $\vartheta_{тр}$, м/с	ϑ_1 , м/с	ϑ_2 , м/с	ϑ_3 , м/с	ϑ_4 , м/с	ϑ_5 , м/с	ϑ_6 , м/с	ϑ_7 , м/с
1	10	950	сталь	1255	35	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,3
2	40X	850	чавун	1270	28	1,7	2,1	2,4	2,5	2,7	2,9	3,2	3,3
3	15Г	1000	сталь	1260	33	1,7	2,0	2,2	2,5	2,8	2,9	3,1	3,2
4	45	800	чавун	1250	40	1,7	1,9	2,2	2,5	2,8	3,0	3,1	3,4
5	20X13	900	сталь	1240	25	1,7	2,0	2,4	2,4	2,7	2,8	3,0	3,2
6	60C2	930	сталь	1245	31	1,7	1,8	1,9	2,1	2,3	2,5	2,8	2,9
7	40XH	1050	сталь	1250	27	1,7	1,9	2,1	2,5	2,6	2,8	3,1	3,3
8	35ГС	800	чавун	1230	37	1,7	2,1	2,1	2,4	2,5	2,8	2,9	3,0
9	5сп	950	сталь	1270	30	1,7	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	3,4	3,6
10	У10А	900	сталь	1190	25	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,4	2,7	2,9
11	ШХ15	1000	сталь	1170	29	1,7	1,9	2,2	2,3	2,5	2,8	3,1	3,4
12	X17H2	1200	сталь	1180	26	1,7	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4
13	15X13	800	чавун	1240	40	1,7	2,0	2,2	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5
14	15X25T	930	сталь	1200	36	1,7	1,9	2,1	2,5	2,9	3,0	3,2	3,5
15	30XГСА	850	чавун	1250	34	1,7	2,1	2,4	2,7	2,8	3,0	3,3	3,6
16	3сп	800	чавун	1280	45	1,7	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,3	3,5
17	15XCHД	800	чавун	1230	32	1,7	1,9	2,0	2,1	2,4	2,6	2,8	2,9
18	20XГ2С	950	сталь	1260	43	1,7	2,1	2,2	2,5	2,8	2,9	3,0	3,2
19	У7А	850	чавун	1200	40	1,7	1,9	2,1	2,5	2,7	2,8	3,0	3,3
20	38ХМЮА	1000	сталь	1250	31	1,7	2,2	2,4	2,5	2,7	2,9	3,2	3,3

Контрольні питання

1. Характеристика газового палива.
2. Вимоги до печей та їх класифікація.
3. Геометричні та електричні параметри індуктора..
4. Процес горіння палива..
5. Нагрівальні колодязі прокатного виробництва.
6. Розрахунок частоти струму та тривалості нагрівання в індукційному нагрівачі.

Література до розділу 8: [1, 2, 6, 9]

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ніколаєв В. О. Теорія і технологія точної прокатки штаб : навчальний посібник для студентів ЗДІА металургійних спеціальностей денної та заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 100 с.
2. Ніколаєв В. О. Калібрування прокатних валків : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 158 с.
3. Чубенко В. А., Хіноцька А. А. Технологія прокатного виробництва : навчальний посібник. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2017. 169 с.
4. Василев Я.Д., Мінаєв О.А. Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.
5. Кухарь В. В., Присяжный А. Г., Балалаева Е. Ю. и др. Управление тепловым состоянием тонколистового проката для повышения равномерности распределения механических свойств : монография. Мариуполь : ПГТУ, 2018 216 с.
6. Телегин А. С., Авдеева В. Г. Теплотехника и нагревательные устройства : учебн. пособ. Москва : Машиностроение, 1985. 248 с.
7. Машины и технология обработки металлов давлением. Лабораторные работы. Под ред. Л.И. Живова. Киев : Вища школа, 1987. 199 с.
8. Свинолобов Н. П., Бровкин В. Л. Печи черной металлургии : учебн. пособ. для вузов. Днепропетровск : Пороги, 2004. 154 с.
9. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. Москва : Машиностроение, 2001. 912 с.
10. Yavtushenko A. V., Protsenko V. M., Belokon Yu. A., Bondarenko Y. V. Productivity Optimization of Cold Rolling Mills. Steel in Translation, 2020, Vol. 50, No. 5, pp. 335–339.
11. Yavtushenko A. V., Protsenko V. M., Bondarenko Y. V., Kirichenko A. G., Ping F. Y. Numerical experiment for the calculation of normal contact stress in the deformation center when rolling a metal strip. Journal of Engineering Sciences, Volume 6, Issue 2 (2019), pp. E 31–E 35.
12. Бібліотека Придніпровського наукового семінару «Обробка металів тиском» при Національній металургійній академії України. URL: <http://metal-forming.org/index.php/elibrary-omd> (дата звернення: 05.10.2021).
13. Явтушенко О. В., Проценко В. М., Корнілов О. О. Розрахунок валків прокатних станів на міцність і деформацію у програмному комплексі «AutoCAD Mechanical». Металургія : Збірник наукових праць. Запоріжжя , 2018. Вип. 2 (40). С. 85 – 90. URL: <http://www.zgia.zp.ua/index.php?page=4353&lang=u> (дата звернення: 05.12.2020).

Навчально - методичне видання
(українською мовою)

Проценко Віктор Максимович
Бондаренко Юлія Володимирівна
Явтушенко Анна Володимирівна

ТЕХНОЛОГІЯ НАГРІВУ ТА НАГРІВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ В ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

Навчально-методичний посібник
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності 136 "Металургія"
освітньо-професійної програми "Металургія"

Рецензент *І. К. Огинський*
Відповідальний за випуск *Ю. О. Белоконь*
Коректор *В. М. Проценко*