

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНИ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота
другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему «Підвищення ефективності термічної обробки металу у промислових
установках»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1442
спеціальності 144 Теплоенергетика
(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Теплоенергетика
(назва освітньої програми)

Рибалко І.Д.
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц. Осаул О.І.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент ст. викл. Таратута В.О.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут _____
Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень _____
Спеціальність 144 – Теплоенергетика _____
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц. В.Л. Коваленко

« _____ » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Рибалко Ілля Денисович

(прізвище, ім'я, по батькові)

- 1 Тема роботи «Підвищення ефективності термічної обробки металу у промислових установках»
керівник роботи Осаул О.І., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639 - с
- 2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2023 р.
- 3 Вихідні дані до роботи : допустиме навантаження на стенд 75т, маса стенду 5 т, максимальна температура стенду 750 °С, число обертів стендового вентилятора 2200 об./хв.; максимальна температура під муфелем 750 °С; потужність вентилятора ковпака - 5,5 кВт, продуктивність - 4,4 м³/с, витрата охолоджуючої води 24 м³/год; максимальна витрата газу на один ковпак – (62...68) м³/год; максимальна витрата газу на один пальник – 8,4 м³/год; теплотворна здатність природного газу - 33,7 МДж/м³.
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз технічних характеристик ковпакових печей з водневим та азотним захисним середовищем. 2) Дослідження теплової роботи ковпакових печей 3) Аналіз статистичних даних по впровадженню технології відпалу в ковпакових печах з середовищем сухого водню.

5 Перелік графічного матеріалу 1) Переріз блоку термічних печей. 2) Газова одностопна ковпакова піч. 3) Основні режими термічної обробки листового металу в ковпакових печах. 4) Схема руху газів та компонентів горіння в висококонвективній ковпаковій печі HICON/H2. 5) Еквівалентні коефіцієнти теплопровідності в залежності від температури при використанні водневого та азотного захисного середовищ. 6) Графіки температурних режимів процесу відпалу в печах з водневим та азотним захисним середовищем. 7) Розрахункові температурні криві для рулону металу, відпаленого в печі з азотним та водневим середовищем. 8) Залежність температури бокової, торцевої і внутрішньої поверхні рулону від часу нагріву. 9) Аналіз витрат природного газу в ковпакових печах з водневим та азотним захистом.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Осаул О.І. к.т.н., доцент	<i>Осаул</i>	<i>Осаул</i>
Розділ 2	Осаул О.І. к.т.н., доцент	<i>Осаул</i>	<i>Осаул</i>
Розділ 3	Осаул О.І. к.т.н., доцент	<i>Осаул</i>	<i>Осаул</i>

7 Дата видачі завдання 01.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис об'єкту дослідження	29.09.2023	
2	Дослідження теплової роботи ковпакових печей	16.10.2023	
3	Аналіз статистичних даних по впровадженню технології відпалу в ковпакових печах з середовищем сухого водню	25.11.2023	

Студент *Рибалко* (підпис) Рибалко І.Д. (ініціали та прізвище)

Керівник роботи *Осаул* (підпис) Осаул О.І. (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер *Башлій* (підпис) С.В. Башлій (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

І.Д. Рибалко. Підвищення ефективності термічної обробки металу у промислових установках.

Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник Осаул О.І. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2023.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена підвищенню ефективності термічної обробки металу у ковпакових печах.

У роботі було розглянуто область застосування, тенденції та перспективи розвитку ковпакових термічних печей, проведений порівняльний аналіз двох технологій, проведені дослідження та аналіз режимів термічної обробки рулонів, проведені розрахунки еквівалентного коефіцієнта теплопровідності, теплообміну в печах та розподілу температур в рулоні, проаналізовані статистичні дані механічних властивостей, якості поверхні відпалюваного металу, продуктивності печей, витрат природного та технологічних газів.

Ключові слова: ковпакова піч, захисний газ, садка металу, електроенергія, теплопровідність, теплообмін, термічна обробка.

ABSTRACTS

Rybalko I.D. Increasing the efficiency of metal heat treatment in industrial installations.

Qualifying final work for the degree of master's degree in specialty 144 - Heat and Power Engineering, supervisor Osaul O.I. Zaporizhzhia National University. Engineering Educational and Research Institute named after Y.M.

Potebnya. Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems, 2023.

The master's thesis is devoted to improving the efficiency of metal heat treatment in cap furnaces.

The work considers the scope, trends and prospects for the development of cap furnaces, conducts a comparative analysis of the two technologies, studies and analyzes the modes of heat treatment of coils, calculates the equivalent thermal conductivity coefficient, heat transfer in furnaces and temperature distribution in the coil, analyzes statistical data on mechanical properties, surface quality of annealed metal, furnace performance, consumption of natural and process gases.

Keywords: cap furnace, shielding gas, metal cage, electricity, thermal conductivity, heat exchange, heat treatment

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ОПИС ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1 Область застосування і загальна характеристика ковпакових печей	9
1.2 Аналіз технології термічної обробки в ковпакових печах	12
1.3 Термічна обробка металу в одностопних газових ковпакових печах ЦХП-1	15
1.4. Виробництво водню і очищення азоту з подальшим їх застосуванням для термічної обробки рулонів сталі в ковпакових печах	29
1.5 Аналіз технічних характеристик ковпакових печей з водневим та азотним захисним середовищем	31
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ КОВПАКОВИХ ПЕЧЕЙ	35
2.1 Дослідження та аналіз режимів термічної обробки рулонів в печах з водневим середовищем та середовищем HN_x газу	35
2.2 Розрахунок еквівалентного коефіцієнта теплопровідності в радіальному напрямку	42
2.3 Розрахунок теплообміну в ковпаковій печі	47
3 АНАЛІЗ СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ ПО ВПРОВАДЖЕННЮ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДПАЛУ В КОВПАКОВИХ ПЕЧАХ З СЕРЕДОВИЩЕМ СУХОГО ВОДНЮ	65
ВИСНОВКИ	83
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	85

ВСТУП

Актуальність роботи. В умовах ринкової економіки підвищення ефективності виробництва і стабільність показників якості прокату стали головними, оскільки від них вирішальним чином залежить ціна металу, можливість його реалізації і рентабельність виробництва.

Завдання корінного поліпшення якості і збільшення випуску холоднокатаного листа з вуглецевих сталей є найважливішим в вітчизняній чорній металургії, воно спрямоване на забезпечення зростаючої потреби національної економіки в цих видах тонколистового прокату.

Таким чином, подальше вдосконалення печей, поліпшення їх експлуатаційних показників є суттєвим резервом підвищення продуктивності і економічності всього комплексу металургійного виробництва.

Мета роботи - підвищення ефективності термічної обробки металу у ковпакових печах.

Задачі дослідження. Для досягнення зазначеної мети дослідження в магістерській роботі необхідно:

- розглянути область застосування, тенденції та перспективи розвитку ковпакових термічних печей;
- провести порівняльний аналіз двох технологій;
- провести дослідження та аналіз режимів термічної обробки рулонів;
- виконати розрахунки еквівалентного коефіцієнта теплопровідності, теплообміну в печах та розподілу температур в рулоні;
- проаналізувати статистичні дані механічних властивостей, якості поверхні відпалюваного металу, продуктивності печей, витрат природного та технологічних газів.

Об'єкт дослідження – газові ковпакові печі для термічної обробки металу.

Предмет дослідження – ефективність технології термічної обробки металу у ковпакових печах.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилання. Загальний обсяг складає 87 сторінок, у тому числі 20 ілюстрацій та 23 таблиці.

1 ОПИС ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Область застосування і загальна характеристика ковпакових печей

Основна область застосування ковпакових печей - світла термічна обробка рулонів сталевий смуги. Ковпакові печі класифікують за кількістю стоп (з листів, рулонів, бунтів) металу, які розташовують на одному стенді і накривають одним ковпаком: одно-, двох-, тристопні, багатостопні. Основним типом печей є одностопна піч для відпалу рулонів смуги металу [1]. Ковпакові печі є певною мірою універсальним тепловим агрегатом, що дозволяє проводити відпал як листового, так і сортового прокату, при цьому відносно простий агрегат, як у конструктивному відношенні, так і в експлуатації і обслуговуванні в порівнянні з протяжними агрегатами, що мають складне механічне та електричне обладнання. Вони мають різну конструкцію і відрізняються способом опалення (газові, електричні); по сортаменту термообробного металу (відпал смуги в рулонах, відпал сортового прокату в мотках або бунтах); за способом теплообміну між засобами опалення та садкою (муфельні і безмуфельні); по конфігурації печей і схемою розміщення садки (циліндричної або прямокутної форми, одно- або багатостопні). Є безліч дрібних відмінностей, які визначають конкретне призначення печі. Об'єднує ковпакові печі будь-якої конструкції термообробка металу, яка здійснюється в контрольованих атмосферах різного складу.

Ковпакові печі - це камерні печі, які працюють садочним способом. Тепловий і температурний режими ковпакової печі змінюються протягом циклу відпалу [2]. На відміну від камерних печей інших типів, що застосовуються в металургії, садку в ковпакових печах нагрівають і охолоджують, як правило, під муфелем в атмосфері захисного газу. Наявність муфеля визначає своєрідність механізму тепловіддачі в ковпакових

печах. При нагріванні садки в ковпакових печах з безпосереднім обігрівом тепло до зовнішньої поверхні муфеля передається випромінюванням і конвекцією від продуктів згоряння і випромінюванням від розпеченої кладки нагрівального ковпака. Від зовнішньої поверхні муфеля до внутрішньої тепло передається теплопровідністю [2]. Тепловий опір муфеля незначний, так як муфель зазвичай виготовляють з листа жароміцної сталі товщиною (4...6) мм, а тому на роботу ковпакової печі ця ступінь тепловіддачі істотного впливу не робить. Передача тепла від муфеля до металу, що нагрівається відбувається випромінюванням, а в разі застосування циркуляції газу під муфелем - і конвекцією. При охолодженні тепло від металу до муфеля передається випромінюванням або випромінюванням і конвекцією (якщо застосована циркуляція газу). Тепло від зовнішньої поверхні муфеля в цех відводиться випромінюванням і природною конвекцією. У випадках застосування ковпака прискореного охолодження з обдуванням муфеля повітрям основну роль у відводі тепла відіграє примусова конвекція, а при поливанні муфеля - відвід тепла з охолоджувальною водою [3].

Особливістю теплового режиму ковпакових печей є так само і те, що нагрівальний ковпак відразу ж після закінчення нагрівання на одному стенді переносять на інший, де негайно починають новий цикл нагріву. В результаті нагрівальний ковпак не встигає охолонути в перерві між двома періодами нагріву. З цієї причини втрати тепла на розігрів кладки ковпакових печей на початку нагріву менше, ніж у садочних камерних печах інших типів. У ковпакових печах верх садки нагрівається і охолоджується швидше, ніж низ. Це пояснюється тим, що на початку нагріву стенд печі холодний, а кладка нагрівального ковпака гаряча, що, природно, затримує прогрів низу садки. На початку охолодження нагрівальний ковпак знятий, а стенд остигає разом з садкою, що затримує охолодження низу садки. Проте основне полягає в тому, що верх садки отримує і віддає тепло в результаті теплообміну випромінюванням з верхньою кришкою муфеля. Тому при нагріванні рулонів верхній рулон отримує і віддає тепло випромінюванням через всю поверхню

верхнього торця і випромінюванням через бічну поверхню, а інші рулони - конвекцією через поверхню торців і випромінюванням через бічну поверхню.

Нерівномірність нагрівання садки по висоті не вдається виключити повністю ні розташовуючи джерела тепла в нижній частині стопи, ні за допомогою циркуляції газу під муфелем. При нагріванні стопи рулонів найбільш повільно нагріваються середні витки. Ця нерівномірність може бути скорочена до необхідних меж тільки в результаті витримки достатньої тривалості. Картина нерівномірності нагрівання в ковпакових печах істотно ускладнена третім видом нерівномірності - місцевими перегріваними. Наприклад, в ковпакових печах для термічної обробки рулонів з безпосереднім газовим опаленням нижній рулон стопи нагрівається повільно, але його зовнішні витки, які отримують тепло випромінюванням від горілочного поясу, нагріваються швидше, ніж зовнішні витки верхнього рулону. У результаті в товщині рулонів стопи температура зростає зверху вниз, а на зовнішній поверхні стопи рулонів - знизу вгору.

На стенді одностопної печі встановлюють стопу з декількох поставлених один на одного рулонів. Між рулонами закладаються конвекторні кільця, а зверху кожен стопу закривають кришкою. Стопу закривають муфелем, а муфель - загальним нагрівальним ковпаком з пальниками. У стенді встановлений циркуляційний вентилятор, який засмоктує газ контрольованого складу з центральної порожнини стопи і подає його через кільцеву щілину направляючого апарату догори вздовж стінки муфеля. При омиванні стінки муфеля газом між муфелем і газом відбувається теплообмін. Потім газ надходить в конвекторні кільця і, проходячи через них у внутрішню порожнину стопи, омиває торці рулону, де відбувається теплообмін між газом і рулонами.

Дослідження таких печей показали, що в найгірших умовах нагрівання та охолодження знаходиться нижній рулон, тому всі розрахунки теплообміну проводять стосовно до нижнього рулону [1, 2].

Термічна обробка рулонів сталевих смуги і листів в ковпакових печах полягає у нагріванні і охолодженні металу під муфелем в атмосфері контрольованого складу. Охолодження закінчують, коли температура металу досягає величини, при якій він може перебувати на повітрі, не окислюючись. Для прискорення охолодження застосовують різні засоби: поливання муфеля водою, обдувку муфеля повітрям під ковпаком прискореного охолодження, охолодження захисного газу в водяних холодильниках. Оскільки тривалість нагріву металу менше тривалості охолодження, один ковпак зазвичай обслуговує два-три стенди: на одному стенді проводять нагрів під ковпаком, а на інших - охолодження, укладання та розбирання стоп. Ковпак з одного стенду на інший переносять мостовим краном. В основному ковпакові печі застосовуються в тих випадках, коли тривалість циклу термічної обробки дуже велика, і служить для масової термообробки, тому в пічному відділенні розташовують велике число печей (стендів), іноді кілька сотень штук [2].

1.2 Аналіз технології термічної обробки в ковпакових печах

Термічною обробкою називають процеси, пов'язані з нагріванням і охолодженням, що викликають зміни внутрішньої будови сплаву, і у зв'язку з цим зміни фізичних, механічних та інших властивостей [3].

Термічна обробка листової сталі переслідує в основному три мети:

- 1) усунення наклепу і відновлення пластичності, необхідної для подальшої прокатки;
- 2) одержання технологічних властивостей листа, необхідних при виготовленні з нього штампуванням різноманітних деталей;
- 3) одержання високих експлуатаційних властивостей (міцність, в'язкість, стійкість проти корозії та ін.).

У залежності від мети і виду термічної обробки застосовують різні технологічні процеси й устаткування.

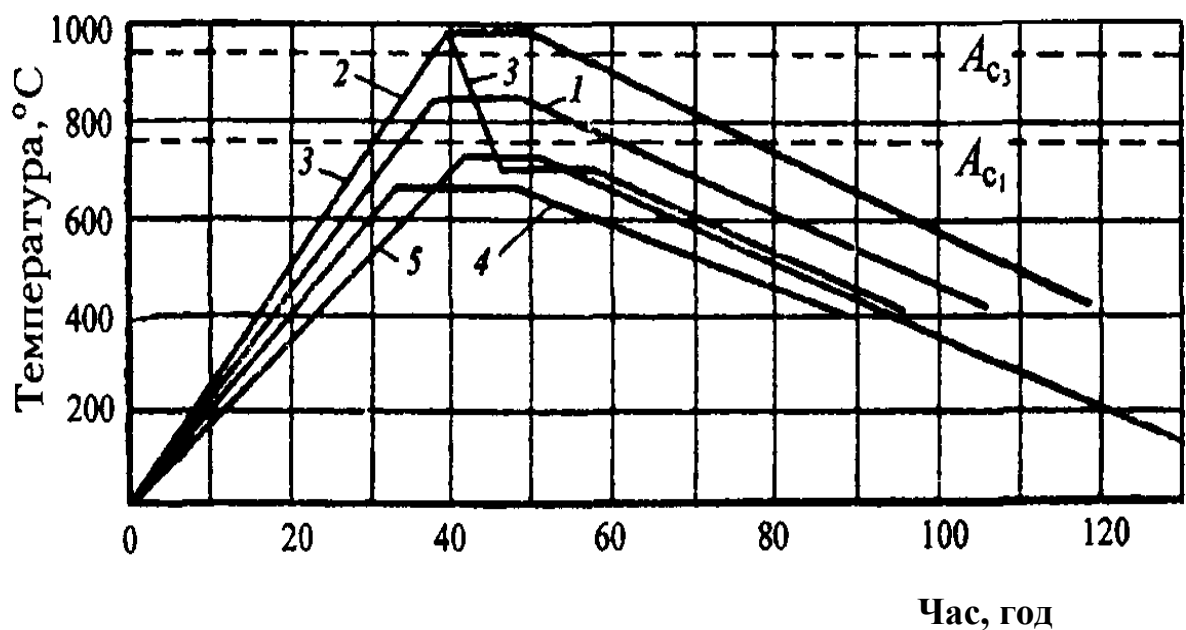
Відпал - процес термічної обробки, що обумовлює отримання рівноважних (стійких) структур розпаду аустеніту під час охолодження з певних температур нагрівання в інтервалі перетворень і вище. Відпал здійснюється шляхом нагріву сталевих рулонів до певної температури, тривалої витримки при цій температурі і подальшого повільного охолодження. У процесі відпалу відбувається зміна дисперсності фаз і зміна форми і розміру зерен аустеніту; в результаті виходить рівноважна структура ферито-цементитної суміші, знижується твердість і підвищується пластичність і в'язкість. Відпал застосовується з метою зняття внутрішніх напружень, поліпшення оброблюваності різанням, усунення структурної неоднорідності.

Пом'якшувальний відпал проводиться для зняття напруг і зниження твердості гарячекатаних рулонів сталі. Сталь після прокатки може мати різну структуру і різні механічні властивості залежно від ступеня деформації, від температури кінця прокатки, від швидкості охолодження і т.п. Тому при виборі режиму відпалу сталі після прокатки, крім хімічного складу, враховується також структура і твердість сталі.

Рекристалізаційний відпал - процес термообробки, що обумовлює виправлення викривлень кристалічної решітки, отриманих при холодному деформуванні металу, повернення сталі пластичності і можливості подальшої деформації виробу. Рекристалізаційний відпал здійснюється шляхом нагрівання сталі до температури вище температури рекристалізації (початку зростання нових зерен, що утворюються натомість деформованих), але нижче температури фазового перетворення, з витримкою при цій температурі і подальшим повільним охолодженням. При нагріві холоднодеформованої сталі до температури (400...450) °С змін в будові сталі не відбувається, механічні властивості змінюються трохи і лише знімається велика частина внутрішньої напруги. При подальшому нагріві механічні властивості сталі

різко змінюються: твердість і міцність знижуються, а пластичність підвищується. Отже, при рекристалізації відбувається зняття наклепу і внутрішніх напружень, заміна твердої деформованої структури на дрібнозернисту, м'яку та вязку [3].

На рис. 1.1 наведені основні режими термічної обробки листового металу в ковпакових печах зі стопою рулонів або листів масою до 100 т. Більшість печей призначено для низькотемпературного рекристалізаційного відпалу рулонів холоднокатаної смуги з маловуглецевої сталі.



1 - неповний відпал гарячекатаного листа; 2 - повний відпал гарячекатаного листа; 3 - ізотермічний відпал гарячекатаного листа; 4 - високий відпуск гарячекатаного листа; 5 - низькотемпературний рекристалізаційний відпал листів і рулонів з холоднокатаної маловуглецевої сталі

Рисунок 1.1 - Основні режими термічної обробки листового металу в ковпакових печах

Тривалість нагріву залежить від допустимого кінцевого перепаду температур в садці, яку визначають залежно від якості та однорідності

відпаленого металу. Тривалість охолодження під муфелем залежить від кінцевої температури охолодження, яку приймають :

- при термічній обробці в захисній атмосфері – (120...250) °С;
- при термічній обробці без захисної атмосфери – (300...400) °С.

При світлому відпалі маловуглецевої сталі в цеху холодного прокату (ЦХП-1) ПАТ «Запоріжсталь» застосовують традиційну азотну технологію (склад атмосфери в печі (4...5) % водню, решта азот)) та сучасну водневу технологію (атмосфера в печі - сухий водень).

1.3 Термічна обробка металу в одностопних газових ковпакових печах ЦХП-1

Термічне відділення ЦХП-1 призначене для світлого рекристалізаційного відпалу холоднокатаних рулонів і пом'якшувального відпалу гарячекатаних рулонів. У відділенні встановлені одностопні газові ковпакові печі. Печі згруповані в блоки. У відділенні 15 блоків печей з відпалом в атмосфері HN_x -газу (азотні) і один блок з відпалом в атмосфері сухого водню (блок №14). Склад блоків печей зведений в табл. 1.1

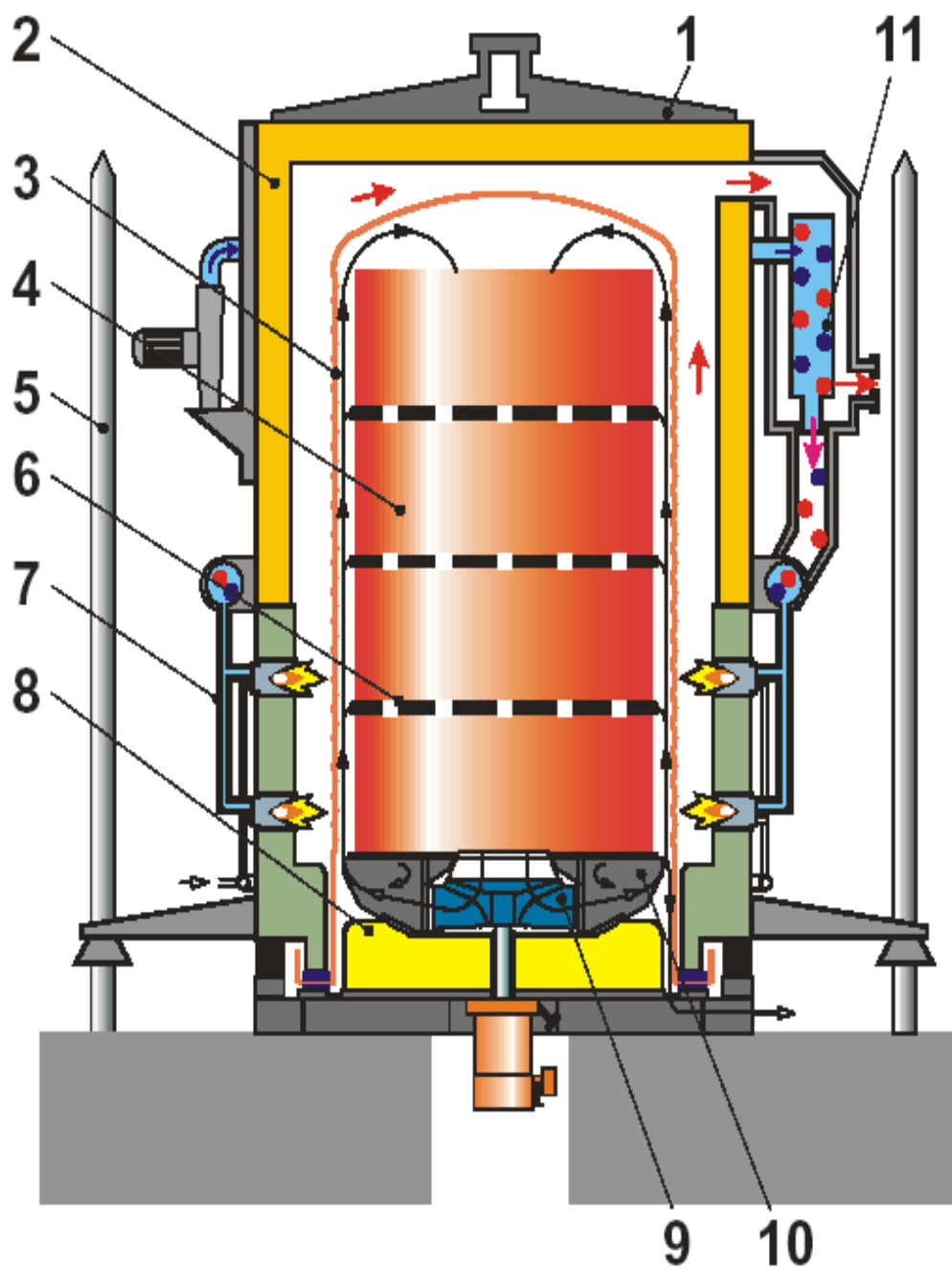
Таблиця 1.1 – Склад блоків ковпакових печей ЦХП-1

№№ блоків печей	Кількість стендів блоку, шт	Кількість ковпаків блоку, шт	Кількість муфелей блоку, шт
2 -5; 7 – 11; 17 -19	15	6	15
6	12	4	12
15;16	21	7	21
14	18	10	18

Для відпалу металу в середовищі сухого водню в термічному відділенні ЦХП-1 встановлений блок № 14 газових ковпакових печей HICON/H₂ типу NOg 170/535 St-H₂-B фірми "Ебнер".

Складовими частинами печі є нагрівальний ковпак, стенд, муфель, конвекторні кільця, охолоджуючий ковпак, вентиляна стійка. Крім того, блок оснащений установкою для регулювання тиску захисних середовищ - азоту і водню, а також азоту як робочого середовища для приводу запірних пристроїв. На блок (18 стендів) один електричний розподільчий щит, один гідроагрегат для притискних пристроїв фланця муфеля, система оборотного водоохолодження з теплообмінником. При подачі води на блок встановлений фільтр зворотного очищення води. Є система аварійного водопостачання блоку водою з напірного бака. Також до складу блоку входять два димососа з димовою трубою для відводу димових газів. У комплект устаткування блоку печей «Ебнер» входять розміщені на мостових кранах двоє механічних кліщів з направляючими кронштейнами для завантаження і розвантаження рулонів і два трьохплечих кліщових захоплення для перенесення муфельів і конвекторних кілець [4].

Нагрівальний ковпак представляє собою металевий кожух циліндричної форми, футерований всередині волокнистим матеріалом. У нижній частині і області пальників футеровка виготовлена з волокнистих модулів, у верхній - з волокнистих матів. Ковпак оснащений повітрорудкою і центральним рекуператором для підігріву повітря горіння до 350 °С. Схема конструкції стенду з нагріваючим ковпаком печі фірми Ебнер представлена на рис. 1.2.



1 - корпус печі; 2 - футеровка печі; 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 1.2 - Схема конструкції стенду з нагрівальним ковпаком печі фірми Ебнер

Підведення природного газу до нагрівального ковпака здійснюється за допомогою автоматичної муфти. Пристрій нагріву складається з 8 двоступневих високошвидкісних пальників з автоматичним запалюванням, розташованих у двох рівнях по висоті обсягу нагрівального ковпака, електродів для запалювання полум'я, електродів для контролю полум'я та пропорційного регулятора тиску. Для роботи пальників використовується незначний надлишок повітря, що забезпечує повне згоряння палива.

Двоступневий високошвидкісний пальник зображено на рис.1.3.

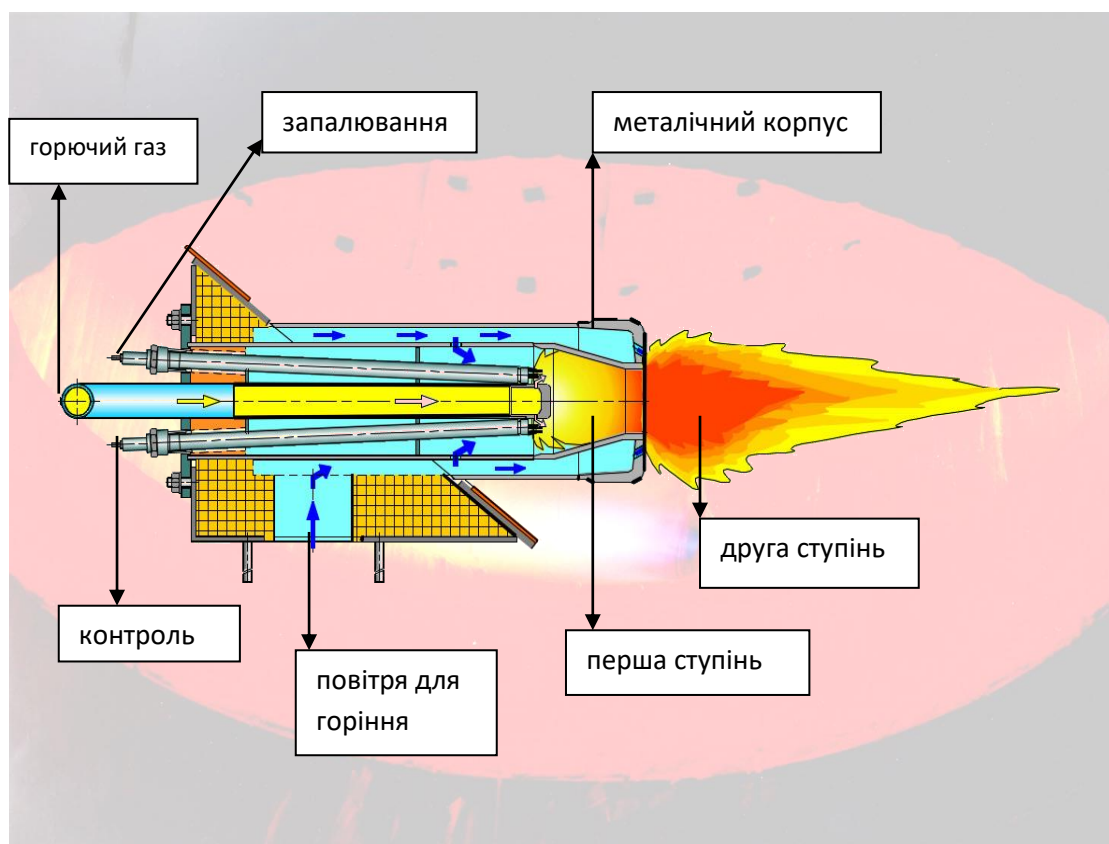


Рисунок 1.3 - Двоступеневий високошвидкісний пальник

Нагрівальний ковпак по закінченні часу нагрівання дозволяє реалізувати режим сповільненого охолодження, при цьому вентилятором повітря для горіння підсмоктується навколишнє повітря, яке потім через регульовану заслінку, в кільцеподібний трубопровід і пальники подається під напором, що створюється повітродувкою [4].

Низ нагрівального ковпака складається з кільцеподібної опори, в нижній частині якої встановлено плетене ущільнення, яке притискається до фланця муфеля при установці нагрівального ковпака на стенд, не дозволяючи знизу проникати повітря в нагрівальний простір. Крім того, плетене ущільнення перешкоджає втратам тепла з нагрівального простору ковпака, а також захищає гумове ущільнення фланця стенду від руйнування.

Нагрівальний ковпак оснащений пальником допалювання відпрацьованого водню. Запалювання здійснюється за допомогою зонального пальника з приладом контролю горіння (рис. 1.4). Димові гази відводяться через рекуператор і ізолюваний трубопровід в існуючу систему відводів і димову трубу за допомогою димососів. Схема руху захисних газів та компонентів горіння в висококонвективній ковпаковій печі NICON/H₂ зображена на рис.1.5.

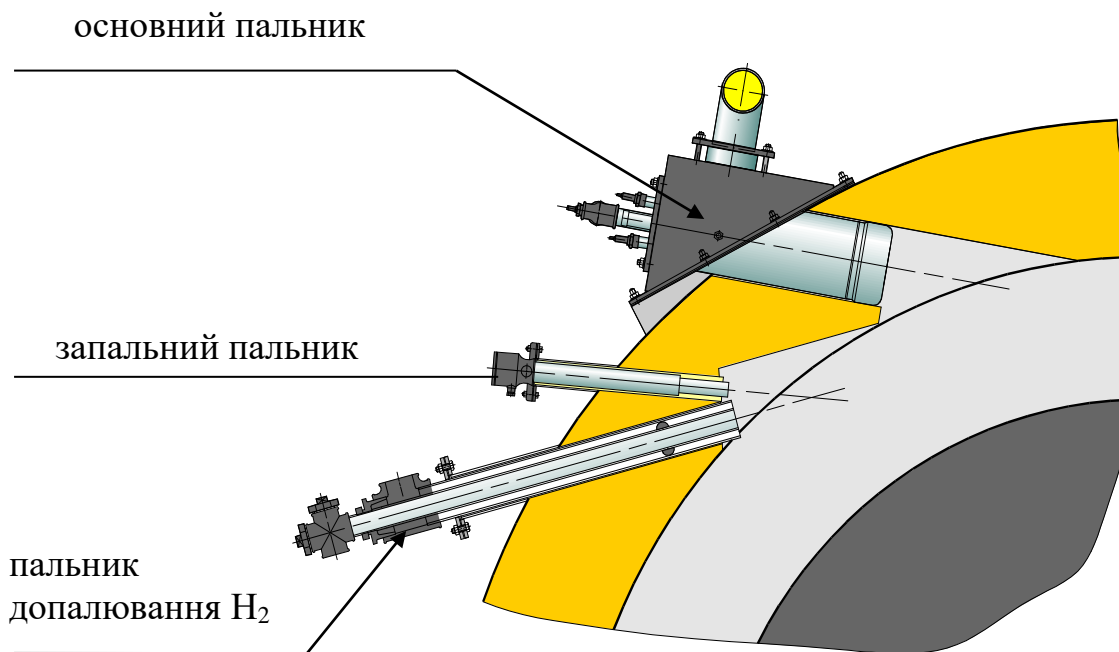


Рисунок 1.4 – Розташування основного та допоміжних пальників печей NICON/H₂ фірми «Ебнер»

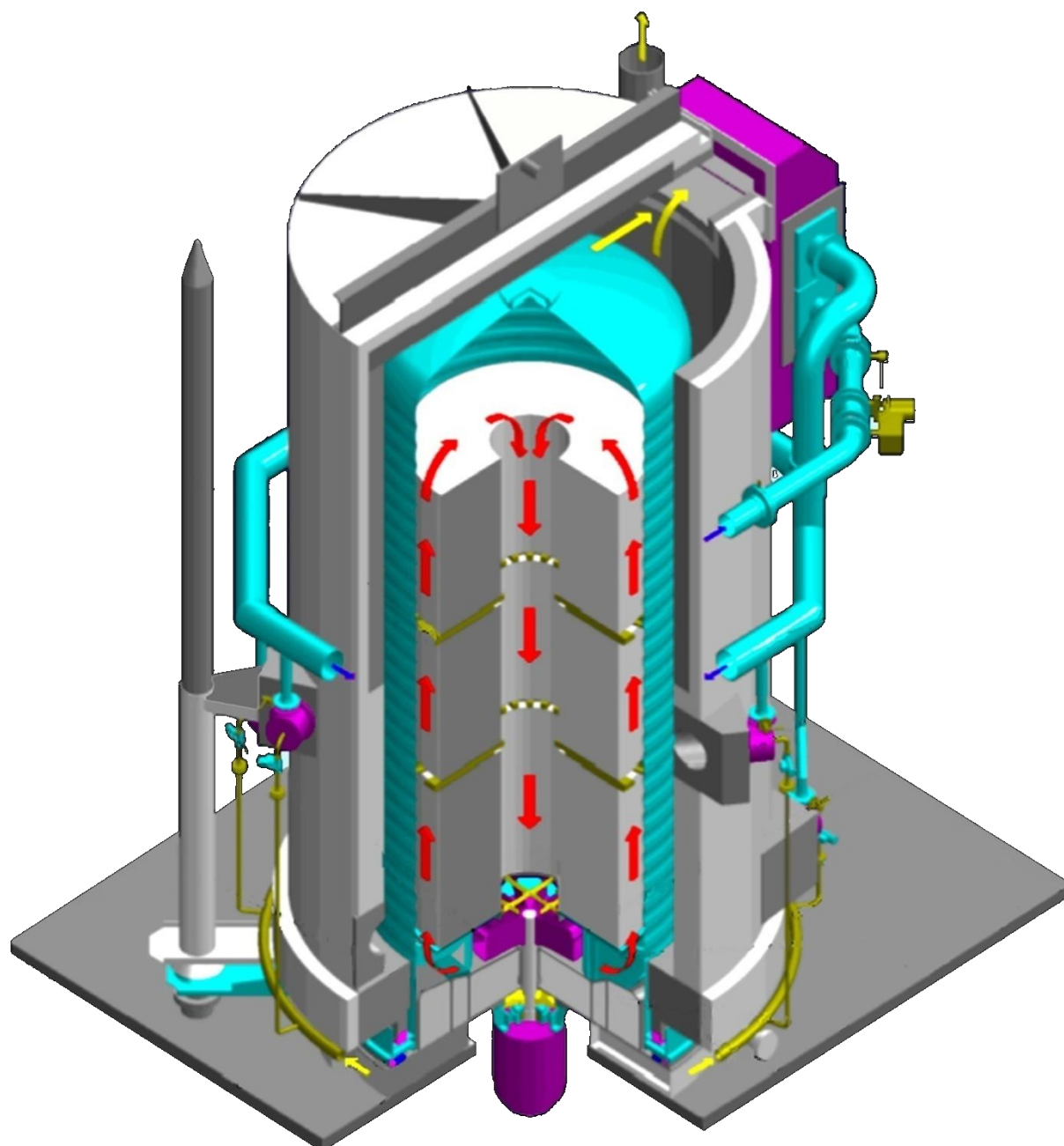


Рисунок 1.5 - Схема руху захисних газів та компонентів горіння в висококонвективній ковпаковій печі NICON/H₂,

Стенд відпалу представляє собою основу із сортові зміцненої сталі, до якої герметично приварений жаростійкий циліндр з листового металу. На встановленому зверху стенда направляючому апараті з жароміцної сталі встановлюється садка ролонів металу. Допустиме навантаження на стенд 75т. Маса стенду 5 т. Максимальна температура стенду 750°C. Число обертів

стендового вентилятора 2200 об./хв. (число обертів регулюється перетворювачем частоти). Потужність двигуна вентилятора 22 кВт [4].

Стенд оснащений гумовим водоохолоджуваним ущільненням, яке при притиску муфеля злегка деформується, забезпечуючи газонепроникність підмуфельного простору. Для притиску муфеля по периметру стенду встановлено 8 гідроциліндрів. Для продувки повітря або водню і для циркуляції захисного газу на стенді використовується вентилятор зі збалансованою крильчаткою, який працює за допомогою частотного перетворювача.

У комбінації зі стендом муфель утворює відокремлену від пічного простору газогерметичну камеру, захищаючи метал від окислюючої дії пічних газів.

Складові компоненти муфеля:

- верхня частина з несучим кільцем для перенесення муфеля трьохплечим кліщовим захватом;
- середня частина - газонепроникний циліндр, зварений з рифленої жаростійкої хромонікелевої сталі;
- нижня циліндрична частина, без рифлення;
- фланець.

Фланець муфеля притискається до ущільнення стенду. Муфель на стенді центрується вушками по напрямних. Висота муфеля 6512 мм. Зовнішній діаметр 1880 мм. Максимальна температура під муфелем 750 °С, вага муфеля – 3,5 т [4].

Оскільки тангенціальне розташування високошвидкісних пальників з обмеженням температури до 850 °С і висока внутрішня конвекція водню не допускають перегріву муфеля, а повністю автоматизоване підведення до муфеля спочатку повітря, а потім води для охолодження муфеля (при температурі стінки муфеля близько 200 °С) проводиться в зберігаючому режимі, то термін служби муфеля досягає приблизно 500 циклів відпалу. При застосуванні правильно обраної жароміцної легованої хромонікелевої сталі

для виготовлення певних частин муфеля - у розрахунку на звичайну якість охолоджуючої води - не відбувається як швидкого утворення окалини, так і появи тріщин, що інколи виникають у муфелі в результаті напруг [4].

Укладаються кільця за допомогою триплечового кліщового захоплення між рулонами для забезпечення кращого руху та прогріву і збільшення площі контакту захисного газу з металом рулонів.

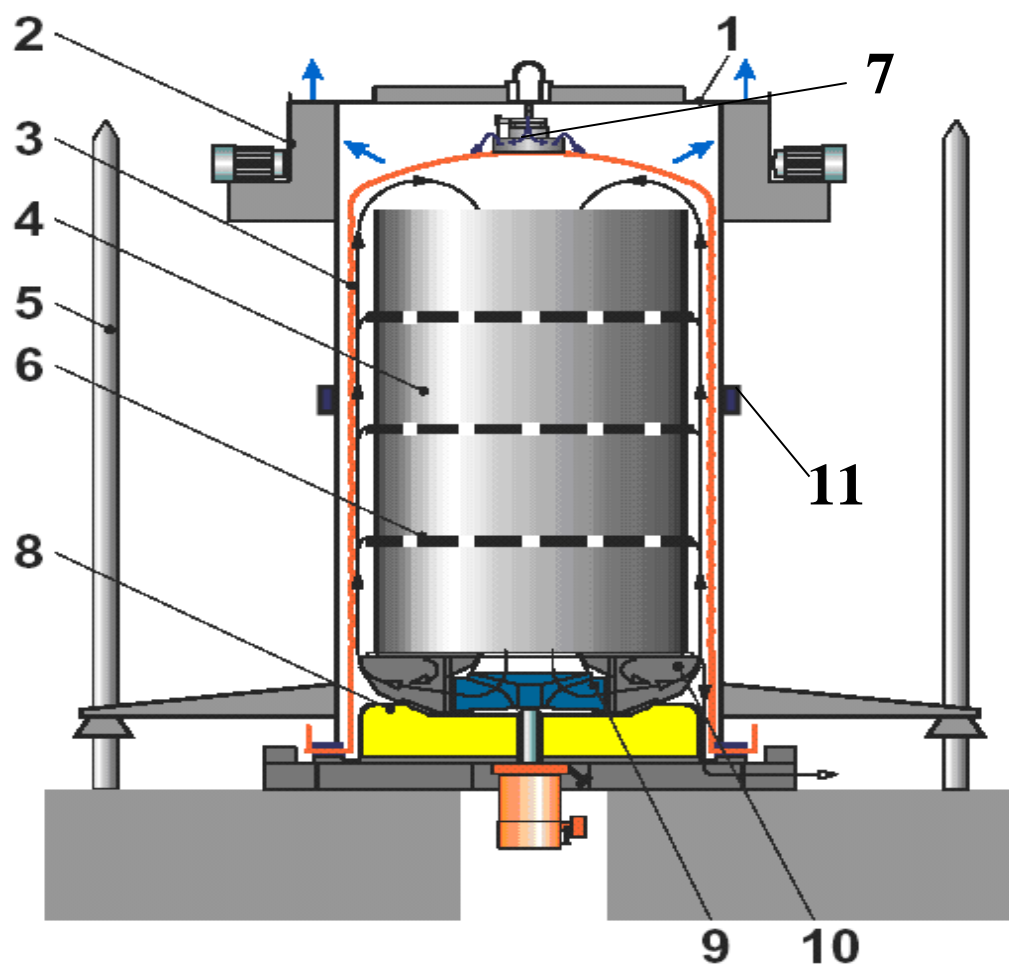
Розміри кільця: зовнішній діаметр - 1740 мм, внутрішній діаметр - 750 мм, товщина - 60 мм, маса - 0,47 т [4].

Ковпак повітряно-водяного охолодження призначений для охолодження металу, який відпалюється під муфелем. Охолоджуючий ковпак має 2 системи охолодження - повітряну і водяну. Повітряна - 2 повітряних вентилятора, встановлених у верхній частині охолоджуючого ковпака. Водяна - 2 контури: водяний душ зверху і розприскувач в середній частині ковпака. Маса ковпака - 3,5 т. Ковпак оснащений двома вентиляторами, потужність вентилятора - 5,5 кВт, продуктивність - 4,4 м³/с, витрата охолоджуючої води 24 м³/год, з них: для водяного душа 16 м³/год, для розбризкувача 8 м³/год. Температура початку водяного охолодження по стендовій термопарі, не більше 380°C [4].

Схема ковпака повітряно-водяного охолодження зі стендом зображена на рис.1.6.

Вентильна стійка служить для подачі, відведення та контролю необхідних для термообробки середовищ:

- 100 % N₂ - для продувки підмуфельного простору; в якості керуючого середовища; як запірний газ водневої запобіжної системи;
- 100 % H₂ - основна захисна (запобіжна) атмосфера для світлого відпалу;
- охолоджуюча вода.



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

Рисунок 1.6 - Схема конструкції стенду з охолоджуючим ковпаком

Виконання однієї вентиляційної стійки: зварний каркас з профільної сталі, включаючи трубопроводи арматури захисного газу (водень, азот), кульові крани, магнітні клапани, автоматичні запірні клапани, диференціальні датчики тиску, швидкісні лічильники, витратоміри, реле тиску, датчики тиску печі, а також вимірювальні з'єднувачі для аналізу газу. Водяна

арматура: запірні клапани, регулювальний клапан, запобіжний клапан, реле витрати і муфта, клапан підтримки тиску в печі з противагою і пружним ущільненням, автоматично діючий конденсатовідвідник. Вентильна стійка обладнана пристроєм регулювання та реєстрації витрати водню для регульованої подачі водню в діапазоні (5...24) м³/год зі ступінчастим зменшенням в 1 м³/год [4].

Рекристалізаційному відпалу в ковпакових печах підлягає холоднокатаний метал товщиною (0,40...2,50) мм марок сталей, що поставляються по діючим стандартам та технічним умовам:

- вуглецеві сталі (08Ю, 08кп, 08пс (в т.ч. для бензобаків) Т 9045-93; 08пс для емалювання ТУ 14-4-479-2000; 08кп, 08пс, 10кп, 10пс, 15кп, 15пс ДСТУ 2834-94 , 20кп, 20пс, Ст1, Ст2, Ст3 (кп, пс, сп), 45 ДСТУ 2834-94 ; 55;
- низьколеговані і легovanі сталі (09Г2, 09Г2С, 09Г2Д ; 10Г2, 16Г2 ТУ 14-1-4118-86; 07ГСЮФ, 08ГСЮТ ТУ У 27.1-4-516-2002).

Розміри рулонів для термічної обробки в висококонвективних ковпакових печах N₂/H₂:

- зовнішній діаметр - до 1700 мм ;
- внутрішній діаметр - 750 мм;
- ширина смуги - 800 - 1520 мм;
- вага рулону - максимальна - 16,0 т [4].

Рулони металу, що приймаються на відпал, повинні мати щільно прилягаючі зовнішні і внутрішні витки; не мати відвисаючих кінців, повинні бути щільно змотані без виступаючих окремих витків.

Опис одностопної газової ковпакової печі з відпалом в середовищі N₂ газую.

Тип печі - газова одностопна піч для світлого рекристалізаційного відпалу щільнозмотаних холоднокатаних рулонів сталі та пом'якшувального відпалу гарячекатаних рулонів.

Нагрівальний ковпак представляє собою металевий кожух циліндричної форми, футерований всередині волокнистими матеріалами або шамотною цеглою, товщина футеровки 230 мм.

В якості паливоспалювальних пристроїв на ковпаках встановлено по 8 інжекційно-атмосферних пальників, розташованих тангенціально в один ярус в нижній частині нагрівального ковпака. 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 ежектором біля основи. Повітря на ежектори подається від вентиляційної станції цеху з тиском в колекторі (300...400) кгс/м². На печах блоків (5...19) застосовується безежекторна система видалення продуктів згоряння.

Максимальна витрата газу на один ковпак – (62...68) м³/год; максимальна витрата газу на один пальник – 8,4 м³/год; теплотворна здатність природного газу - 33,7 МДж/м³; максимальна витрата повітря для ежекторів – 400 м³/год; тиск захисного газу перед печами – 60 кгс/м²; тиск природного газу – (0,78...0,95) кгс/см²; загальна кількість димових газів після ежекторів – 1300 м³/год; максимальна кількість продуктів згоряння - 900 м³/год.

Характеристика ковпака: висота ковпака (габаритна) - 6310 мм; зовнішній діаметр – 3082 мм; загальна вага ковпака з волокнистою футеровкою – 10 т.

Стенд представляє собою зварену конструкцію з вуглецевої сталі, що складається з зовнішньої обичайки круглої форми і днища. У центрі днища є отвір для встановлення вентилятора і опорного столу направляючого апарату. Вся конструкція знизу опирається на 4 несучих балки, розташовані хрестоподібно. Діаметр стенду – 3100 мм; висота стенду 300 мм; загальна маса - 10,1 т; діаметр крильчатки вентилятора – 810 мм; потужність двигуна циркуляційного вентилятора – 15 кВт; число обертів двигуна - 1460 об./хв.; витрата захисного газу на один стенд – (8...15) м³/год; витрата води на охолодження двигуна – (2,0...2,5) м³/год. Всі стенди печей із захисною

атмосферою HNx -газу обладнані вдосконаленими напрямними апаратами, крилатками і конвекторними кільцями конструкції НВО «Славута». На стенді встановлений циркуляційний вентилятор. Для захисту електродвигуна від тепла печі всередину порожнього валу, у верхню частину фланця вентилятора і в корпус двигуна подається проточна вода. До стенду підведені трубопроводи захисного газу, води, ежекторного повітря і природного газу, а також кабельна розводка для живлення електродвигуна вентилятора, виконавчих механізмів КВП і термопари.

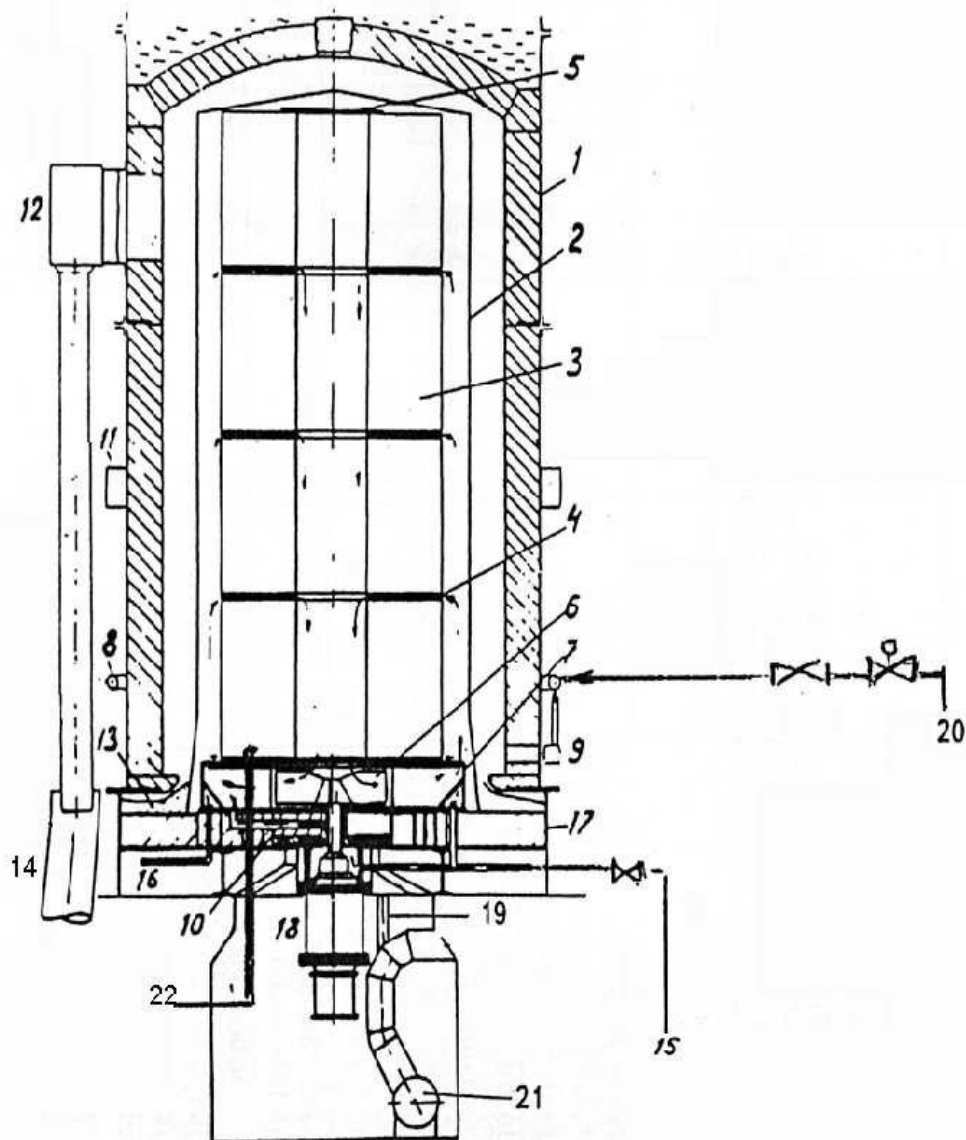
Муфель виготовлений з жаротривкої сталі марок 12X18H10T, 25X14Г14С2Ю (ЭП – 577), він забезпечує герметичність садки рулонів і тим самим захищає метал від окислювальної дії пічних газів. Габаритна висота - 5650 мм; робочий діаметр - 1962 мм; вага муфеля – 1900 кг.

Між рулонами і під низ стопи вкладаються конвекторні кільця, щоб забезпечити інтенсивну теплопередачу між захисним газом і торцями рулону. Зовнішній діаметр кілець - 1700 мм; внутрішній діаметр - 680 мм; товщина - 40 мм. Газова одностопна ковпакова піч представлена на рис. 1.7.

Термічна обробка холоднокатаного металу, а також гарячекатаних рулонів легованих марок сталі проводиться в спеціальній захисній атмосфері, що оберігає поверхню металу від окислення, знеуглеродження.

Печі термічного відділення працюють на HNx - газі, що виробляється на агрегатах 400 ПКН центральної станції захисного газу.

Вихідним продуктом для одержання захисного газу на центральній станції є природний газ, який спалюється в спеціальній камері з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = (0,90 \dots 0,95)$, з подальшим очищенням продуктів згорання від CO_2 (вуглекислий газ) шляхом промивання їх розчином моноетаноламіна в спеціальному апараті - скрубєрі, очищенням продуктів горіння від CO (оксид вуглецю) в конверторі поличного типу і очищенням захисного газу від H_2O в загальностанційних системах осушення.



1 - нагрівальний ковпак; 2 - муфель; 3 - стопа рулонів; 4 - конвекторне кільце; 5 - кришка; 6 - робоче колесо стендового вентилятора; 7 - направляючий апарат; 8 - газопровід природного газу; 9 - газовий пальник; 10 - байпас; 11 - повітряний колектор; 12 - повітряний ежектор; 13 - піщаний затвор; 14 - приймальний патрубок димопроводу; 15 - підвід захисного газу; 16 - відвід захисного газу; 17 - стенд; 18 - електродвигун; 19 - підвід охолоджуючої води; 20 - колектор природного газу; 21 - колектор підводу повітря; 22 - стендова термопара

Рисунок 1.7 - Газова одностопна ковпакова піч

Система осушення газу холодом призначена для конденсаційного осушення газу шляхом його охолодження з 35 °С до 4 °С з подальшим адсорбційним осушенням газу до температури точки роси (т.т.р.) не вище мінус 60 °С. Блок осушки газу включає в себе два адсорбера, заповнені цеолітом.

Виготовлення захисного газу проводиться з використанням технічного азоту, який надходить від кисневої станції і додається в повітря горіння та в агрегати до установок очищення продуктів горіння від СО.

Склад HN_x - газу, що виробляється агрегатами:

- $\text{CO} \leq 0,1 \%$;
- $\text{CO}_2 \leq 0,1 \%$;
- H_2 - 4,0 - 5,2 % (із забезпеченням в колекторі (4,8...5,2) %);
- $\text{O}_2 < 0,001 \%$;
- N_2 – інше.

Захисний газ до стендів газових одностопних печей підводиться у 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 повинен бути не нижче 0,60 кПа.

Циркуляційний вентилятор засмоктує захисний газ у внутрішню порожнину стопи рулонів і проганяє його через простір між стінкою муфеля і зовнішніми витками рулонів. Піднімаючись вгору, газ нагрівається (при охолодженні садки - остуджується) в результаті теплообміну зі стінками муфеля. Омиваючи зверху стопу рулонів і проходячи через конвекторні кільця у внутрішню порожнину рулонів, захисний газ віддає тепло металу при нагріванні і відбирає при охолодженні.

Для прискорення процесу охолодження під муфелем у відділенні використовуються ковпаки прискореного охолодження (КПО).

КПО представляє собою зварену металоконструкцію прямокутної форми з вуглецевої сталі, всередині якої розташований повітроподавальний канал змінного перерізу, в який електровентилятором здійснюється примусова подача повітря з наступним його розподілом через чотири отвори прямокутної форми у внутрішній простір чотирьох стоп рулонів, що встановлюються на КПО.

Для рівномірного розподілу потоку охолоджуючого повітря в кожній стопі безпосередньо на стенд і між рулонами встановлюються конвекторні кільця, стопа накривається кришкою [5].

Технологічне обладнання станції захисного газу.

З метою запобігання окислення металу в процесі термообробки металу в газових ковпакових висококонвективних печах NICON/H₂ фірми «Ебнер» використовується спеціальна захисна атмосфера - сухий водень, також в роботі печей застосовується азот.

Виробництво сухого водню і доочищення азоту здійснюються в установках для отримання захисного газу газового цеху.

Установка для виробництва азоту призначена для очищення необхідного для роботи пічної установки азоту (видалення з азоту наявного кисню).

Технологічний процес забезпечується двома азотними лініями, що включають в себе систему аналізу O₂, систему вимірювання кількісної витрати N₂, змішувач, компресор (агрегат для наповнення ресивера), станцію видалення O₂, систему аналізу H₂, систему тонкого очищення N₂, пов'язаними системою трубопроводів з двома ресиверами і системою водопідготовки з фільтром зворотного промивання. Фільтр зворотного промивання призначений для очищення води, яка подається на охолодження обладнання станції захисного газу. По колектору очищеного азоту газ поступає в ресивер, а потім на ковпакові печі.

Установка працює автоматично і оснащена всіма необхідними для автоматичного режиму пристроями контролю та безпеки.

У роботі завжди тільки одна лінія, друга знаходиться в резерві для підтримки, при необхідності, робочого тиску в системі. Для забезпечення безпеки процесу необхідно постійно мати в наявності азот.

Технічні дані:

- продуктивність очищення на установку - 100 м³/год ;
- максимальний робочий тиск - 1,4 МПа;
- максимальний вміст кисню до очищення - 4 % ;
- максимальний вміст водню після очищення - 0,5 %;
- продуктивність - 2·100 м³/год.

В установці виробництва водню водень генерується електролізом, а потім в підключеній установці очищення звільняється від залишкового кисню і висушується.

Технологічний процес забезпечується трьома незалежно працюючими лініями, що складаються з електролізерів з тонким очищенням Н₂ (призначені для одержання водню з води), пов'язаних системою трубопроводів з системою водопідготовки, пристроєм пониження тиску Н₂ і двома ресиверами для зберігання водню. Продуктивність генерації кожної установки - 55 м³/год, робочий тиск- 1МПа.

Водень, отриманий в установці виробництва водню, після повного очищення по колектору подається в ресивер; до пічної установки термічного відділення ЦХП-1 подається через пристрій регулювання подачі водню [6].

Після очищення і осушки азот і водень містять:

1) азот:

- вміст N₂ - 99,999 % по;
- залишковий вміст O₂ ≤ 5 ппм;
- точка роси - нижче мінус 65 °С;

2) водень:

- вміст Н₂ - 99,9995 % по об'єму ;
- залишковий вміст O₂ ≤ 2 ппм;
- точка роси - нижче мінус 65 °С [6].

1.5 Аналіз технічних характеристик ковпакових печей з водневим та азотним захисним середовищем

Доцільність застосування сухого водню в якості захисної атмосфери замість традиційної азото-водневої з HN_x -газу (95 % азоту і 5 % водню) обумовлена високою теплопровідністю водню (більш, ніж у сім разів вище, ніж у азоту) і його високою проникаючою здатністю - молекула водню в 14 разів менше молекули азоту [7,8].

Основними конструктивними особливостями, притаманними висококонвективним ковпаковим печам з середовищем сухого водню, що дозволяють реалізувати можливості такого середовища за значно інтенсивнішою, ніж у азото-водневому середовищі, конвективній передачі тепла між муфелем і садкою рулонів і від витка до витка в рулонах на стадіях, як нагріву, так і охолодження, є:

- застосування частотно-регульованого електродвигуна з потужним циркуляційним вентилятором;

- застосування нагрівального ковпака, футерованого волокнистими вогнетривкими матеріалами, оснащеного високошвидкісними двопровідними пальниками; в традиційних азотних ковпакових печах футеровка виконана з шамотної цегли, пальники - інжекційно-атмосферні;

- використання ефективного підігріву повітря, що подається до пальників центральним рекуператором і безперервне регулювання нагрівальної системи, що забезпечує високий ККД і низькі питомі витрати енергоносіїв, традиційні азотні печі не обладнані рекуператорами для підігріву повітря для горіння;

- спеціальна конструкція стенду, що дозволяє максимально використовувати його опорну поверхню та забезпечує герметичність робочого простору;

- застосування гофрованого муфеля з жаростійкої сталі, герметично притискаємого до стенду фланцем за допомогою водоохолоджуючого гумового ущільнення і гідроприжимного циліндра; в азотних печах застосовується насипний пісочний затвор, який не забезпечує необхідну герметичність та може привести до зниження якості відпалюваного металу в результаті попадання піску на садку;

- застосування охолоджуючого ковпака з гнучким і ефективним регульованим повітряно-водяним охолодженням;

- використання автоматизованої системи управління процесом роботи печей, із застосуванням спеціально розробленого програмного забезпечення і системи мікропроцесорного управління, що дозволяють задавати і оперативно коригувати температурні та газові режими нагрівання і охолодження садки металу [8,9].

Порівняльна технічна характеристика одностопних ковпакових печей з водневим та азотним захисним середовищем наведена в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльна технічна характеристика одностопних ковпакових печей з водневим та азотним захисним середовищем

Характеристика печі		Тип печі	
1	2	3	4
Параметр	Розмірність	З середовищем сухого водню	З середовищем HN_x -газу
Призначення печі		світлий відпал холоднокатаних рулонів	світлий відпал холоднокатаних рулонів
Температура відпалу	°C	(65...710)	(65...730)
Розміри рулонів :			
- зовнішній діаметр	мм	до 1700	(900...1600)
- внутрішній діаметр	мм	750	760
- висота	мм	(800...1520)	(710...1500)
Середня вага садки	кг	48900	45700
Паливо		природний газ	
Тип газових пальників		двоступеневі високошвидкісні	інжекційно-атмосферні
Кількість пальників	шт.	8	8

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4
Температура повітря для горіння	°С	350	20
Тип футеровки ковпака		волокнисті матеріали	шамотна цегла
Вага ковпака	т	11,0	25,0
Висота ковпака	мм	7343	6310
Розміри муфеля:			
- висота	мм	6512	5650
- зовнішній діаметр	мм	1880	1962
Вага муфеля	т	3,5	1900
Розміри конвекторних кілець:			
- зовнішній діаметр	мм	1740	1700
- внутрішній діаметр	мм	750	680
- висота	мм	60	40
Вид охолодження садки металу		повітряне і водяне	повітряне
Потужність вентилятора стенду	кВт	22	15

Таким чином, в ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» одночасно використовуються ковпакові печі двох конструкцій. Потребує детального аналізу робота нових печей з водневим захисним середовищем, які мають свої переваги, але значно складнішу конструкцію і більшу вартість.

В умовах постійно зростаючих вимог до якості металопродукції, оснащення підприємств сучасним прокатним устаткуванням, розширення марочного і розмірного сортаменту прокату, створення нових та удосконалення існуючих технологічних процесів, а також високих темпів розвитку прокатного виробництва, знання всіх технологічних факторів виробництва прокату дозволить найбільш ефективно вирішувати питання, пов'язані з роботою прокатних цехів, з подальшим впровадженням нової техніки і досягнень науки у виробництві, тим самим забезпечуючи більш високий рівень якості прокату і ефективність його виробництва.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ КОВПАКОВИХ ПЕЧЕЙ

2.1 Дослідження та аналіз режимів термічної обробки рулонів в печах NICON/H₂ та з середовищем HN_x газу

Режим нагріву сталей залежить від конструкції печі, марки сталі, розміру оброблюваних виробів [10]. Весь цикл термообробки поділяється на нагрів, витримку та охолодження. Тепловий і температурний режими ковпакової печі змінюються протягом циклу відпалу. Щоб забезпечити оптимальні умови теплової роботи ковпакової печі, необхідно дотримуватися відповідності інтенсивності підведення тепла до муфеля і відведення тепла від муфеля. Збільшувати інтенсивність тільки одного з цих процесів марно, а в більшості випадків навіть шкідливо. Наприклад, підвищення теплової потужності ковпакової печі для термічної обробки рулонів при недостатній інтенсивності циркуляції захисного газу під муфелем або підвищення інтенсивності циркуляції при недостатній тепловій потужності не може суттєво прискорити нагрів металу, а лише призведе до затрати зайвих коштів на експлуатацію печей. У ковпакових печах для термічної обробки щільнозмотаних рулонів неминуча істотна нерівномірність нагрівання металу [1, 11].

На початковому етапі фірмою «Ебнер» були розроблені і введені в автоматизовану систему управління процесом відпалу з водневим середовищем попередні програми режимів відпалу для всього марочного і розмірного сортаменту. Ці програми передбачали нагрів садок металу всіх марок сталі без проміжних витримок («сходинок») при нагріванні до температури остаточної витримки (температура по стендовій термопарі 710⁰С, розрахункова температура «ядра» 650 ⁰С), розрахунок тривалості основної витримки для металу всього марочного сортаменту без так званого «наздоганяння» температури ядра, що дозволяє у разі використання цієї

функції скоротити тривалість циклу «нагріву – витримки» за рахунок досягнення розрахункової заданої температури відпалу металу в відстаючій точці, в середині рулону - «ядрі», на стадії початкового періоду охолодження після закінчення циклу «нагріву – витримки». Розрахункова температура металу в кінці циклу охолодження садки була встановлена 130 °С. Такий принцип побудови програм в цілому аналогічний застосовуваному на комбінаті для металу вуглецевих марок сталі при відпалі в ковпакових печах з атмосферою HNx-газу (нагрівання повною потужністю нагрівального ковпака до температури витримки зі стендової термопари (650...690) °С для більш тонких профілів (0,5...0,8) мм і (700...710) °С для більш товстих, товщиною до 2,0 мм). У той же час, при відпалі металу в ковпакових печах з атмосферою HNx-газу на комбінаті, особливо при відпалі металу більш тонких профілів, як правило, використовується додаткова короткочасна проміжна витримка при нагріванні протягом 3 годин при температурі приблизно 450 °С для поліпшення умов видалення продуктів сублимації прокатної емульсії і рівномірності прогріву рулонів. При відпалі за рекомендованими фірмою "Ебнер" режимам на холоднокатаному відпаленому металі сталей групи марок кп/пс/сп, як правило, забезпечувався рівень властивостей, що задовольняє вимогам нормативної документації. У той же час, на сталі марки 08Ю рівень невідповідності механічних властивостей вимогам здатності до витяжки ОСВ (особливо складна витяжка) виходив постійно більш високим, ніж після відпалу металу цієї марки сталі в традиційних ковпакових печах ЦХП-1, в атмосфері HNx-газу, із застосуванням діючих на комбінаті режимів, які передбачають використання тривалих проміжних «сходинок» при температурах 450 °С і 500 °С протягом (7...10) годин в процесі нагрівання і остаточної витримки при 700 °С протягом (18...2)3 годин, що і викликало необхідність подальших робіт з пошуку можливостей оптимізації режимів відпалу. Однак, як показали результати проведених відпалів, розроблені фірмою «Ебнер» оптимізовані режими відпалу для сталі марки 08Ю, які передбачали підвищення

температури остаточної витримки зі стендової термопарі до (720...730) °С і розрахункової температури ядра до (690...700) °С, без застосування проміжних витримок в процесі нагрівання, також не забезпечили стабільного отримання механічних і технологічних властивостей.

Після введення печей в роботу, з урахуванням досвіду роботи комбінату і даних наукових досліджень, для сталі марки 08Ю комбінатом "Запоріжсталь" були розроблені і введені режими, спрямовані на максимальну реалізацію можливості отримання механічних, технологічних властивостей та якості поверхні холоднокатаної рулонної сталі цієї марки.

Розроблені комбінатом "Запоріжсталь" режими відпалу передбачають наявність проміжних «сходинок» і регульованої швидкості нагріву по стендовій термопарі: витримку при 450 °С протягом приблизно 5 год, нагрівання від 450 °С до 600 °С зі швидкістю не більше 50 °С/год, витримку при 600 °С приблизно 5 год, нагрів до температури остаточної витримки (690-700 °С зі стендової термопарі (при розрахунковій температурі ядра (670...680) °С, витримка при цих температурах розраховується АСУП з урахуванням усіх параметрів завантаженої садки, по закінченні основної витримки зниження температури на 10 °С протягом 3 год і охолодження під нагрівальним ковпаком з вимкненими пальниками - 6 год.

Охолодження садки під охолоджувальним ковпаком проводиться до температури розпакування металу із застосуванням спочатку повітряного, потім водяного охолодження поверхні муфеля залежно від сортаменту (товщини, ширини) відпалюваного металу.

Середні значення тривалості нагріву (з витримкою) і охолодження зведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Середні значення тривалості нагріву, охолодження та повного циклу відпалу

Марка сталі	Печі з HNx-газом			Печі з водневим середовищем		
	нагрів, год	охолодження, год	разом, год	нагрів, год	охолодження, год	разом, год
08Ю	34,05	51,9	85,95	36,98	12,83	49,81
Інші	22,29	50,9	73,19	18,10	15,43	33,53

Для температурних режимів відпалу металу всього марочного і розмірного сортаменту комбінатом "Запоріжсталь" були розроблені і введені в АСУП нові газові режими відпалу, які передбачають розрахункову витрату водню (спеціальний обсяг продувочного газу) не менше 4,5 м³/т, з метою забезпечення необхідної якості чистоти поверхні відпалюваного прокату без кольорів мінливості і наявності плямистого науглецьовування на поверхні смуги (наявність «сажі»).

Як показав початковий період експлуатації печей з водневим середовищем, проведення відпалів рулонної сталі по вищезазначеним режимам забезпечують стабільне отримання заданої якості відпалюваного металу, який з запасом відповідає вимогам нормативної документації.

З урахуванням цього досвіду, в режими відпалу прокату комбінатом "Запоріжсталь" були введені такі зміни:

- у програмах відпалу металу всього марочного і розмірного сортаменту (включаючи сталь марки 08Ю) була збільшена розрахункова температура «ядра» наприкінці циклу охолодження зі 130 °С до 150 °С, що забезпечило зменшення тривалості циклу охолодження приблизно на 0,8 год;

- у програми відпалу №№ (1..6) для всього розмірного сортаменту сталей марок 08-10кп/пс, 1-3кп/пс була введена функція «наздоганяння» температури ядра, що забезпечує скорочення тривалості кожного відпалу металу за цими програмами приблизно на 1 годину.

За такими температурними програмами відпал металу проводиться по теперішній час.

Режими відпалу сталей марок 08-10 кп/пс, 3 кп/пс, О8Ю в печах з водневим та азотним середовищем наведені в таблицях 2.2 і 2.3.

Таблиця 2.2 – Режими відпалу холоднокатаних рулонів сталі в печах з водневим середовищем

№ програми	Температура ядра, °С		Наздоганання ядра	Температурна програма						Марка і товщина сталі, мм	
	в кінці нагріву	в кінці охолодж.		Параметри	Сегмент						
					0	1	2	3	4		5
1	650	150	так	°С	250	400	700	700	0	0	08-10 кп/пс 0,4- 0,55
				год	0	0	5	0	0	6	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	650	150	так	°С	250	400	700	700	0	0	08-10 кп/пс 0,4- 0,55
				год	0	0	5	0	0	5	
3-6	650	150	так	°С	250	400	700	700	0	0	08-10 кп/пс 0,56 - 1,5
				год	0	0	5	0	0	5	
21	640	150	так	°С	250	400	700	700	0	0	3 кп/пс до 0,85
				год	0	0	6	0	0	6	
22	640	150	так	°С	250	400	700	700	0	0	3 кп/пс > 0,85
				°С	250	400	700	700	0	0	

Таблиця 2.3 – Режими відпалу холоднокатаних рулонів сталі в печах з середовищем HN_x -газу

НД, марка сталі	Товщина металу, мм	Висота рулону, м	Маса рулону, т	Тривалість гарячої продувки, год	Температура відпалу, °С	Тривалість витримки, год	Загальна тривалість відпалу, год	Тривалість охолодження під муфелем, год	Температура розпакування металу, °С
ДСТУ 2834-94 08-10 кп/пс	0,4 – 2,5	1,500 – 1,351	15,0-13,0	10	710	10-15	26	45	120
08-10 кп/пс	0,4 – 2,5	1,351-1,191	14,0-11,5	10	710	8-13	25	44	120
08-10 кп/пс	0,4 – 2,5	1,351-1,191	11,4-9,0	10	710	7-12	22	40	120
3 кп/сп	0,4 – 2,5	1,500 – 1,351	15,0-13,0	10	710	8-13	27	46	120
3 кп/сп	0,4 – 2,5	1,351-1,191	14,0-11,5	10	710	8-13	26	44	120
3 п/с	0,4 – 2,5	1,500 – 1,351	15,0-13,0	10	690	8	27	46	120
3 п/с	0,4 – 2,5	1,351-1,191	14,0-11,5	10	690	8	26	44	120
ГОСТ 9045-93 08Ю для бензобаків	0,4 – 2,5	1,500-1241	15,0-12,5	20	700	23	48	56	120
08Ю,08пс для бензобаків	0,4 – 2,5	1,500-1,241	15,0-12,5	10	710	23	38	55	120
08кп,08пс для бензобаків	0,4 – 2,5	1,500-1,351	15,0-13,0	10	710	10-15	29	46	120

Аналіз тривалості відпалу металу показав, що при відпалі по таким режимам в печах NICON/H₂ загальна тривалість циклу термообробки в середньому становить – 35 годин, проти – 77 годин при відпалі у печах із захисним середовищем HN_x-газу.

При цьому тривалість нагріву – (5..) год, витримки- (6...9) годин, охолодження – 15...18 годин в печах з водневим захистом, проти 8...12 годин нагрівання,(2...9) годин витримки, (34...46) годин охолодження при відпалі у печах з HN_x-газом.

Показники середньої тривалості циклів відпалу металу в печах з водневим та азотним захистом з 2015 р. по 2021 р . зведено в таблицю 2.4.

Графіки температурних режимів процесу повного відпалу (нагрів – витримка – охолодження) в печах з водневим та азотним захисним середовищем зображено на рисунку 2.1.

Таблиця 2.4 – Середня тривалість процесу відпалу в печах з водневим та азотним захисним середовищем

Тип печі	Середня тривалість циклу відпалу, год						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
NICON/H ₂	38,7	36,6	34,3	33,7	33,1	33,9	33,4
з HN _x газом	72,1	74,9	75,5	78,0	77,9	77,8	78,3

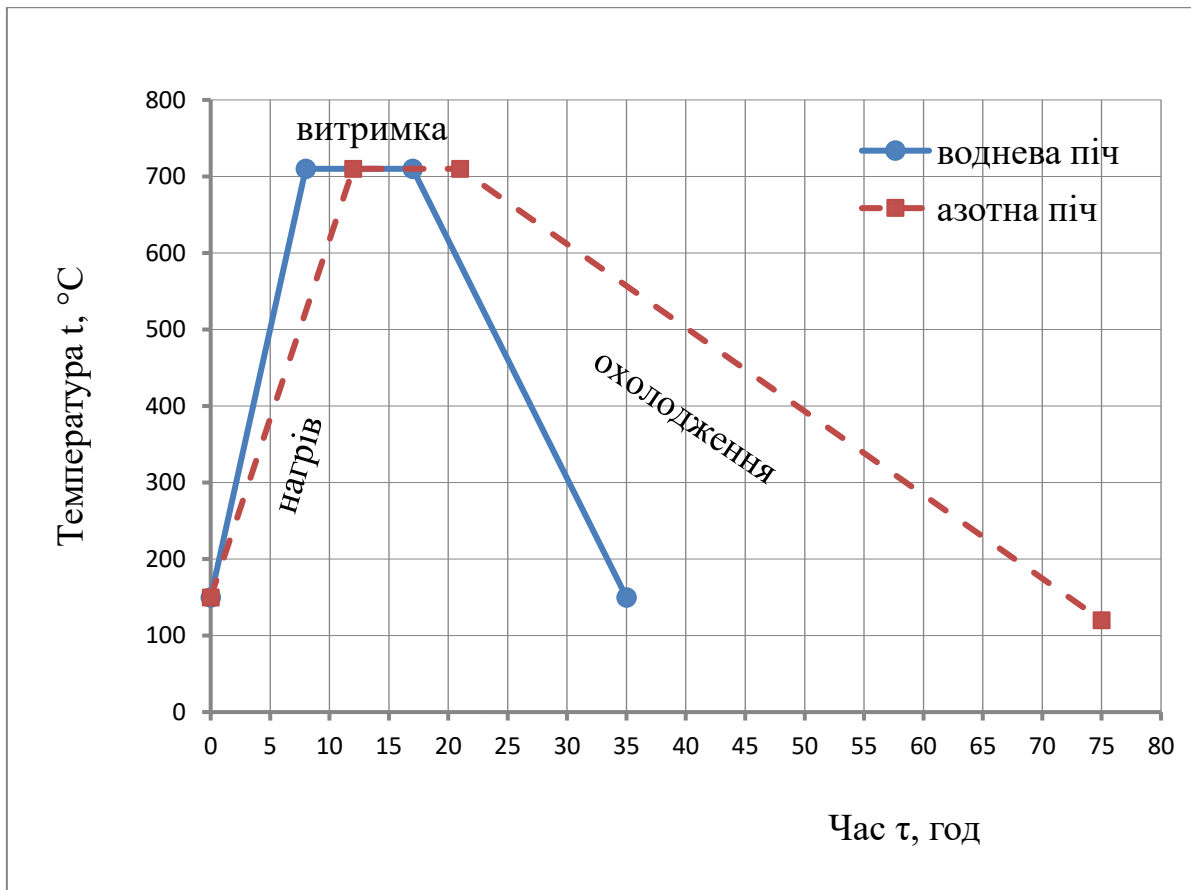


Рисунок 2.1 – Графіки температурних режимів процесу відпалу в печах з водневим та азотним захисним середовищем

2.2 Розрахунок еквівалентного коефіцієнта теплопровідності рулону сталі в радіальному напрямку

Коефіцієнти теплопровідності простих газів збільшуються при підвищенні температури. Коефіцієнт теплопровідності водню значно вищий від коефіцієнту теплопровідності азоту [7,11]. Залежність коефіцієнтів теплопровідності водню та азоту від температури в інтервалі (0...800) °C наведені на рис. 2.2.

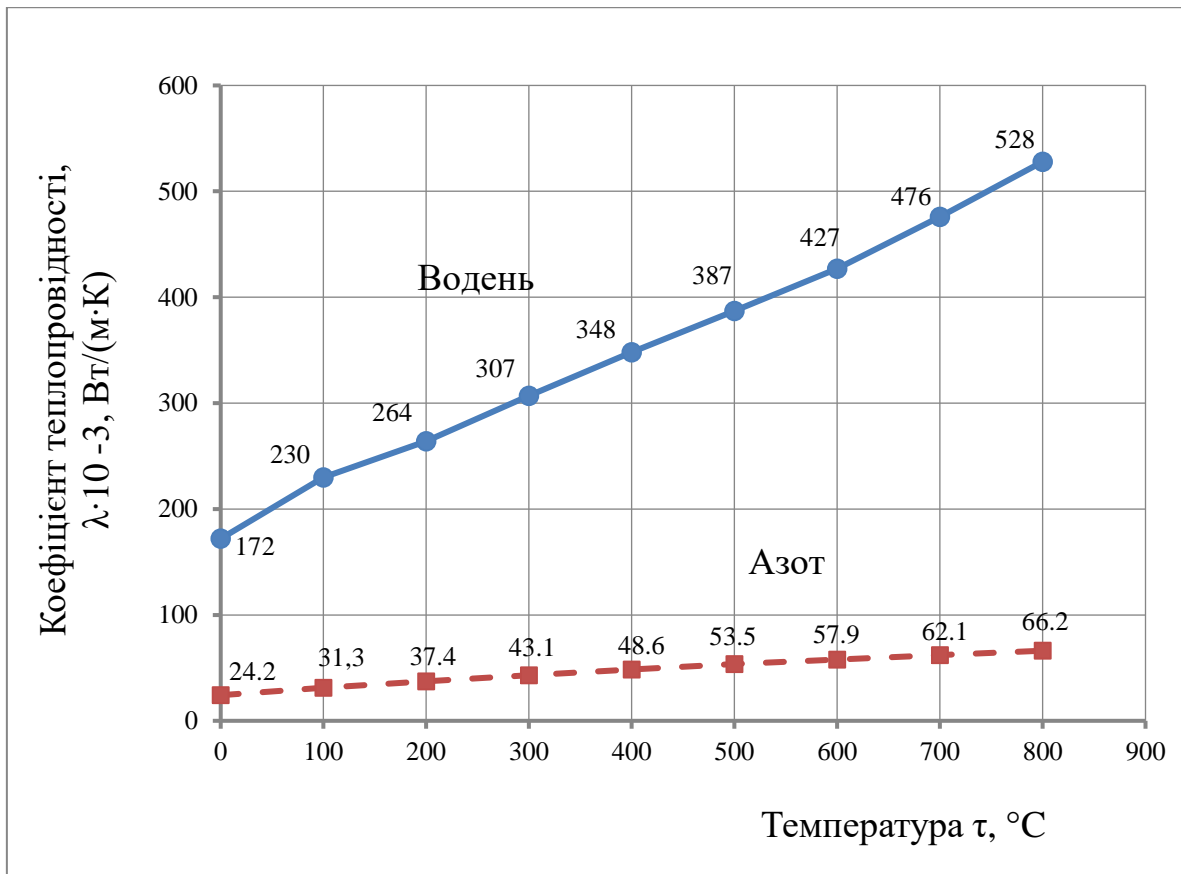


Рис. 2.2.- Коефіцієнти теплопровідності водню та азоту в залежності від температури

Рулон сталевий стрічки можна розглядати як обмежений порожнистий циліндр. Передача тепла в радіальному напрямку, тобто перпендикулярно до поверхні стрічки, здійснюється теплопровідністю через складну систему: металеві витки стрічки - газові проміжки, випромінюванням між витками і безпосереднім контактом деякої частини металевих поверхонь. Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності в радіальному напрямку будемо визначити відповідно [12,13] за формулою:

$$\lambda_e = \frac{(1-n)(S+\delta)}{\frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\frac{\lambda_s}{\delta} + k}} + \frac{n(S+\delta)}{S} \lambda_m, \quad (2.1)$$

де S - товщина листа, м (приймаємо 0,001 м) ;

δ – середня товщина газових проміжків між витками, м (приймаємо 0,00005 м);

λ_m і λ_v – коефіцієнти теплопровідності металевого листа та газових проміжків, Вт/(м К), $\lambda_m = 41$ Вт/(м К) [11], λ_v – за рис. 2.2;

k - коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням через газові проміжки, Вт/м² К, відповідно [13] приймаємо $k = 110$ Вт/м² К;

n – часть поверхні витка, яка контактує з сусіднім витком , приймаємо $n = 0,03$ [13].

Розраховуємо еквівалентні коефіцієнти теплопровідності λ_e з водневою захисною атмосферою в радіальному напрямку при температурах 100, 300, 500 та 700 °С.

При температурі 700 °С, Вт/(м К):

$$\lambda_e = \frac{(1-n)(S+\delta)}{\frac{S}{\lambda_m} + \frac{1}{\frac{\lambda_g}{\delta} + k}} + \frac{n(S+\delta)}{S} \lambda_m = \frac{(1-0,03)(0,001+0,00005)}{\frac{0,001}{41} + \frac{1}{\frac{0,476}{0,00005} + 110}} + \frac{0,03(0,001+0,00005)}{0,001} 41 = 9,24.$$

При температурі 500 °С, Вт/(м·К):

$$\lambda_e = \frac{(1-n)(S+\delta)}{\frac{S}{\lambda_m} + \frac{1}{\frac{\lambda_g}{\delta} + k}} + \frac{n(S+\delta)}{S} \lambda_m = \frac{(1-0,03)(0,001+0,00005)}{\frac{0,001}{41} + \frac{1}{\frac{0,387}{0,00005} + 110}} + \frac{0,03(0,001+0,00005)}{0,001} 41 = 8,004.$$

При температурі 300 °С, Вт/(м·К):

$$\lambda_c = \frac{(1-n)(S+\delta)}{\frac{S}{\lambda_m} + \frac{1}{\frac{\lambda_g}{\delta} + k}} + \frac{n(S+\delta)}{S} \lambda_m = \frac{(1-0,03)(0,001+0,00005)}{\frac{0,001}{41} + \frac{1}{\frac{0,307}{0,00005} + 110}} + \frac{0,03(0,001+0,00005)}{0,001} 41 = 6,816.$$

При температурі 100 °С, Вт/(м·К):

$$\lambda_c = \frac{(1-n)(S+\delta)}{\frac{S}{\lambda_m} + \frac{1}{\frac{\lambda_g}{\delta} + k}} + \frac{n(S+\delta)}{S} \lambda_m = \frac{(1-0,03)(0,001+0,00005)}{\frac{0,001}{41} + \frac{1}{\frac{0,220}{0,00005} + 110}} + \frac{0,03(0,001+0,00005)}{0,001} 41 = 5,43.$$

Розраховуємо еквівалентний коефіцієнт теплопровідності при використанні азоту за формулами розрахунку 2.2. та рис. 2.2.

При температурі 700 °С, Вт (м·К):

$$\lambda_c = \frac{(1-n)(S+\delta)}{\frac{S}{\lambda_m} + \frac{1}{\frac{\lambda_g}{\delta} + k}} + \frac{n(S+\delta)}{S} \lambda_m = \frac{(1-0,03)(0,001+0,00005)}{\frac{0,001}{41} + \frac{1}{\frac{0,0621}{0,00005} + 110}} + \frac{0,03(0,001+0,00005)}{0,001} 41 = 2,62.$$

При температурі 500 °С, Вт/(м·К):

$$\lambda_c = \frac{(1-n)(S+\delta)}{\frac{S}{\lambda_m} + \frac{1}{\frac{\lambda_g}{\delta} + k}} + \frac{n(S+\delta)}{S} \lambda_m = \frac{(1-0,03)(0,001+0,00005)}{\frac{0,001}{41} + \frac{1}{\frac{0,0535}{0,00005} + 110}} + \frac{0,03(0,001+0,00005)}{0,001} 41 = 2,49.$$

При температурі 300 °С, Вт/(м·К):

$$\lambda_e = \frac{(1-n)(S+\delta)}{\frac{S}{\lambda_m} + \frac{1}{\frac{\lambda_g}{\delta} + k}} + \frac{n(S+\delta)}{S} \lambda_m = \frac{(1-0,03)(0,001+0,00005)}{\frac{0,001}{41} + \frac{1}{\frac{0,0431}{0,00005} + 110}} + \frac{0,03(0,001+0,00005)}{0,001} 41 = 2,257.$$

При температурі 100 °С, Вт(м·К):

$$\lambda_e = \frac{(1-n)(S+\delta)}{\frac{S}{\lambda_m} + \frac{1}{\frac{\lambda_g}{\delta} + k}} + \frac{n(S+\delta)}{S} \lambda_m = \frac{(1-0,03)(0,001+0,00005)}{\frac{0,001}{41} + \frac{1}{\frac{0,0313}{0,00005} + 110}} + \frac{0,03(0,001+0,00005)}{0,001} 41 = 2,0117.$$

Отже, проведені розрахунки показали, що еквівалентні коефіцієнти теплопровідності рулону сталі при використанні водню в (2...3) рази перевищують значення еквівалентних коефіцієнтів теплопровідності при використанні азоту.

Результати розрахунків еквівалентного коефіцієнта теплопровідності для водневого та азотного середовищ зображено на рисунку 2.3.

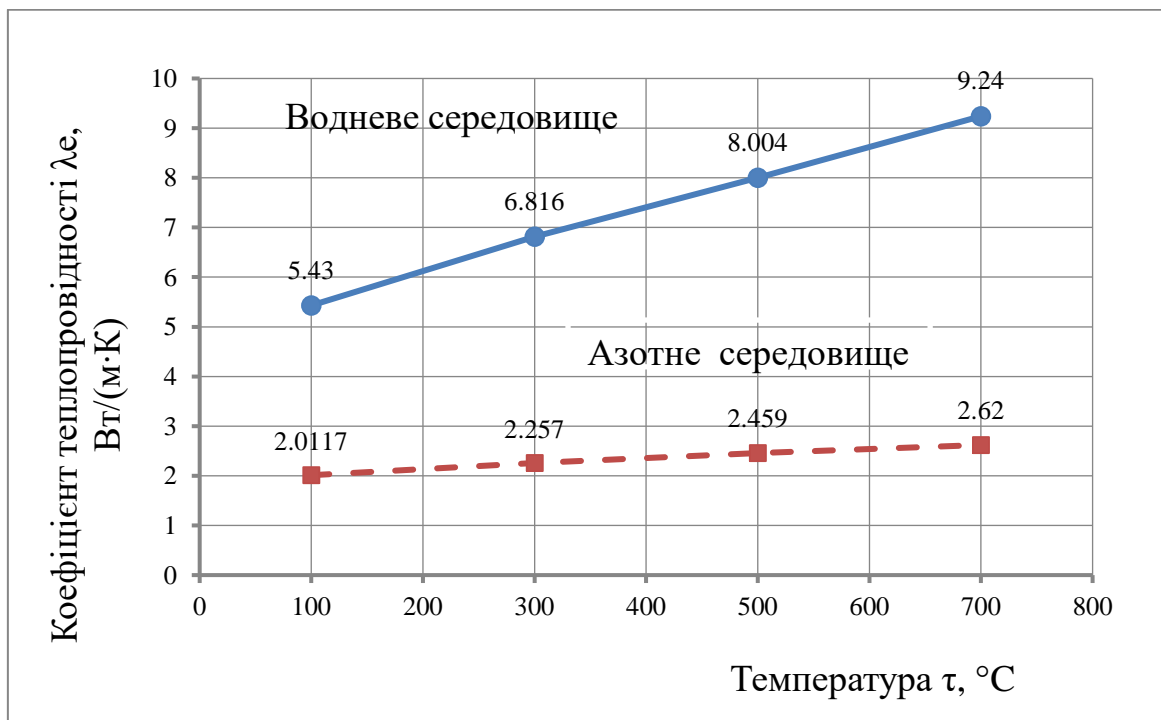


Рисунок 2.3 – Еквівалентні коефіцієнти теплопровідності в залежності від температури при використанні водневого та азотного захисного середовищ

2.3 Розрахунок теплообміну в ковпаковій печі

Розрахунок теплообміну в ковпаковій печі фірми «Ебнер»

Розрахунок виконуємо за методикою [12].

Розрахункова температура муфеля, °С:

$$t_{\text{муф}} = t_{\text{нов}}^{\text{кон}} + 10 = 700 + 10 = 710, \quad (2.2)$$

де $t_{\text{нов}}^{\text{кон}}$ – кінцева температура поверхні рулону, °С (табл. 2.2).

При розрахунку температуру муфеля приймаємо постійною для всього процесу нагріву.

Внутрішній діаметр муфеля, м :

$$D_m = D_p + 0,3 = 1,5 + 0,3 = 1,8, \quad (2.3)$$

де D_p – зовнішній діаметр рулону, м (табл. 1.2).

Приведений коефіцієнт випромінювання від муфеля до зовнішньої бічної поверхні рулону, $Bm / (m^2 \cdot K^4)$:

$$C_{np}^{\text{нагр}} = C_s \left[\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{D_m}{D_p} \left(\frac{1}{\varepsilon_p} - 1 \right) \right]^{-1} = 5,67 \left[\frac{1}{0,7} + \frac{1,8}{1,5} \left(\frac{1}{0,85} - 1 \right) \right]^{-1} = 3,45, \quad (2.4)$$

де $C_s = 5,67 Bm / (m^2 \cdot K^4)$ - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

ε_m - ступінь чорноти муфеля, приймаємо рівною 0,7 [12];

ε_p - ступінь чорноти рулону, приймаємо рівною 0,85 [12].

Середня температура зовнішньої бічної поверхні рулону, °С:

$$t_{\sigma} = 0,9 \cdot t_{\text{муф}} = 0,9 \cdot 710 = 639 \quad (2.5)$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням від муфеля до зовнішньої бічної поверхні рулону, $Bm / (m^2 \cdot K)$:

$$\alpha_{\text{изл}} = C_{\text{нр}} \frac{\left(\frac{t_M + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{\sigma} + 273}{100}\right)^4}{t_{\Gamma} - t_M} = 3,45 \frac{\left(\frac{710 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{639 + 273}{100}\right)^4}{710 - 639} = 117,55 \quad (2.6)$$

Розрахункова температура газу, °С:

$$t_{\Gamma}^{\text{нагр}} = 0,7 \cdot t_{\text{муф}} = 0,7 \cdot 710 = 497 \quad (2.7)$$

Прохідний перетин у конвекторних кільцях, m^2 :

$$F_T^{\text{сеч}} = 1,88 \cdot h_t \left[d_p + (D_p - d_p) / 2 \right] = 1,88 \cdot 0,06 \left[0,75 + (1,5 - 0,75) / 2 \right] = 0,127, \quad (2.8)$$

де h_t – висота конвекторного кільця, м (табл.1.2);

d_p – внутрішній діаметр рулону, м (табл. 1.2).

Дійсна швидкість захисного газу в конвекторних кільцях нижнього рулону, м/с:

$$\omega_{\Gamma} = \beta V_{\Gamma} / 3600 F_T^{\text{сеч}} = 0,3 \cdot 70750 / (3600 \cdot 0,127) = 36,4, \quad (2.9)$$

де V_{Γ} - дійсна кількість циркулюючого захисного газу $m^3 / год$, яка визначається по продуктивності циркуляційного вентилятора;

β - частка газу, що проходить через нижнє конвекторне кільце, приймаємо 0,3 [12].

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, $Bm / (m^2 \cdot K)$:

- від захисного газу до торцевої поверхні рулону:

$$\alpha'_{\Gamma} = 102 \text{ [12];}$$

- те ж, з урахуванням шорсткостей торцевих поверхонь:

$$\alpha_T = 1,5 \cdot \alpha'_T = 1,5 \cdot 102 = 153 \quad (2.10)$$

Прохідний перетин внутрішньої порожнини рулону, m^2 :

$$F_g^{ceч} = 0,785 \cdot d_p^2 = 0,785 \cdot 0,75^2 = 0,44. \quad (2.11)$$

Дійсна швидкість захисного газу у внутрішній порожнині рулону, м/с:

$$\omega_g = (1 - \beta)V_r / 3600F_g^{ceч} = (1 - 0,3) \cdot 70750 / (3600 \cdot 0,44) = 41,26 \quad (2.12)$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від захисного газу до бічної поверхні рулону, $Вт / (m^2 \cdot K)$:

- внутрішній:

$$\alpha'_g = 73 [12];$$

- зовнішній:

$$\alpha'_g = 56,7 [12].$$

Поверхня муфеля, m^2 :

$$F_m = \pi D_p H_m = 3,14 \cdot 1,5 \cdot 6,512 = 30,67, \quad (2.13)$$

де H_m – висота муфеля, м (табл. 1.2).

Поверхня рулонів, m^2 :

- зовнішня бокова:

$$F_g = \pi D_p h_p n_p = 3,14 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 5 = 23,55; \quad (2.14)$$

- внутрішня поверхня:

$$F_g = \pi d_p h_p n_p = 3,14 \cdot 0,75 \cdot 1 \cdot 5 = 11,78; \quad (2.15)$$

- торцева:

$$F_T = 0,3\pi(D_p^2 - d_p^2)n_p = 0,3 \cdot 3,14(1,5^2 - 0,75^2) \cdot 5 = 7,95 \quad (2.16)$$

Коефіцієнт k , м:

$$k = \frac{\alpha_g(F_m + 0,8F_g)}{\alpha_T F_T + \alpha_g F_g} = \frac{56,7(30,67 + 0,8 \cdot 23,55)}{153 \cdot 7,95 + 73 \cdot 11,78} = 1,35 \quad (2.17)$$

Коефіцієнт приведення:

$$\chi = k / (1 + k) = 1,35 / (1 + 1,35) = 0,57 \quad (2.18)$$

Приведені коефіцієнти тепловіддачі конвекцією, $Вт / (м^2 \cdot К)$:

$$\bar{\alpha}_g = \alpha_g^{изл} + \chi \alpha_g = 117,55 + 0,57 \cdot 56,7 = 149,87 \quad (2.19)$$

$$\bar{\alpha}_g = \chi \alpha_g = 0,57 \cdot 73 = 41,61 \quad (2.20)$$

$$\bar{\alpha}_T = \chi \alpha_T = 0,57 \cdot 153 = 87,2 \quad (2.21)$$

Числа Біо:

$$Bi_1 = \bar{\alpha}_g(R_1 - R_2) / \lambda_r = 149,87(0,750 - 0,375) / 9,24 = 6,08, \quad (2.22)$$

$$Bi_2 = \bar{\alpha}_s (R_1 - R_2) / \lambda_r = 41,61(0,750 - 0,375) / 9,24 = 1,69, \quad (2.23)$$

де R_1 і R_2 – зовнішній і внутрішній радіуси рулону, м, (табл. 1.2);

λ_r - еквівалентний коефіцієнт теплопровідності водневого середовища, Вт/(м²·К), (рис.2.3).

Відношення зовнішнього та внутрішнього радіусів рулону:

$$R_1 / R_2 = 0,750 / 0,375 = 2 \quad (2.24)$$

Відносне положення екстремальної температури радіуса рулону:

$$\mu = 0,65 \quad [12]$$

Коефіцієнт форми :

$$\phi_1 = 0,83 \quad [12]$$

Розрахункові товщини рулону в напрямку, м²/год:

- радіальному:

-

$$S_r = \phi_1 \mu (R_1 - R_2) = 0,83 \cdot 0,65 (0,750 - 0,375) = 0,21; \quad (2.25)$$

- осьовому:

-

$$S_z = h_p / 2 = 1 / 2 = 0,5 \quad (2.26)$$

Коефіцієнт температуропровідності рулону в напрямку, м²/год:

-радіальному:

$$a_r = \frac{3,6\lambda_r}{c_m \eta \rho_m} = \frac{3,6 \cdot 9,24}{0,67 \cdot 0,97 \cdot 7850} = 0,007, \quad (2.27)$$

де c_m - теплоємність металу, кДж/(кг·К) [12];

η - коефіцієнт заповнення рулону (приймаємо 0,97);

ρ_i - щільність металу, кг/м³, [2];

- осьовому:

$$a_z = \frac{3,6\lambda_z}{c_m \rho_m} = \frac{3,6 \cdot 41}{0,67 \cdot 7850} = 0,028 \quad (2.28)$$

де λ_z - коефіцієнт теплопровідності металу, Вт/(м²·К) [12].

Числа Біо і Фур'є в напрямку :

- радіальному:

$$Bi_r = \alpha_o S_r / \lambda_r = 149,87 \cdot 0,21 / 9,24 = 3,41 \quad (2.29)$$

$$Fo_r = a_r \tau / S_r^2 = 0,007\tau / 0,21^2 = 0,158\tau; \quad (2.30)$$

- осьовому:

$$Bi_z = \alpha_r S_z / \lambda_z = 87,2 \cdot 0,5 / 41 = 1,06$$

$$Fo_z = a_z \tau / S_z^2 = 0,028\tau / 0,5^2 = 0,112\tau.$$

Розрахунок теплообміну в ковпаковій печі з ННх - газом

Розрахунок виконуємо за методикою [12] і розрахунком 2.3.

Розрахункова температура муфеля, °С

$$t_{\text{муф}} = t_{\text{нов}}^{\text{кон}} + 10 = 710 + 10 = 720,$$

де $t_{\text{нов}}^{\text{кон}}$ – кінцева температура поверхні рулону, °С (табл. 2.3).

При розрахунку температуру муфеля приймаємо постійною для всього процесу нагріву.

Внутрішній діаметр муфеля, м :

$$D_m = D_p + 0,3 = 1,6 + 0,3 = 1,9,$$

де D_p – зовнішній діаметр рулону, м (табл. 1.2).

Приведений коефіцієнт випромінювання від муфеля до зовнішньої бічної поверхні рулону, $Bm/(m^2 \cdot K^4)$:

$$C_{np}^{назр} = C_s \left[\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{D_m}{D_p} \left(\frac{1}{\varepsilon_p} - 1 \right) \right]^{-1} = 5,67 \left[\frac{1}{0,7} + \frac{1,9}{1,6} \left(\frac{1}{0,85} - 1 \right) \right]^{-1} = 3,46,$$

де $C_s = 5,67 Bm/(m^2 \cdot K^4)$ - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

ε_m - ступінь чорноти муфеля, приймаємо рівною 0,7 [12];

ε_p - ступінь чорноти рулону, приймаємо рівною 0,85 [12].

Середня температура зовнішньої бічної поверхні рулону, °C:

$$t_{\bar{o}} = 0,9 \cdot t_{муф} = 0,9 \cdot 720 = 648.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням від муфеля до зовнішньої бічної поверхні рулону, $Bm/(m^2 \cdot K)$

$$\alpha_{изл} = C_{np} \frac{\left(\frac{t_m + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\bar{o}} + 273}{100} \right)^4}{t_{\Gamma} - t_m} = 3,46 \frac{\left(\frac{720 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{648 + 273}{100} \right)^4}{720 - 648} = 121,47.$$

Розрахункова температура газу, °C:

$$t_{\Gamma}^{назр} = 0,7 \cdot t_{муф} = 0,7 \cdot 720 = 504.$$

Прохідний перетин у конвекторних кільцях, m^2 :

$$F_T^{сеч} = 1,88 \cdot h_t \left[d_p + (D_p - d_p) / 2 \right] = 1,88 \cdot 0,04 \left[0,76 + (1,6 - 0,76) / 2 \right] = 0,89,$$

де h_t – висота конвекторного кільця, м (табл. 1.2);

d_p – внутрішній діаметр рулону, м (табл. 1.2).

Дійсна швидкість захисного газу в конвекторних кільцях нижнього рулону, м/с :

$$\omega_T = \beta V_T / 3600 F_T^{ceч} = 0,3 \cdot 40000 / (3600 \cdot 0,89) = 25,15 ,$$

де V_T - дійсна кількість циркулюючого захисного газу $м^3 / год$, яка визначається по продуктивності циркуляційного вентилятора;

β - частка газу, що проходить через нижнє конвекторне кільце, приймаємо 0,3 [12].

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, $Вт / (м^2 \cdot К)$:

- від захисного газу до торцевої поверхні рулону:

$$\alpha'_T = 36 [12];$$

- те ж, з урахуванням шорсткостей торцевих поверхонь:

$$\alpha_T = 1,5 \cdot \alpha'_T = 1,5 \cdot 36 = 54 .$$

Прохідний перетин внутрішньої порожнини рулону, $м^2$:

$$F_g^{ceч} = 0,785 \cdot d_p^2 = 0,785 \cdot 0,760^2 = 0,453.$$

Дійсна швидкість захисного газу у внутрішній порожнині рулону, м/с :

$$\omega_g = (1 - \beta) V_T / 3600 F_g^{ceч} = (1 - 0,3) \cdot 40000 / (3600 \cdot 0,44) = 27,67.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від захисного газу до бічної поверхні рулону, $Вт / (м^2 \cdot К)$:

- внутрішній:

$$\alpha'_g = 38 [12];$$

- зовнішній:

$$\alpha'_g = 31 [12].$$

Поверхня муфеля, $м^2$:

$$F_M = \pi D_p H_M = 3,14 \cdot 1,9 \cdot 5,650 = 33,71,$$

де H_M – висота муфеля, м, (табл. 1.2).

Поверхня рулонів, m^2 :

- зовнішня бокова:

$$F_{\delta} = \pi D_p h_p n_p = 3,14 \cdot 1,6 \cdot 1 \cdot 5 = 26,69;$$

- внутрішня поверхня:

$$F_{\delta} = \pi d_p h_p n_p = 3,14 \cdot 0,76 \cdot 1 \cdot 5 = 11,93;$$

- торцева:

$$F_T = 0,3\pi(D_p^2 - d_p^2)n_p = 0,3 \cdot 3,14(1,6^2 - 0,76^2) \cdot 5 = 9,38.$$

Коефіцієнт k , м:

$$k = \frac{\alpha_{\delta}(F_M + 0,8F_{\delta})}{\alpha_T F_T + \alpha_{\delta} F_{\delta}} = \frac{31(33,71 + 0,8 \cdot 26,69)}{54 \cdot 9,38 + 38 \cdot 11,95} = 1,37.$$

Коефіцієнт приведення:

$$\chi = k / (1 + k) = 1,37 / (1 + 1,37) = 0,58.$$

Приведені коефіцієнти тепловіддачі конвекцією, $Вт / (m^2 \cdot K)$:

$$\bar{\alpha}_{\delta} = \alpha_{\delta}^{1,23} + \chi \alpha_{\delta} = 121,47 + 0,58 \cdot 31 = 139,45,$$

$$\bar{\alpha}_{\delta} = \chi \alpha_{\delta} = 0,58 \cdot 38 = 22,04,$$

$$\bar{\alpha}_T = \chi \alpha_T = 0,58 \cdot 54 = 31,32.$$

Числа Біо:

$$Bi_1 = \bar{\alpha}_{\delta}(R_1 - R_2) / \lambda_r = 139,45(0,8 - 0,38) / 2,62 = 22,35,$$

$$Bi_2 = \bar{\alpha}_6 (R_1 - R_2) / \lambda_r = 22,04(0,8 - 0,38) / 2,62 = 3,53,$$

де λ_r - еквівалентний коефіцієнт теплопровідності азотного середовища, Вт/(м²·К) (рис.2.3).

Відношення зовнішнього та внутрішнього радіусів рулону:

$$R_1 / R_2 = 0,8 / 0,38 = 2,11.$$

Відносна положення екстремальної температури радіуса рулону:

$$\mu = 0,76 \text{ [12]}.$$

Коефіцієнт форми :

$$\phi_1 = 0,84 \text{ [12]}.$$

Розрахункові товщини рулону в напрямку, м²/год:

- радіальному:

$$S_r = \phi_1 \mu (R_1 - R_2) = 0,84 \cdot 0,76 (0,8 - 0,38) = 0,27;$$

- осьовому:

$$S_z = h_p / 2 = 1 / 2 = 0,5.$$

Коефіцієнт температуропровідності рулону в напрямку, м²/год:

-радіальному:

$$a_r = \frac{3,6 \lambda_r}{c_m \eta \rho_m} = \frac{3,6 \cdot 2,62}{0,67 \cdot 0,97 \cdot 7850} = 0,002,$$

де c_m - теплоємність металу, кДж/(кг·К) [12];

η - коефіцієнт заповнення рулону (приймаємо 0,97);

ρ_i - щільність металу, кг/м³ [12];

- осьовому:

$$a_z = \frac{3,6\lambda_z}{c_m \rho_m} = \frac{3,6 \cdot 41}{0,67 \cdot 7850} = 0,028,$$

де λ_z - коефіцієнт теплопровідності металу, Вт/(м²·К) [12].

Числа Біо і Фур'є в напрямку :

- радіальному:

$$Bi_r = \alpha_{\sigma} S_r / \lambda_r = 139,45 \cdot 0,27 / 2,62 = 14,3,$$

$$Fo_r = a_r \tau / S_r^2 = 0,002\tau / 0,27^2 = 0,027\tau$$

- осьовому:

$$Bi_z = \alpha_{\tau} S_z / \lambda_z = 31,32 \cdot 0,5 / 41 = 0,27,$$

$$Fo_z = a_z \tau / S_z^2 = 0,028\tau / 0,5^2 = 0,112\tau.$$

Розрахунок розподілу температур в рулоні при нагріванні.

На підставі даних розрахунків теплообміну в ковпакових печах розраховуємо розподіл температур поверхні в рулоні.

Знаходимо залежність температури поверхні рулону від часу нагріву в водневій ковпаковій печі .

Задаємося $\tau = 2$ год, визначаємо:

$$Fo_r = 0,158 \cdot 2 = 0,32.$$

Відносна температура в радіальному напрямку (θ_r) по рис.130 [13] або номограмам [1,2] (при $Bi_r = 3,41$ і $\beta = 2$) складає 0,71.

При $Fo_z = 0,112 \cdot 2 = 0,244$ ($Bi_r = 1,06$) по рис.129 [13] або номограмам [1,2] величина θ_z (відносна температура в осьовому напрямку) складає 0,65.

Тоді $\theta = \theta_r \cdot \theta_z = 0,71 \cdot 0,65 = 0,455$.

Знаходимо екстремальну (мінімальну) температуру рулону за формулою [1,2,13], °C:

$$t_{extr} = t_{myf} - (t_{myf} - t_0) \cdot \theta = 710 - (710 - 150) \cdot 0,455 = 432, \quad (2.31)$$

де t_0 – початкова температура рулону.

Аналогічно визначаємо екстремальну температуру рулону при $\tau = 1 \dots 8$ год. Для визначення екстремальної температури рулону в азотній ковпаковій печі задаємося $\tau = 1 \dots 15$ год. Bi_r та Bi_z для всіх випадків τ приймаємо однаковими, згідно розрахунків 2.3.

Результати розрахунків зводимо в табл. 2.4 і 2.5. Діаграма залежності екстремальної температури в рулоні від часу нагріву зображена на рис. 2.4.

Таблиця 2.4 – Розподіл екстремальної температури в рулоні металу, відпаленого в водневій печі

τ , год	Fo_r	Bi_r	θ_r	Fo_z	Bi_z	θ_z	$\Theta = \theta_r \cdot \theta_z$	t_{extr} , °C
1	0,158	3,41	0,91	0,112	1,06	0,85	0,774	276
2	0,132	3,41	0,71	0,224	1,06	0,70	0,497	432
3	0,474	3,41	0,38	0,336	1,06	0,65	0,247	571
4	0,632	3,41	0,21	0,448	1,06	0,63	0,132	636
5	0,790	3,41	0,10	0,560	1,06	0,61	0,061	676
6	0,948	3,41	0,06	0,672	1,06	0,60	0,036	689
7	1,111	3,41	0,03	0,784	1,06	0,58	0,017	700
8	1,264	3,41	0,016	0,896	1,06	0,57	0,008	704

Таблиця 2.5 – Розподіл екстремальної температури в рулоні металу, відпаленого в азотній печі

τ , год	Fo_r	Bi_r	θ_r	Fo_z	Bi_z	θ_z	$\Theta = \theta_r \cdot \theta_z$	t_{extr} , °C
1	0,027	14,3	0,96	0,112	0,29	0,92	0,881	218
2	0,054	14,3	0,87	0,224	0,29	0,78	0,696	323
3	0,081	14,3	0,80	0,336	0,29	0,71	0,568	396
4	0,108	14,3	0,72	0,448	0,29	0,69	0,497	436
5	0,135	14,3	0,63	0,560	0,29	0,60	0,378	504
6	0,162	14,3	0,52	0,672	0,29	0,56	0,292	554
7	0,189	14,3	0,49	0,784	0,29	0,51	0,245	580
8	0,216	14,3	0,43	0,896	0,29	0,49	0,211	599
9	0,243	14,3	0,40	1,001	0,29	0,42	0,168	628
10	0,27	14,3	0,39	1,120	0,29	0,40	0,156	651
12	0,324	14,3	0,21	1,344	0,29	0,31	0,042	698
15	0,42	14,3	0,19	1,680	0,29	0,19	0,023	709

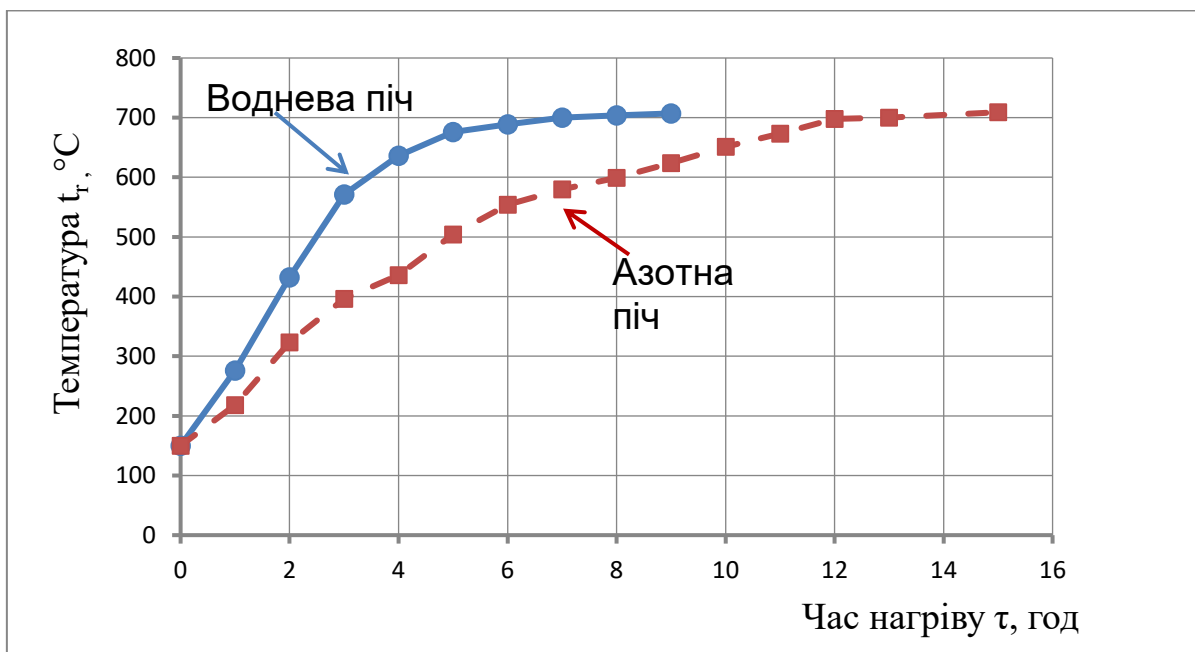


Рис. 2.4 – Залежність екстремальної температури від часу нагріву

Визначимо температури бокової (t_{δ}), внутрішньої ($t_{\text{в}}$), торцевої ($t_{\text{т}}$) поверхонь в рулоні, температуру циркулюючого газу ($t_{\text{г}}$) в залежності від екстремальної температури (t_{extr}).

Температури t_{δ} , $t_{\text{в}}$, $t_{\text{г}}$, $t_{\text{т}}$ визначаємо за формулою [13], $^{\circ}\text{C}$:

$$t_i = t_{\text{extr}} + K_i \cdot (t_{\text{муф}} - t_{\text{extr}}), \quad (2.32)$$

де K_i – коефіцієнт для розрахунку температур, приймаємо згідно з [13]:

$$K_{\delta} = 0,837; K_{\text{в}} = 0,119; K_{\text{г}} = 0,220; K_{\text{т}} = 0,650.$$

Розраховуємо шукані величини для рулонів, відпалених в печі з водневим середовищем при $t_{\text{extr}} = 276 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (табл. 2.4):

$$t_{\delta} = t_{\text{extr}} + K_{\delta} \cdot (t_{\text{муф}} - t_{\text{extr}}) = 276 + 0,837 \cdot (710 - 276) = 632 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{в}} = t_{\text{extr}} + K_{\text{в}} \cdot (t_{\text{муф}} - t_{\text{extr}}) = 276 + 0,119 \cdot (710 - 276) = 326 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{г}} = t_{\text{extr}} + K_{\text{г}} \cdot (t_{\text{муф}} - t_{\text{extr}}) = 276 + 0,220 \cdot (710 - 276) = 340 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{т}} = t_{\text{extr}} + K_{\text{т}} \cdot (t_{\text{муф}} - t_{\text{extr}}) = 276 + 0,650 \cdot (710 - 276) = 544 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Задаємося другими величинами t_{extr} з табл. 2.4 і визначаємо t_{δ} , $t_{\text{в}}$, $t_{\text{г}}$, $t_{\text{т}}$.

Аналогічно розраховуємо t_{δ} , $t_{\text{в}}$, $t_{\text{г}}$, $t_{\text{т}}$ для рулонів, відпалених в печі з азотним середовищем, користуючись даними табл. 2.3. Результати розрахунків зводимо в таблиці 2.6 і 2.7.

Таблиця 2.6 – Величини $t_6, t_B, t_T, t_{\Gamma}$ в залежності від t_{extr} (воднева піч)

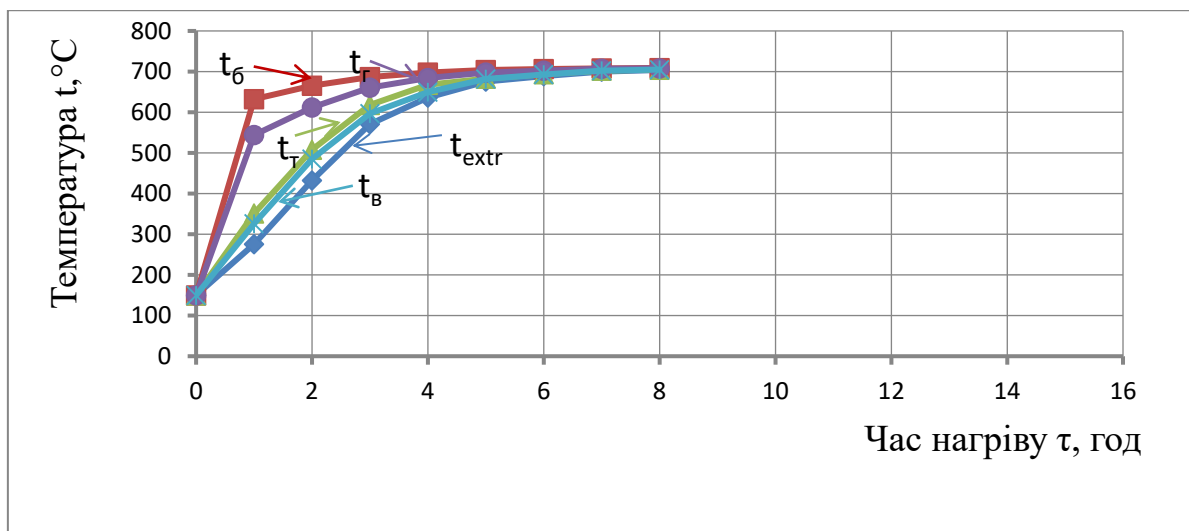
Величина	Екстремальна температура $t_{extr}, ^\circ\text{C}$							
	276	432	571	636	676	689	700	704
t_6	632	665	687	698	704	706	708	709
t_B	326	485	597	650	682	693	702	705
t_T	340	493	602	643	683	694	702	705
t_{Γ}	544	612	661	684	698	702	707	708

Таблиця 2.7 – Величини $t_6, t_B, t_T, t_{\Gamma}$ в залежності від t_{extr} (азотна піч)

Величина	Екстремальна температура $t_{extr}, ^\circ\text{C}$											
	218	323	396	436	504	554	580	599	628	651	698	709
t_6	629	646	658	665	676	684	688	691	696	700	708	710
t_B	311	396	455	488	543	583	604	620	643	662	700	709
t_T	326	408	465	496	549	588	608	623	646	663	700	709
t_{Γ}	537	574	600	614	637	655	664	671	681	689	706	709

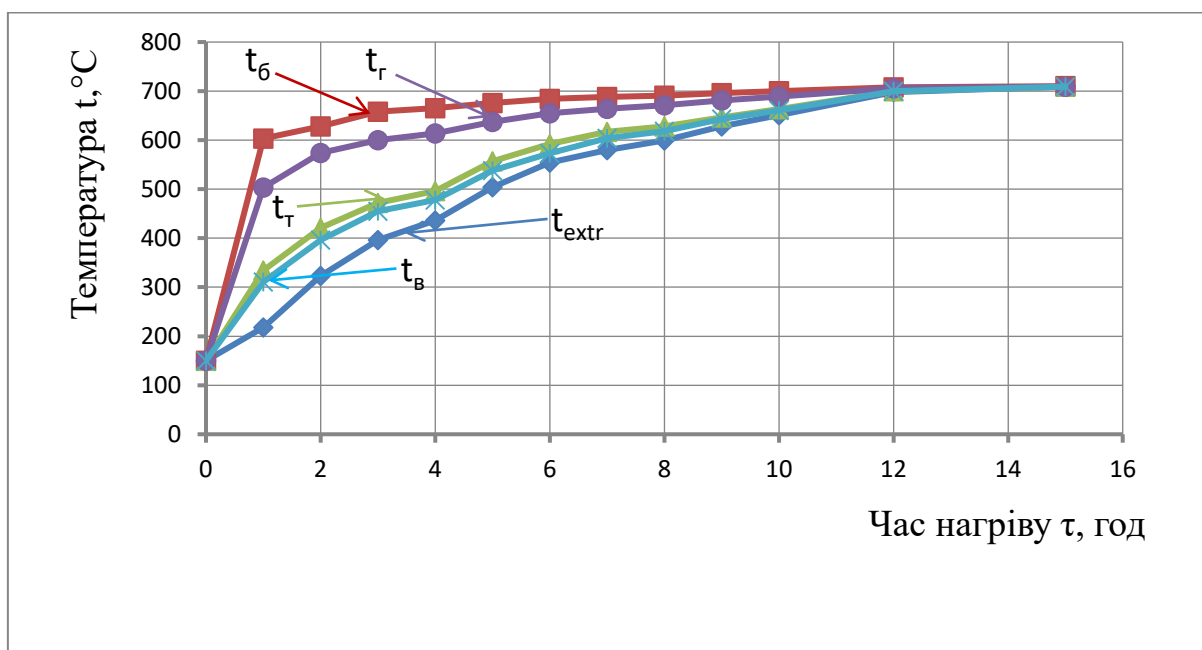
По даним табл. 2.6 і 2.7 будемо температурні криві для рулонів металу, відпаленого в печах з водневим та азотним захистом.

Для проведення аналізу залежності температур поверхонь рулону (бокової, внутрішньої та торцевої) і температури циркуляційного газу від часу нагріву, будемо порівняльні графіки для печей з водневим та азотним захисним середовищем (рис. 2.8 - 2.11).



t_{extr} - екстремальна температура в рулоні, t_6 , t_B , t_T – температури бокової, внутрішньої, торцевої поверхонь в рулоні, t_R – температура газу

Рисунок 2.6 - Розрахункові температурні криві для рулону металу, відпаленого в печі з водневим середовищем



t_{extr} - екстремальна температура в рулоні, t_6 , t_B , t_T – температури бокової, внутрішньої, торцевої поверхонь в рулоні, t_R – температура циркуляційного газу

Рисунок 2.7 – Розрахункові температурні криві для рулону металу, відпаленого в печі з азотним середовищем

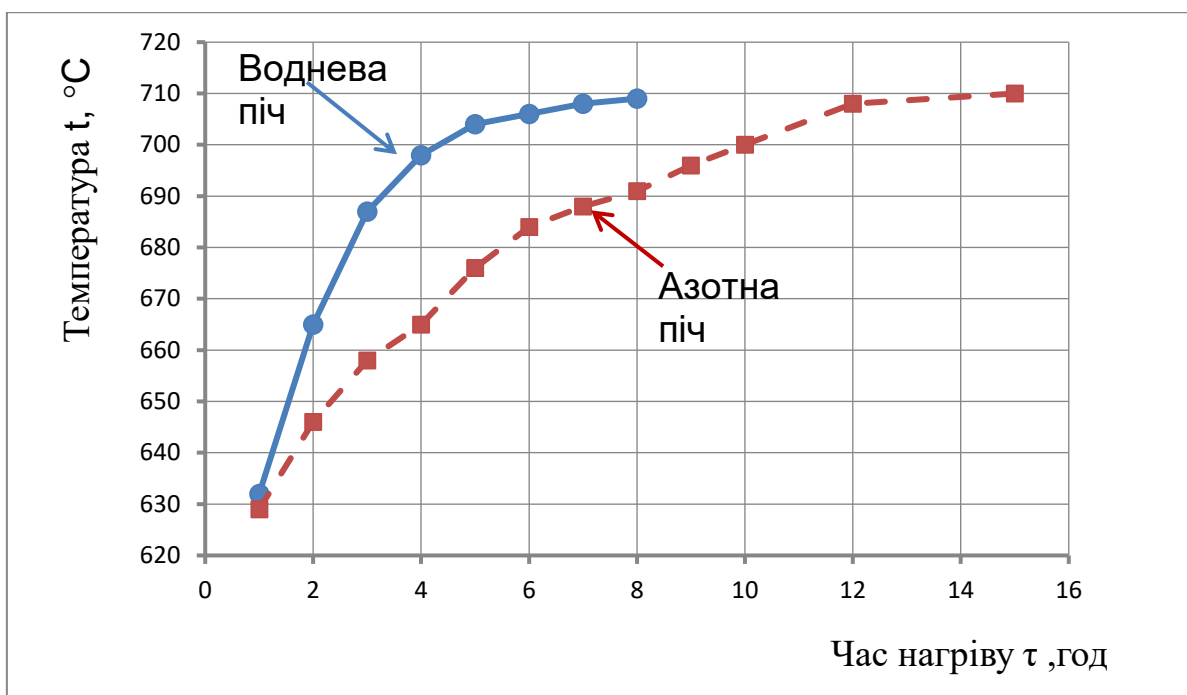


Рисунок 2.8 – Залежність температури бокової поверхні рулону від часу нагріву

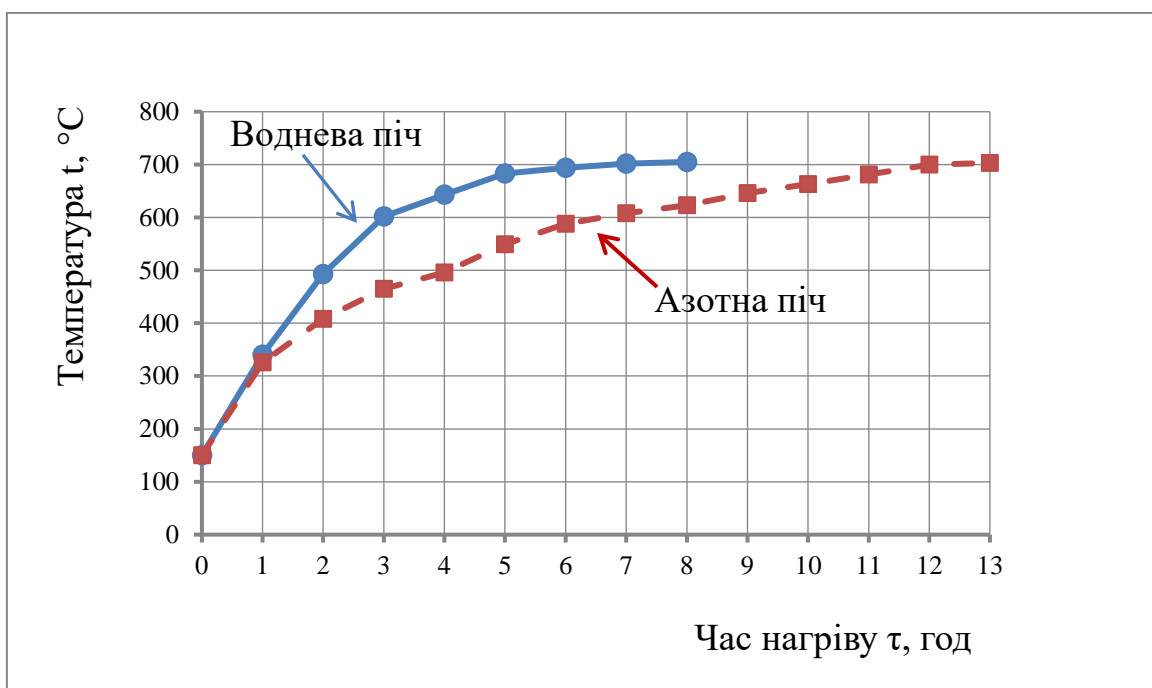


Рисунок 2.9 – Залежність температури торцевої поверхні рулону від часу нагріву

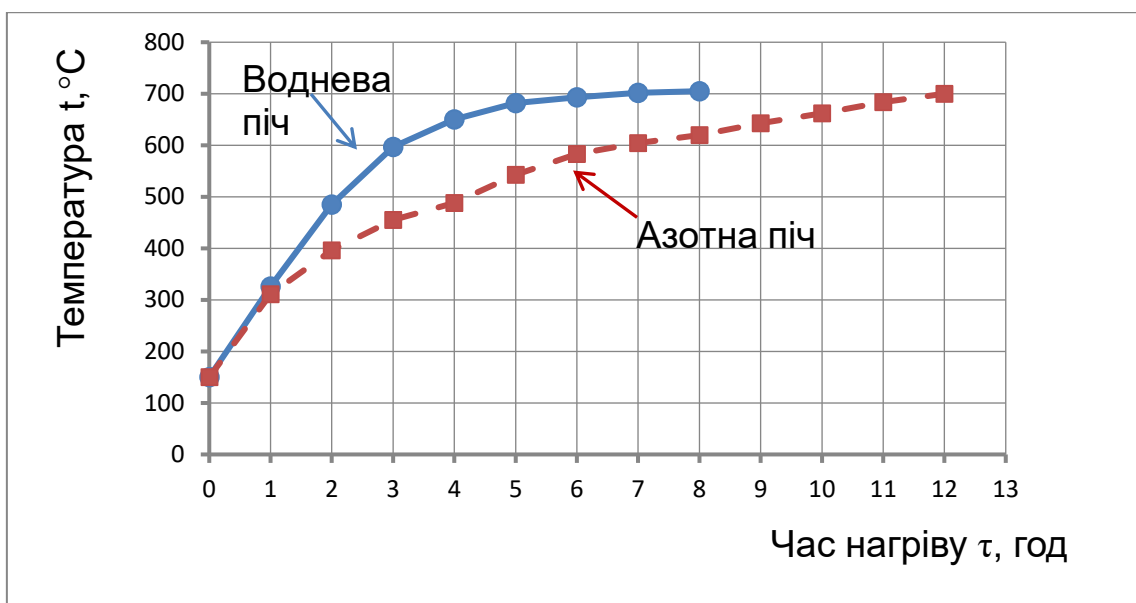


Рисунок 2.10 – Залежність температури внутрішньої поверхні рулону від часу нагріву

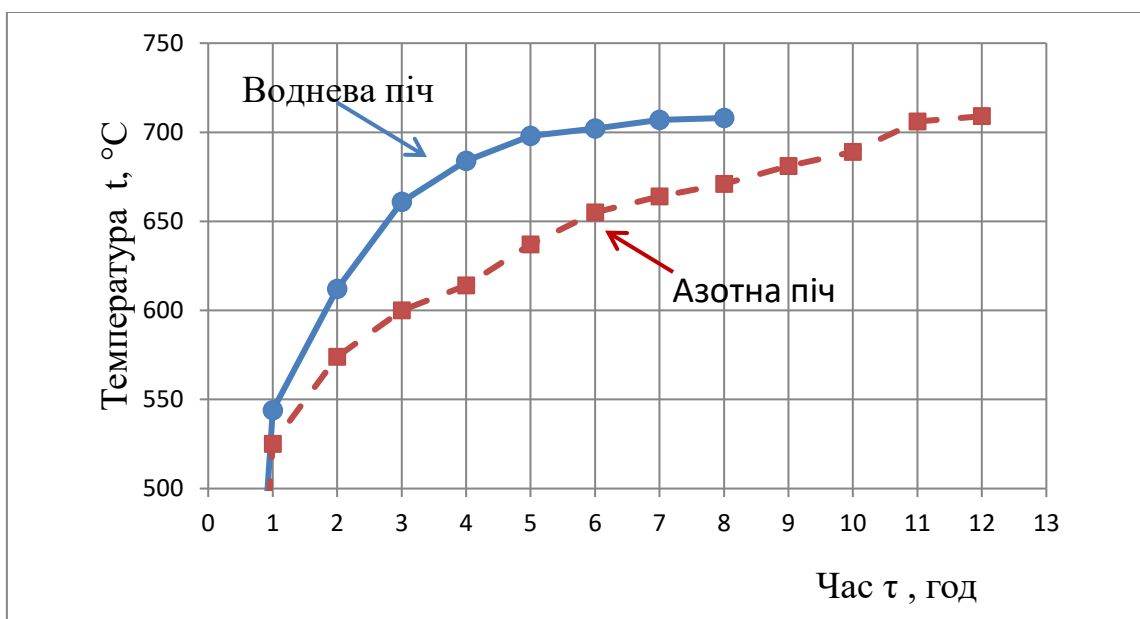


Рисунок 2.11 – Залежність температури циркуляційного газу від часу нагріву

Таким чином, результати розрахунків підтверджують перевагу нагріву в атмосфері сухого водню. З графіків видно, що кінцева температура нагріву рулонів досягається у водневому середовищі за 8 годин, а в азотному за 13 годин, що в 1,6 рази довше.

3 АНАЛІЗ СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ ПО ВПРОВАДЖЕННЮ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДПАЛУ В ВИСОКОНВЕКТИВНИХ КОВПАКОВИХ ПЕЧАХ З СЕРЕДОВИЩЕМ СУХОГО ВОДНЮ

Для оцінки штампуємості металу використовують наступні механічні характеристики:

- тимчасовий опір δ_b ;
- межа текучості δ_t ;
- відношення межі текучості до тимчасового опору δ_t / δ_b ;
- відносне подовження δ ;
- глибина витягнутої лунки (по Еріксону), міра здатності металу до

втяжки ІЕ [14,15].

Межа текучості - одна з найважливіших характеристик, які визначають здатність сталі до штампування. Чим менше δ_t , при постійному значенні δ_b , тим більше зміцнюється сталь в початковий момент деформації [16].

Показником здатності листової сталі до глибокої втяжки є відношення δ_t / δ_b [14].

Практика вітчизняних заводів показала, що мінімальний брак при втяжці важкоштампуємих деталей має місце у металу, що має наступні механічні властивості:

- відносне подовження δ - більше 40 %;
- відношення δ_t / δ_b - менше 0,7.

Допустимі значення глибини лунки по Еріксону [17,18] для металу особливо складної втяжки (ОСВ) наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Допустимі значення глибини лунки по Еріксону

Товщина листа, мм	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
ІЕ, мм (не менше)	10,6	10,8	11,2	11,3	11,4	11,7	11,8	12,0

Результати випробувань механічних властивостей металу, відпаленого у печах з середовищем сухого водню ЦХП-1 за тримісячний період роботи зведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати випробувань механічних властивостей холоднокатаного металу, відпаленого в середовищі сухого водню

Марка сталі	Всього вироб.	Незадов.	%	Задов. повторн.	%	Незад. повторн.	%	Незадов. всього	%
08КП	467	0	0	1	0,2	0	0	0	0
08КП	10	0	0	0	0	0	0	0	0
08КП	1	0	0	0	0	0	0	0	0
08КПЗ	2	0	0	0	0	0	0	0	0
08КПЗ	10	0	0	0	0	0	0	0	0
08ПС	6	0	0	0	0	0	0	0	0
08ПС	80	0	0	0	0	0	0	0	0
08ПС	11	0	0	0	0	0	0	0	0
08ПС	7	0	0	0	0	0	0	0	0
08ПС	2	0	0	0	0	0	0	0	0
08ПС	2	0	0	0	0	0	0	0	0
08ПСЗ	65	0	0	0	0	0	0	0	0
08ПСЗ	1	0	0	0	0	0	0	0	0
08ПСЗ	5	0	0	0	0	0	0	0	0
08ПСЗ	38	0	0	0	0	0	0	0	0
08Ю	17	1	5,9	0	0	0	0	1	5,9
08Ю	995	131	13,2	78	7,8	25	2,5	53	5,3
08Ю5	4	1	25	1	25	0	0	0	0
09Г2	4	0	0	0	0	0	0	0	0
10КП	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1ПС	7	0	0	0	0	0	0	0	0
1ПС	1	0	0	0	0	0	0	0	0
20СП	2	0	0	0	0	0	0	0	0
2ПС	5	0	0	0	0	0	0	0	0
2ПС5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3КП	2	0	0	0	0	0	0	0	0
3ПС	18	0	0	0	0	0	0	0	0
Всього:	1764	133	7,5	80	4,5	25	1,4	53	3

Як видно з таблиці, виробуваний метал 1764 партій холоднокатаної листової і рулонної сталі: у тому числі 08кп, пс - 707 партій, 1-3 кп, пс - 36 партій, 08Ю - 999 партій. Механічні властивості холоднокатаного прокату із

сталей марок 08 кп, пс, 1-3 кп, пс повністю відповідають вимогам нормативної документації.

На сталі марки 08Ю рівень відповідності здатності до витяжки ОСВ склав 94,7 % (946 партій з 999), що вище, ніж на прокаті з цієї ж марки сталі, відпаленому за той же період часу в традиційних ковпакових печах ЦХП-1 з середовищем HNx-газу - 92,9 % (235 партій з 253, табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Результати випробувань механічних властивостей холоднокатаного металу, відпаленого в середовищі HNx- газу

Марка сталі	Всього партій, шт.	Незадов.		Задов. повторн.		Незад. повторн.па		Незадов. всього	
		партій, шт	%	партій, шт	%	ртій, шт	%	всього, шт	%
08Ю	253	71	28,1	53	20,9	41	16,2	18	7,1
08КП	1	0	0	0	0	0	0	0	0

При цьому кількість партій, властивості яких за результатами первинних випробувань задовольняли вимогам здатності до витяжки ВОСВ (вельми особливо складна витяжка), на металі, відпаленому в середовищі сухого водню, отримані також більшими, ніж на металі, відпаленому в традиційних ковпакових печах з атмосферою HNx - газу: відповідно 44,94 % і 32,02 % (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Кількість партій холоднокатаного металу сталі 08Ю, властивості яких задовольняли здатності до ВОСВ

Тип печі	Випробувано партій	Задовольняє ВОСВ	
		партій	%
З середовищем сухого водню	999	449	44,94
З середовищем HNx-газу	253	81	32,02

Дані про фактичний рівень значень механічних властивостей холоднокатаних сталей марок, 08Ю, 08кп/пс, 3кп/пс, відпалених у цей період у печах фірми «Ебнер» і в печах з HNx-газом наведені в табл. 3.5 - 3.8, порівняльний аналіз відхилень механічних властивостей зведено в табл. 3.9.

Таблиця 3.5 – Результати випробувань механічних властивостей холоднокатаної сталі марки 08Ю, відпаленої в середовищі сухого водню

Марка сталі	Товщина, мм	Глибина лунки по Еріксону, ІЕ, мм				Відносне подовження, δ_4 , %				Межа текучості, σ_T , кг/мм ²				Тимчасовий опір, σ_B , кг/мм ²			
		середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.	середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.	середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.	середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.
08Ю	0,50	9,67	9,40	9,90	0,145	38,8	34,0	43,0	1,96	18,96	15,00	20,00	0,903	30,17	26,00	35,00	0,928
	0,60	10,07	9,80	10,30	0,145												
	0,70	10,33	9,70	10,90	0,250												
	0,80	10,85	10,30	11,50	0,231												
	0,90	11,16	10,40	11,90	0,217												
	1,00	11,46	10,80	11,90	0,190												
	1,10	11,55	11,20	12,00	0,108												
	1,20	12,02	11,50	12,70	1,195												
	1,25	12,21	11,90	12,40	0,150												
	1,40	12,36	12,00	12,70	0,185												
	1,50	12,60	12,10	13,00	0,244												
	1,60	12,75	12,30	13,10	0,231												
	1,70	12,80	12,40	13,00	0,210												
	2,00	13,21	12,90	13,50	0,135	44,6	41,00	48,00	1,764								

Таблиця 3.6 – Результати випробувань механічних властивостей холоднокатаної сталі марки 08 кп/пс, відпаленої в середовищі сухого водню

Марка сталі	Товщина, мм	Глибина лунки по Еріксону, ІЕ, мм				Відносне подовження, δ_4 , %				Межа текучості, σ_T , кг/мм ²				Тимчасовий опір, σ_B , кг/мм ²			
		середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.	середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.	середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.	середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.
08 кп/пс	0,70	10,27	10,00	10,50	0,189	38,16	30,00	44,00	2,999	22,85	18,00	29,00	2,389	32,33	29,00	36,50	1,740
	0,80	10,56	10,00	11,00	0,298												
	0,90	10,69	10,00	11,10	0,371												
	1,00	11,33	11,00	11,50	0,192												
	1,20	11,78	11,50	12,20	0,248												
	2,00	12,67	12,60	12,70	0,047												

Таблиця 3.8 – Результати випробувань механічних властивостей холоднокатаної сталі марки 08 кп/пс, відпаленої в середовищі з HNx -газом

Марка сталі	Товщина, мм	Глибина лунки по Еріксону, ІЕ, мм				Відносне подовження, δ_4 , %				Межа текучості, σ_T , кг/мм ²				Тимчасовий опір, σ_B , кг/мм ²			
		середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.	середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.	середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.	середн.	мінім	максим	сер.кв. відхил.
08 кп/пс	0,50	9,67	9,10	10,00	0,403	30,00	40,00	35,25	3,70	24,42	15,00	34,50	2,96	33,85	29,00	40,00	2,10
	0,70	10,53	9,90	10,90	0,265	37,11	26,00	44,00	3,75								
	0,80	10,64	9,90	11,50	0,365												
	0,90	10,77	9,90	11,20	0,317												
	0,95	10,70	9,90	11,00	0,429												
	1,00	10,95	10,00	11,60	0,301												
	1,15	11,45	11,40	11,50	0,050												
	1,20	11,67	10,80	12,70	0,506												
	1,25	11,37	11,00	11,60	0,262												
	1,40	11,82	11,50	12,30	0,251												
	1,50	12,03	11,50	12,90	0,323												
	1,80	12,30	11,20	12,60	0,255	37,42	24,50	44,00	4,01								
2,00	12,55	11,90	13,10	0,135													

Таблиця 3.9 – Аналіз відхилень механічних властивостей відпаленого металу

Марка сталі	Випробувань, шт.	Відносне подовження, δ_4 , %		Межа текучості, σ_T , кг/мм ²		Тимчасовий опір, σ_B , кг/мм ²		Відношення σ_T/σ_B	Середнє відношення σ_T/σ_B
		середн.	сер.кв.відх.	середн.	сер.кв.відх..	середн.	сер.кв.відх.		
Метал, відпалений в печах з водневим середовищем									
08Ю	862	41,61	2,119	18,96	0,903	30,17	0,928	0,62	0,65
08 кп/пс/ ГОСТ 9045-93	51	38,16	2,999	21,85	2,389	32,33	1,740	0,67	
08кп/пс ГОСТ 16523-97	558	38,18	2,954	23,06	2,359	33,86	1,648	0,68	
Метал, відпалений в печах з HNx-газом									
08Ю	182	41,43	2,400	19,89	0,894	30,58	0,948	0,65	0,68
08кп/пс ГОСТ 9045-93	220	37,60	3,256	24,20	2,755	33,70	1,937	0,7	
08кп/пс ГОСТ 16523-97	7663	36,32	3,163	25,46	2,391	35,36	1,633	0,7	

Дані цих таблиць також підтверджують високий рівень і стабільність властивостей металу, відпаленого у печах з водневим захисним середовищем. Так, на сталі марки 08Ю середні значення найважливішої характеристики - межі текучості σ_T , отримані нижчими, ніж після відпалу в печах з атмосферою HNx -газу (середнє значення σ_T на металі після відпалу в печах з водневим середовищем становить $18,96 \text{ кг/мм}^2$ проти $19,09 \text{ кг/мм}^2$, отриманих на металі, відпаленому в печах з атмосферою HNx -газу), що свідчить про більшу здатність сталі, відпаленої в середовищі сухого водню до штампування.

Аналіз значень характеристик механічних властивостей на сталі марок 08кп/пс показує, що значення характеристик міцності металу, відпаленого у водневому захисному середовищі також на $(1...2) \text{ кг/мм}^2$ нижче, ніж після відпалу аналогічного металу в печах з атмосферою HNx -газу, і при цьому, як правило, мають менший розкид значень характеристик, про що свідчать більш низькі значення середніх квадратичних відхилень кожної з характеристик механічних властивостей.

Пластичні характеристики (відносне подовження δ_4) на металі, який був відпалений в печах з водневим захистом, на $(1...2) \%$ вище значень, отриманих на металі, відпаленому в печах з середовищем HNx -газу, при менших значеннях їх середніх квадратичних відхилень.

Відношення межі текучості до тимчасового опору, яке є показником здатності листової сталі до глибокої витяжки, не перевищує нормоване значення - $0,7$, але показники при відпалі металу в печах з водневим середовищем значно нижчі, ніж при відпалі в азотному середовищі (середнє значення при відпалі в водневих печах - $0,65$, а в азотних - $0,68$). Отже, сталь, відпалена в печах з водневим захисним середовищем має більші можливості для глибокої витяжки, ніж сталь, відпалена в середовищі HNx -газу.

Аналіз продуктивності печей.

Продуктивність ковпакових печей розраховують для одного нагрівального ковпака, до одного стенду або до 1 м^2 площі відділення

відпалу. Продуктивність, віднесена до нагрівального ковпака, дорівнює відношенню маси садки до повного (включаючи витримку) часу нагрівання. Цей показник характеризує тільки одну частину циклу відпалу (період нагрівання-витримка) і зовсім не враховує ступінь використання стендів, не дозволяє врахувати впливу всіх істотних факторів і часто призводить до неправильної організації роботи відділення.

Для сучасних відділень відпалу, в яких є можливість встановити нагрівальний ковпак на будь-якому стенді, слід розглядати продуктивність, віднесену до одного стенду і рівну відношенню маси садки до повної тривалості циклу відпалу, т/год:

$$П = М / \tau,$$

де М – маса садки металу, т ;

τ – повна тривалість циклу відпалу, год.

Досягнення високого ступеня заповнення печі в результаті збільшення висоти стопи рулонів, однорідних за розмірами, теплофізичними властивостями і якістю металу, завжди призводить майже до пропорційного збільшення продуктивності, так як маса садки стає більшою, а тривалість циклу відпалу не змінюється.

Підвищення ступеня заповнення печі в результаті збільшення зовнішнього діаметра всіх рулонів садки зазвичай призводить до підвищення продуктивності, так як тривалість відпалу при цьому зростає в більшості випадків у меншій мірі, ніж маса садки.

Розрахована продуктивність печей з водневим захистом для різних садок (35...55) т марки сталі 08Ю зведена в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 - Аналіз розрахункових тривалості та продуктивності роботи печей з водневим захистом при відпалі холоднокатаних рулонів сталі 08Ю

Висота рулону, мм	Кількість рулонів, шт	Розрахункові параметри																	
		55 т			52 т			50 т			45 т			40 т			35 т		
		Вага одного рулону, т	Тривалість відпалу, год	Продуктивність, т/год	Вага одного рулону, т	Тривалість відпалу, год	Продуктивність, т/год	Вага одного рулону, т	Тривалість відпалу, год	Продуктивність, т/год	Вага одного рулону, т	Тривалість відпалу, год	Продуктивність, т/год	Вага одного рулону, т	Тривалість відпалу, год	Продуктивність, т/год	Вага одного рулону, т	Тривалість відпалу, год	Продуктивність, т/год
1000	5	11,0	43,9	1,25	10,40	43,2	1,20	10,0	44,0	1,14	9,0	42,7	1,05	8,0	41,5	0,96	7,0	40,0	0,88
1100	4	13,75	46,7	1,17	13,0	45,8	1,14	12,5	45,2	1,11	11,3	45,2	1,0	10,0	43,0	0,96	8,75	42,1	0,83
1250	4	13,75	46,6	1,18	13,0	45,7	1,14	12,5	46,9	1,07	11,3	45,1	1,0	10,0	43,7	0,93	8,75	42,8	0,84

Значення даних таблиці свідчать, що можливість одержати найбільшу продуктивність печей при відпалі холоднокатаної сталі 08Ю (яка завжди має значно довший період циклу відпалу), можливо отримати при заповненні печі рулонами висотою 1000 мм в кількості 5шт.

Заповнення печей (середня вага садки металу), середня тривалість відпалу та продуктивність печей з водневим та азотним середовищем за період роботи з 2015 по 2021 р. зведено в табл. 3.11.

Таблиця 3.11 – Порівняльний аналіз середніх даних продуктивності ковпакових печей з водневим та азотним середовищем

Рік	Печі з водневим середовищем			Печі з азотним середовищем		
	середня вага садки , т	середня тривалість відпалу, год	середня продуктивність, т/год	середня вага садки , т	середня тривалість відпалу, год	середня продуктивність, т/год
2015	45,0	38,7	1,172	44,2	72,1	0,612
2016	47,8	36,6	1,312	45,2	74,9	0,603
2017	47,4	34,3	1,384	45,6	75,9	0,600
2018	49,4	33,7	1,473	46,8	78,1	0,600
2019	48,7	33,1	1,474	46,4	77,9	0,596
2020	46,7	33,9	1,414	46,1	77,8	0,592
2021	48,7	34,4	1,457	47,2	78,3	0,602
Всього	47,7	35,0	1,384	45,9	76,4	0,601

Отже, середня продуктивність висококонвективних ковпакових печей HICON/H_2 з водневим захисним середовищем в 2,3 рази перевищує середню продуктивність традиційних печей з азотним захисним середовищем, середня тривалість відпалу в 2,2 рази менша.

Аналіз продуктивності печей зображено на рис. 3.1.

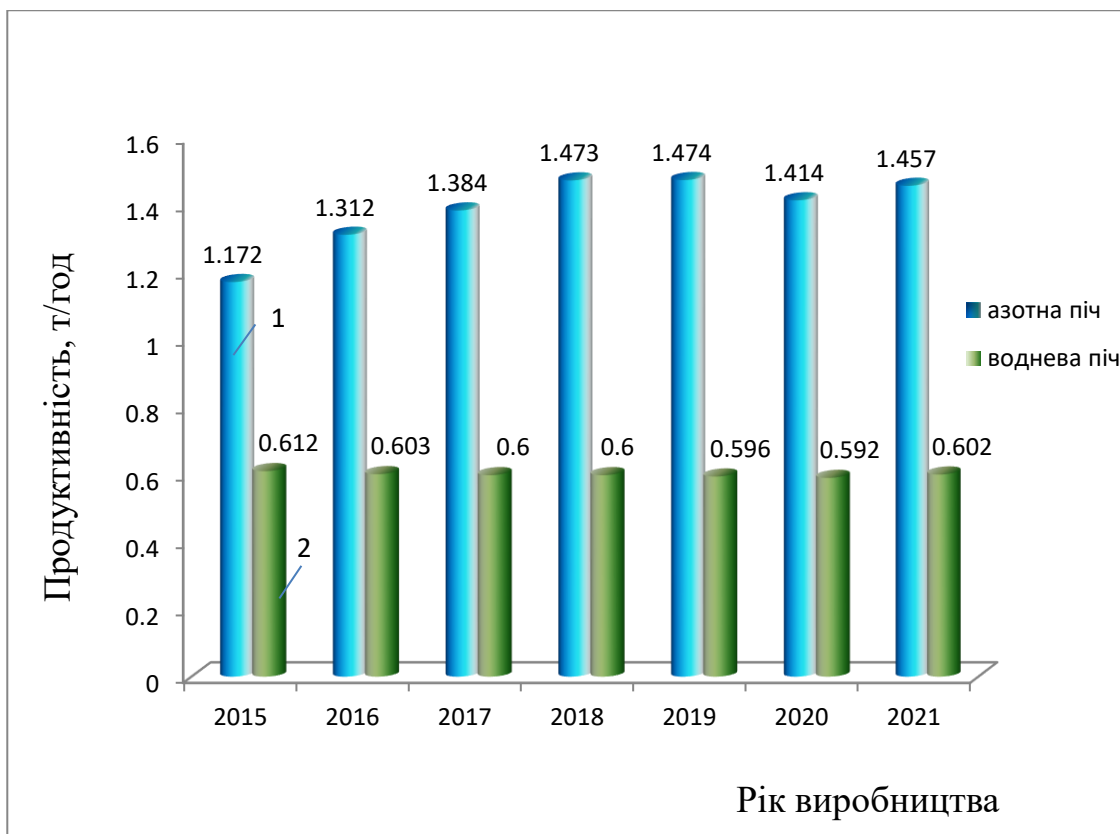


Рисунок 3.1 – Продуктивність печей з водневим та азотним захисним середовищем з 2015 по 2021 р.

Виконання запланованих обсягів виробництва печей з водневим та азотним захисним середовищем зведено в табл. 3.12 та зображено на рис. 3.2.

Таблиця 3.12 – Виконання запланованих обсягів виробництва ковпакових печей з водневим та азотним захисним середовищем

Рік	Печі фірми "Ебнер"			Печі з HN_x газом		
	виробництво, т		%	виробництво, т		%
	план	факт		план	факт	
2015	156920	165423	106,3	892298	889433	97,8
2016	152360	164554	108,2	770920	760631	95,8
2017	188690	198658	105,3	683930	633379	92,6
2018	183740	185379	100,9	597560	572565	98,7
2019	180610	180670	103,2	652780	638520	99,7
2020	185490	188750	101,8	635730	611573	95,3

З таблиці видно, що заплановані обсяги виробництва для печей з водневим захисним середовищем з 2015 по 2021 р. виконувалися більш як на 100 % (100,9 – 108,2 %, середній показник – 104 %), в той час як в печах з азотним середовищем за цей же період 100 % виконання плану не відмічалось (середній показник – 96 %).

При проведенні аналізу витрат природного газу для відпалу металу в ковпакових печах з водневим та азотним захисним середовищем встановлено, що питомі витрати при відпалі в середовищі H_Nx-газу значно перевищують витрати при відпалі металу в середовищі сухого водню.

Так, з 2015 р. по 2021 р. питома витрата природного газу в печах з водневим захистом складала (18,57...19,3) кг/т (середнє значення - 19,01 кг/т), а в печах з H_Nx-газом –(30,5... 32,4) кг/т (середнє значення - 31,2 кг/т).

Витрати природного газу, захисного газу, водню та азоту зведено в табл. 3.13. Аналіз витрат природного газу зображено на рис. 3.2.

Таблиця 3.13 - Аналіз витрат природного та технологічних газів при відпалі в печах з водневим та азотним середовищем

Рік	Печі з водневим середовищем			Печі з азотним середовищем	
	природний газ, м ³ /т	азот, м ³ /т	водень, м ³ /т	природний газ, м ³ /т	захисний газ, м ³ /т
2015	19,3	3,34	6,0	32,4	21,0
2016	19,0	2,70	5,4	31,3	18,5
2017	19,2	2,6	5,4	31,5	17,1
2018	18,57	2,57	4,9	30,8	18,1
2019	18,6	2,60	5,0	30,8	18,1
2020	19,2	2,60	5,1	31,3	19,4
2021	19,2	2,53	5,0	30,5	20,6
Всього	19,01	2,70	5,2	31,2	19,0

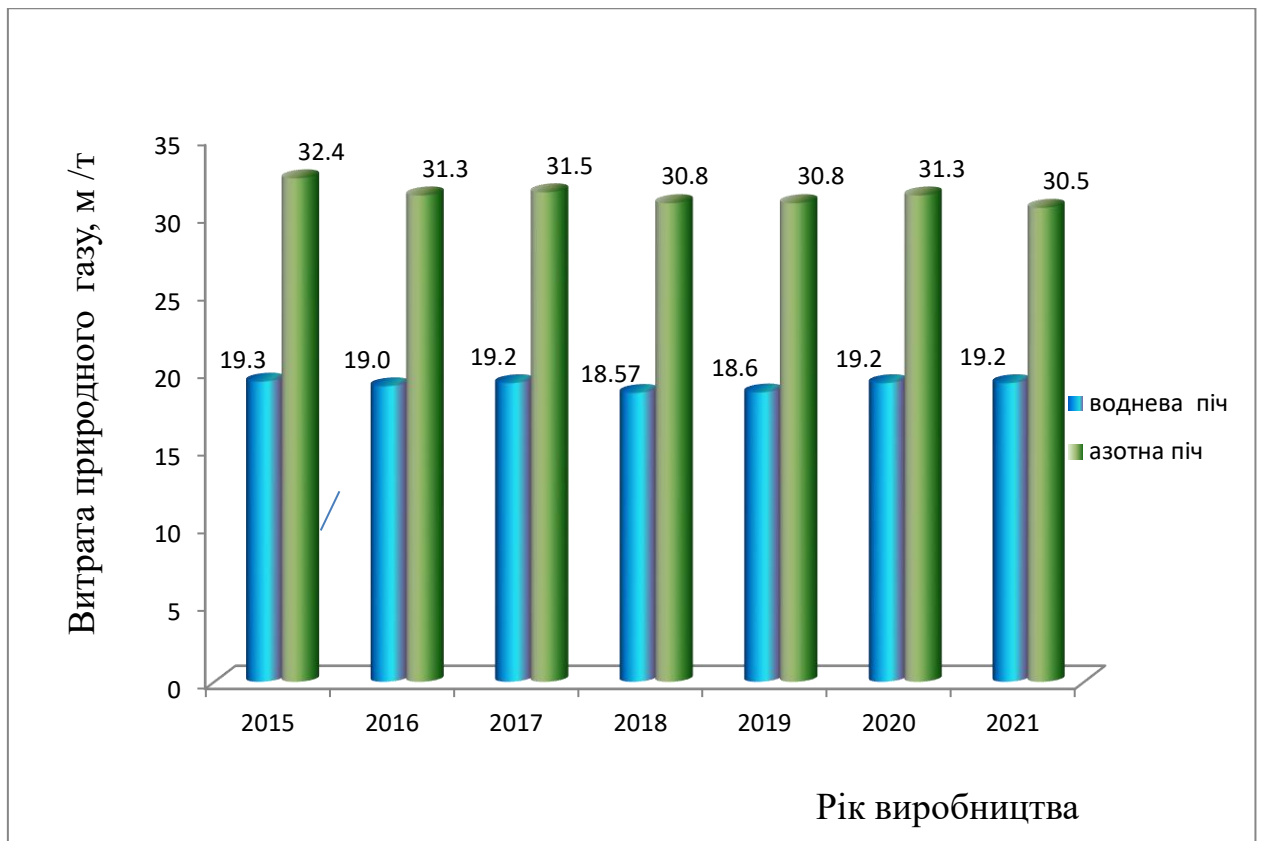


Рисунок 3.2 - Аналіз витрат природного газу з 2015 по 2021рр. в ковпакових печах з водневим та азотним захистом

З таблиці та рисунку видно, що витрати природного газу в печах з азотним захистом перевищують витрати в печах з водневим захистом (в 1,6 разів), витрати технологічних газів в середовищі HN_x -газу також значно перевищують показники витрат при відпалі в печах NICON/H_2 .

Аналіз наявності дефектів «кольори мінливості» і «сажа» на поверхні відпаленого металу за період промислової експлуатації ковпакових печей з атмосферою сухого водню показав, що випадків отримання металу з такими дефектами не зафіксовано, проти сформованого в даний час рівня відсортування приблизно до 0,1 % за «кольорами мінливості» в знижену групу поверхні після відпалу в печах з атмосферою HN_x -газу.

Аналіз дефекту «злам» на поверхні смуг металу, відпаленого у печах з воднем середовищем показав, що під час проведення пуско-налагоджувальних робіт і при проведенні гарантійних відпалів реєструвалися

випадки отримання злипання - зварювання (і як наслідок зламів) поверхні смуг, відпалених за режимами, запропонованим фірмою «Ебнер». При розробці комбінатом "Запоріжсталь" нових режимів відпалу для промислової експлуатації печей в умовах обладнання та технології ЦХП-1 в них були передбачені заходи по максимальному зниженню можливості отримання цього дефекту. Зокрема, для металу більш тонких профілів встановлені більш низькі температури кромки (670...680) °С і ядра (650...670) °С при витримці, передбачені уповільнене охолодження садки під нагрівальним ковпаком у перший період після закінчення витримки, обережні режими повітряного охолодження під охолоджувальним ковпаком і знижені (до 300 °С) температури включення водяного охолодження поверхні муфеля. Аналіз результатів відпалу металу за розробленими комбінатом "Запоріжсталь" режимам у ковпакових печах з водневим середовищем, показав високу ефективність цих режимів в отриманні комплексу необхідних властивостей відпаленого металу поряд із забезпеченням низького рівня злипання - зварювання металу при відпалі. Разом з тим, можливе додаткове зменшення ймовірності злипання - зварювання смуг при відпалі за рахунок зменшення різниці температур («температурних перекосів») між більш швидко охолодженими зовнішніми витками рулонів і більш повільно - внутрішніми. Таке зменшення може бути забезпечено, в першу чергу на металі більш тонких (0,7...0,8) мм, профілів, наприклад, введенням більш низьких температур початку водяного охолодження поверхні муфеля, завданням більшого числа обертів стендового вентилятора для забезпечення повітряного охолодження. Проте слід мати на увазі, що таке коригування режимів пов'язане із збільшенням тривалості термообробки і, відповідно зниженням продуктивності роботи печей.

Аналіз забрудненості поверхні смуг холоднокатаного металу вуглецем показав, що середньозважені значення забрудненості при відпалі в середовищі сухого водню - 4,65 і 5,73 мг/м², що не перевищує вимог, які пред'являються на сучасному етапі до поверхні металу для покриттів - не

більше (7...8) мг/м². При проведенні оцінки забрудненості смуг металу, відпалених в традиційних печах з атмосферою HNx-газу, встановлено більш високе середньозважене значення - 18,4 мг/м², що перевищує допустиме в 2,3 рази. Аналіз забрудненості металу зведено в табл. 3.14.

Таблиця 3.14 - Аналіз показників забрудненості поверхні металу, відпаленого в печах з водневим та азотним захистом

Марка сталі	Забрудненість металу вуглецем, мг/м ²					
	метал, відпалений в печах HICON/H ₂			метал, відпалений в печах з HNx-газом		
	макс.	мін.	середн.	макс.	мін.	серед.
08Ю	0,80	11,70	4,65			
08пс	2,3	18,1	5,73	6,0	22,7	18,4

Ці дані підтверджуються і при проведенні аналізу забрудненості поверхні металу, відпаленого у печах фірми «Ебнер» в умовах вироблення зниженого обсягу водню на станції захисного газу і одночасному збільшенні його разового споживання на ковпакових печах фірми «Ебнер» при накладенні декількох відпалів із заданою витратою водню 5 м³/год і більше, що призводить до передбаченої системою автоматичного керування процесом так званої «тактової» подачі H₂/N₂ (періодичному частковому заміщенні водню азотом). Аналіз показав, що забрудненість металу з відпалів з «тактовою» подачею H₂/N₂ вище, ніж при відпалі в атмосфері тільки сухого водню, середній рівень забрудненості вуглецем до дресування - 8,23 мг/м² і 6,48 мг/м², після дресування - 6,43 мг/м² і 5,12 мг/м² відповідно для відпалів з тактовою подачею H₂/N₂ і при відпалі в атмосфері тільки сухого водню.

Більш висока якість поверхні після відпалу в атмосфері сухого водню підтверджена також практикою освоєння агрегату поздовжнього різання № 5 ЦХП-1, де на металі, відпаленому в середовищі сухого водню, забезпечується краще, порівняно з металом, відпаленим в середовищі HNx-газу, електростатичне промаслювання смуги.

Слід також взяти до уваги представлену на адресу комбінату інформацію ряду споживачів, що застосування прокату, відпаленого в середовищі сухого водню, при виготовленні виробів з покриттями поверхні, не викликає труднощів при підготовці поверхні і забезпечує високу якість покриттів.

Отже, досвід впровадження технології відпалу холоднокатаної рулонної сталі в висококонвективних печах з середовищем сухого водню показав високу якість відпаленого металу і значно вищі, в порівнянні з печами з середовищем H_2 -газу, показники продуктивності та економічності роботи.

ВИСНОВКИ

1. Доцільність застосування сухого водню в якості захисного середовища замість традиційного азото-водневого з HN_x -газу (95% азоту і 5% водню) обумовлена високою теплопровідністю водню, яка більша, ніж у сім разів вище. Розраховані еквівалентні коефіцієнти теплопровідності рулону сталі при використанні водню в 2...3 рази перевищують значення еквівалентних коефіцієнтів теплопровідності при використанні азоту.
2. При відпалі в печах з водневим захисним середовищем загальна тривалість циклу термообробки в середньому становить – 35 годин, проти – 77 годин при відпалі у печах із захисним середовищем HN_x -газу.
3. Середня годинна продуктивність стану на печах з водневим захистом складає 1,384 т/год, питома витрата природного газу 19,01 кг/т, що значно перевищує аналогічні показники на печах з середовищем HN_x -газу: відповідно 0,601 т/год і 31,2 кг/т.
4. Про більшу здатність сталі, відпаленої в середовищі сухого водню, до штампування свідчать нижчі показники межі текучості σ_T (середнє значення σ_T на металі після відпалу в печах з водневим середовищем становить 18,96 кг/мм² проти 19,09 кг/мм², отриманих на металі, відпаленому в печах з середовищем HN_x -газу).
5. Середньозважені значення забрудненості металу при відпалі в середовищі сухого водню - 4,65 мг/м², а при відпалі в традиційних печах - 18,4 мг/м² (що перевищує допустиме в 2,3 рази).
6. Отже, воднева технологія відпалу холоднокатаної рулонної сталі має значні переваги над азотною, показує високу якість відпаленого металу і значно вищі, в порівнянні з печами з середовищем HN_x -газу, показники продуктивності та економічності роботи, що обґрунтовує

доцільність заміни традиційних ковпакових печей на ковпакові печі з середовищем сухого водню задля підвищення їх енергоефективності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гусовский В.А., Усачев А.Б., Ладыгичев Е.М. Современные термические и нагревательные печи - М: Metallurgy, 2001 - 425с.
2. Технологическая инструкция ТИ 226-П.ХЛ1-51-2010 Термическая обработка металла в цехе холодной прокатки №1 в высококонвективных колпаковых печах HICON/H₂ фирмы «Эбнер» - Запорожье, 2010 – 72с.
3. Технологическая инструкция ТИ 226-П.ХЛ1-04-11 Термическая обработка металла в одностопных колпаковых печах с защитной атмосферой HNx газа в цехе холодной прокатки №1 - Запорожье, 2011 – 80с.
4. Технологическая инструкция ТИ 226-Э-2012 Производство защитного газа: очистка азота и производство водорода для термических печей блока №14 ЦХП-1 - Запорожье, 2012 – 21с.
5. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах : монография. Донецк : Ноулидж, 2012. 247 с.
6. Барішенко О. М., Ревун М. П. Актуальні енергозберігаючі методи роботи нагрівальних печей : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 138 с.
7. Ерёмин А. О. Современные способы отопления нагревательных печей. *Металлургическая теплотехника* (Сб.научн. трудов НМетАУ). Днепропетровск : Новая идеология, 2008. С. 139 – 151.
8. Пилипенко Р. А. Интенсификация тепловой работы камерных печей, отапливаемых природным газом. *Металлургическая теплотехника* (Сб. науч. трудов НМетАУ). Днепропетровск: НМетАУ, 2002. Т.8. С.99-105.
9. Soroka B. Fuel Furnaces in the problem of enhancement the process of heat- and mass transfer. In: V Minsk Intern. Heat & Mass transfer Forum Proceedings. – section 9 “Thermophysics and Thermal Engineering of Metallurgical Process”. 2004. №3 . 35p.
10. Soroka B., Zgurskiy V. Updating the modern techniques of radiative heat transfer calculation within fuel furnaces and boilers. *WSEAS transactions on heat and mass transfer*. 2014. № 9. P. 205-220.

11. Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е. Методики расчета нагревательных и термических печей : учеб. пособ. Москва : Теплотехник, 2004. 400 с.
12. Зінченко В. Ю., Іванов В. І., Чепрасов О. І., Каюков Ю. М. Аналіз сучасного стану оптимізації теплової роботи нагрівальних печей камерного типу. *Металургія*. 2016. Вип. 2. С. 93-97.
13. Губинский В. И. Нагревательные печи металлургии - сегодня и завтра. Теория и практика металлургии. 2004. № 6. С. 56-60.
14. Свинолобов Н. П. Печи черной металлургии : учеб. пособ. для вузов. Днепропетровск : Пороги, 2004. 154 с.
15. Теплотехника металлургического производства : учеб. пособ. для вузов / под общ. ред. : В. А. Кривандина, В. В. Белоусова, Г.С. Сборщикова и др. В 2 т. Т. 2. Конструкция и работа печей : МИСИС, 2001. 736 с.
16. Губинский В. И. Металлургические печи : учеб. пособие. Днепропетровск : НМетАУ, 2006. 85 с.
17. Нафтогаз група. Обсяги використання газу : веб сайт. URL: [- 18. V. O. Gabrinets, I. V. Tytarenko, G. L. Gnatiuk. Substantiation of the further implementation of heat pump and heat storage technology into the energy of industry and utilities. *Providing energy-saving technologies: technical, ecological and economic aspects* : collective monograph. New York : USA : Yunona Publishing , 2019. P. 53-60.
- 19. Арутюнов В. А., Ибадуллаев Т. Б. Развитие методов математического моделирования теплофизических процессов в топливных промышленных печах. *Металлург*. 2011. № 1. С. 33–36.
- 20. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. Под ред. В.М. Тымчака, В.Л. Гусовского. М: Металлургия, 1993 - 481с.
- 21. Расчеты нагревательных печей Аверин С.И., Гольдфарб Э.М., Кравцов А.Ф. и др. 2-е изд. - Киев: Техника, 1969 - 540 с.](https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/8B3289E9F4B2CF50C2257F7F0054EA23?OpenDocument&Expand=7&)

22. Сибирь А. В., Решетняк С. И., Романько Я. В. Применение современных методов моделирования для расчета тепловой работы топливных нагревательных печей. *Теплотехника и энергетика в металлургии*. Днепропетровск, 2008. С. 204–20