

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

На правах рукопису

Шперний Олександр Васильович

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ПЕЧЕЙ СТРУМЕНЕВОГО ТИПУ
ДЛЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРІВУ МЕТАЛУ

Спеціальність 05.16.02 - "Металургія чорних металів"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ 1994

AB 30.978

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі "Теплотехніка та гідравліка"
Запорізького державного технічного університету

ЛНБ України ім. В. Стефаніка
00777734 (Z)

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор П. Г. КРАСНОКУТСЬКИЙ

Офіційні опоненти:
доктор технічних наук, професор В. Й. ГУБИНСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент В. С. БАЗДИРЄВ

Провідна установа:
Електрометалургійний завод "Дніпроспецсталь"
ім. О. М. Кузьміна, м. Запоріжжя

Захист відбудеться « 25 » жовтня 1994 року о 12³⁰ годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради К 068.02.01
при Державній металургійній академії України
за адресою: 320635, м. Дніпропетровськ, проспект Гагаріна, 4

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотечі
Державної металургійної академії України.

Автореферат розіслано « 12 » вересня 1994 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук,
доцент

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Ю. С. ПАНОТОВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Задачі підвищення продуктивності нагрівальних печей, зменшення їх розмірів та матеріалоемкості, підвищення економічності та екологічної чистоти, рівня механізації та автоматизації, а також якості готової металопродукції відносяться до числа важливіших у сучасній металургійній та машинобудівній теплотехніці.

Особливо загострені означені проблеми в застосуванні до нагрівальних пристроїв ковальсько-штампувального виробництва, і в першу чергу - до печей для низькотемпературного нагріву довгомірних штанг перед різкою на мірні заготовки. Такі печі, в котрих здійснюється нагрів сталей діаметром більш (0,04-0,05)м, щоб уникнути утворення під час різання тріщин на торцях заготовок, підвищення надійності прес-ножиць та довговічності ріжущого інструменту, надзвичайно широко розповсюджені в промисловості, але в наш час надто недосконалені. Зважаючи на те, що низькотемпературному нагріву підлягає більша частина заготовок, що використовуються в машинобудуванні, суттєво підвищити техніко-економічні показники роботи устаткування в ковальському виробництві без радикального вдосконалення печей для нагріву штанг під різку практично неможливо.

Одним з найбільш перспективних методів вирішення перелічених вище задач є струменевий нагрів, дозволяючий при оптимальних умовах в 3-5 разів підвищити інтенсивність тепловіддачі до заготовок в порівнянні з обтіканням уздовж їх поверхонь. Висока інтенсивність теплообміну, просте та гнучке керування цим процесом, можливість інтенсифікувати тепловіддачу тільки на окремих ділянках заготовки або тільки на протязі заданих проміжок часу - все це забезпечує переваги вказаного методу перед іншими засобами інтенсифікації нагріву металу в печах машинобудівної та металургійної промисловості. Метод, який розглядається, вдало пройшов апробацію у високотемпературних нагрівальних пристроях ковальського та прокатного виробництва, але для ефективного використання його в печах низькотемпературного нагріву заготовок необхідно продовжити та розширити дослідження закономірностей конвективної тепловіддачі системи струменів до циліндричної поверхні в стислому просторі, узагальнення одержаних результатів у вигляді інженерних методик визначення оптимальних конструктивних параметрів системи "сопло-заготовка-камера" та розрахунку конвективного теплообміну в печі, а також розробку конструкцій печей та раціональних режимів низькотемпературного нагріву заготовок різноманітних діаметрів та марок сталі з

допустимою інтенсивністю та з врахуванням охолодження металу на ділянці піч - прес-ножиці.

Розв'язанню вказаних питань і присвячена дана дисертаційна робота, яку у зв'язку з вищевикладеним, слід визначити актуальною та представляючою науковий та практичний інтерес.

Мета роботи. Дослідження та розробка печей струменевого типу для низькотемпературного нагріву довгомірних заготовок під різку на базі вивчення закономірностей конвективного теплообміну системи осесиметричних струменів з циліндричною поверхнею в стислому просторі та розрахунків раціональних режимів нагріву металу з допустимою інтенсивністю та з врахуванням його охолодження на ділянці піч-прес-ножиці.

Наукова новизна та основні положення, які винесено на захист.

Вивчено закономірності конвективного теплообміну в камері печі з боковим опаленням при набіганні системи швидкісних осесиметричних струменів на циліндричну поверхню. Визначено оптимальні геометричні параметри камери та струменевої системи, при яких забезпечуються максимальні інтенсивність, рівномірність та ефективність тепловіддачі до нагріваної заготовки та до кладки печі. Одержані результати узагальнені кримінальними рівняннями для розрахунків конвективного теплообміну в камері при розробці нагрівальних пристроїв струменевого типу.

На підставі розв'язання сполученої задачі внутрішнього теплообміну з задачею термопружності за методом, розробленим П.Г.Краснокутським та В.А.Кривандіним, визначено допустиму інтенсивність нагріву довгомірних циліндричних заготовок різноманітних діаметрів та марок сталі під різку.

Запропоновано та розраховано режими низькотемпературного нагріву заготовок з допустимою інтенсивністю та з врахуванням охолодження металу на ділянці піч - прес-ножиці.

Розроблено конструкцію проходної печі струменевого типу для низькотемпературного нагріву довгомірних циліндричних заготовок різноманітних діаметрів перед різкою на прес-ножицях.

Практична цінність. Використання результатів, одержаних в цій роботі, дозволяє:

- значно збільшити продуктивність та ККД печей для низькотемпературного нагріву внаслідок підвищення інтенсивності тепловіддачі до поверхні заготовок;

- скоротити втрати металу з окалиною та браком;

- покращити якість готової металопродукції за рахунок збільшення

рівномірності нагріву заготовок, збереження дрібнозернистої структури сталі внаслідок інтенсифікації нагріву, за рахунок підвищення пластичності металу та зменшення кількості окалини на його поверхні;

- значно знизити питомі витрати пального;
- збільшити надійність та довговічність ріжучого інструменту та устаткування за рахунок рівномірного, стабільного нагріву металу до оптимальних температур різки;
- визволити значні виробничі площі;
- підвищити рівень механізації та автоматизації процесів нагріву та різки заготовок.

Реалізація результатів роботи. На підставі результатів експериментальних та розрахунково-теоретичних досліджень запропоновано технічні рішення, які реалізовано в конструкції проходної печі струменевого типу для низькотемпературного нагріву довгомірних циліндричних заготовок, новизну якої захищено авторським свідоцтвом про винахід, та в режимах нагріву металу в ній з допустимою інтенсивністю та з врахуванням охолодження заготовок на ділянці піч - прес-ножиці.

Розроблену конструкцію печі та режими нагріву металу впроваджено в ковальському цеху ЗВО "Моторостроитель". Річний економічний ефект від впровадження складає 78,4 тис.крб.в цінах 1989 року.

Достовірність результатів. Всі основні наукові висновки та рекомендації достатньо переконливо обгрунтовані та підтверджені експериментальними даними, заплученими в лабораторних та промислових дослідженнях, а також результатами розрахунків, виконаних на БМ.

Апробація роботи. Основні результати наукових досліджень та розробок докладено та обговорено на Всесоюзних та Республіканських науково-технічних конференціях: "Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в черной металлургии" (Дніпропетровськ, 1989), "Теплотехническое обеспечение технологических процессов металлургии" (Свердловськ, 1990), "Проблемы энергосбережения" (Київ, 1991), "Научно-технические проблемы энергомашиностроения и пути их решения" (Санкт-Петербург, 1992).

Публікації. По матеріалах дисертації опубліковано 12 наукових робіт, в тому числі 1 авторське свідоцтво про винахід.

Структура та об'єм роботи. Дисертація загальним об'ємом у 231 сторінку скласться з вступу, чотирьох глав, заключення, бібліографічного списку з 256 найменувань, 2 додатків на 7 сторінках та містить 172 машинописних сторінки основного тексту, 49 малюнків та 3 таблиці.

ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ присвячено обґрунтуванню актуальності даної дисертації, формулюванню проблеми, яка в ній розглядається, визначенню засобу її вирішення, напрямків виконаних досліджень та розробок, а також викладенню основних наукових положень та підсумків їх практичного використання, які винесено на захист.

Стан вопросу. Мета та задачі досліджень. Перша глава присвячена аналізу сучасного стану поставленої проблеми в її найбільш важливих аспектах: дослідження конвективної тепловіддачі струменів до циліндричних та плоских поверхонь, конструкції печей та режими низькотемпературного нагріву металу.

Вивчення закономірностей конвективного теплообміну при набіганні струменів на поверхню різноманітних перепон було об'єктом надзвичайно численних робіт, виконаних вітчизняними та зарубіжними дослідниками. Найбільш значний вклад в цю галузь знань внесено В.М.Тимофеевим, Б.М.Юдаєвим та В.К.Савіним, В.І.Міткalinним, С.П.Дибаном та О.І.Мазуром, К.Перрі, Р.Гардоном та Дж.Акфіратом, а також їх учнями та послідовниками.

Внаслідок того, що конвективний теплообмін струменя з перпоною відбувається в надто складному гідродинамічному оточенні, виконати навіть напівемпіричний опис цього процесу вдається тільки для елементарних випадків, і тільки із значними припущеннями, які значно знижують достовірність одержаних результатів та роблять їх малопридатними для практичних розрахунків. Тому найбільш точні кількісні характеристики конвективної тепловіддачі струменів на сьогоднішній день можуть бути одержані лише експериментальними методами, і найчастіше у відомих публікаціях викладено результати саме таких досліджень.

Знайомство з широким експериментальним матеріалом, дає підставу для стверджень про те, що в наш час детально вивчено вплив практично всіх геометричних та режимних параметрів струменевих систем в різноманітних діапазонах на інтенсивність, рівномірність та ефективність конвективної тепловіддачі до поверхні перепони. При цьому, однак, було встановлено, що параметри струменевих систем чинять суттєвий вплив одне на одного. У зв'язку з цим розробка нагрівальних пристроїв струменевого типу та розрахунки теплообміну в їх камері повинні опиратися на достовірні експериментальні дані, які відображають в заданому діапазоні вплив всієї сукупності параметрів, визначаючих характеристики конвективної тепловіддачі в печі. Відома науково-технічна література

до виконання даної дисертаційної роботи таких експериментальних даних для розв'язання поставленої проблеми не містила. Найбільш близькі до них були результати досліджень, проведених в Запорізькому машинобудівному інституті, але вони були одержані не для систем, а для поодиноких струменів і, до того ж, тільки в умовах печей зі сводовим розташуванням пальників. Тому для розробки печей низькотемпературного нагріву металу потрібно було виконати дослідження конвективного теплообміну системи осесиметричних струменів з циліндричною поверхнею та кладкою в камерах нагрівальних пристроїв з боковим опаленням, які надають більш широкі можливості до керуванню нагрівом металу.

Вивчення вкрай незначного числа літературних джерел, в яких розглянуто конструкції печей для низькотемпературного нагріву заготовок під різку та їх технічні характеристики, свідчить про те, що печі даного технологічного призначення з преобладаючим радіаційним теплообміном в камері не задовольняють сучасним вимогам по інтенсивності, рівномірності нагріву та відрізняються занадто високою тепловою інерційністю, яка перешкоджає керуванню цим процесом. Ряд циклонно-вихрових печей, розроблених фірмою "Брітіш гез" та ВНДІПромгазом, а також дослідно-промисловий зразок нагрівального пристрою струменевого типу, створений у ВНДПІТеплопроекті, більш продуктивні, менш інерційні, але працюють вони в камерному режимі, внаслідок чого не забезпечують стабільності температур металу під час різки, що призводить до перегрузок та передчасного зносу ріжучого устаткування та інструменту. Проходна піч струменевого типу для нагріву штаби під рубку, котру спільно розробили ВНДІПромгаз та ВГК ГАЗ, найбільш повно задовольняє всім вимогам, які пред'являються до таких нагрівальних пристроїв, але її суттєвим недоліком є розташування пальників у своді. Це значно збільшує довжину печі та обмежує її можливості по керуванню нагрівом металу в порівнянні з нагрівальними пристроями з боковим опаленням. Враховуючи вищевикладене, були поставлені задачі розробки конструкції проходної печі струменевого типу з боковим розташуванням пальників для низькотемпературного нагріву циліндричних заготовок різноманітних діаметрів та промислових випробувань її теплової роботи.

У відомій науково-технічній літературі будь-які матеріали про режими низькотемпературного нагріву заготовок до останнього часу були відсутні. Разом з тим безперечним було те, що такі режими для найбільшого підвищення продуктивності печей, які розглядаються, повинні розроблятися, виходячи з гранично допустимої інтенсивності нагріву

металу. Найбільш точно і ефективно ця задача може бути розв'язана з використанням розрахунково-теоретичного методу, запропонованого та розвинутого П.Г.Краснокутським та В.А.Кривандіним. Тому в даній дисертації поставлена мета на підставі саме цього методу розробити та реалізувати алгоритм визначення допустимої інтенсивності низькотемпературного нагріву довгомірних циліндричних заготовок, а потім, опираючись на одержані результати, сформулювати ідеї по вдосконаленню процесу, який розглядається, та виконати розрахунки раціональних режимів нагріву з допустимою інтенсивністю та з врахуванням охолодження заготовок на ділянці піч - прес-ножиці.

Дослідження конвективного теплообміну у стисломu просторі при набіганні системи осесиметричних струменів на циліндричну поверхню виконано за допомогою методу електрокалориметрії на експериментальній установці, яка включала камеру, систему повітропостачання, контрольно-вимірjувальну та регулюючу апаратуру. Головною частиною установки були спеціально розроблені електрокалориметри для визначення коефіцієнтів конвективної тепловіддачі до циліндричної заготовки та до кладки. Сумарна гранично допустима помилка експерименту не перевищувала $\pm 5,83\%$.

Під час проведення досліджень геометричні параметри камери варіювали в таких межах: діаметр заготовки $d/d_0=2-5$ (де d_0 - початковий діаметр струменя, м); крок між осями поряд розташованих струменів $s/d_0=4-12$; відстань від зрізу сопла до заготовки $x/d_0=2,33-7,60$ та від заготовки до поду $h/d_0=0-3,333$. Початкова швидкість повітряних струменів становила $\bar{w}_{30}=(1,17-9,41)м/с$ ($Re=4,41 \cdot 10^3-8,82 \cdot 10^4$), що відповідає швидкості витікання продуктів згоряння із сопел швидкісних газопальних пристроїв в діапазоні їх сталої роботи $\bar{w}_{г0}=(25-200)м/с$.

Заполучені експериментальні дані оброблено, представлено та проаналізовано у вигляді розподілень локальної тепловіддачі по поверхні циліндричної заготовки і кладки, а також графіків, ілюструючих вплив швидкості струменів та перелічених вище геометричних параметрів на інтенсивність теплообміну в критичній точці заготовки, середню тепловіддачу до неї та до кладки, а також на рівномірність тепловіддачі до циліндру і на ефективність конвективної тепловіддачі системи струменів до вказаних поверхонь. Середню тепловіддачу при цьому обчислювали як середньоінтегральну в межах кроку між осями поряд розташованих струменів, рівномірність тепловіддачі до заготовки визначали відношенням її середньої тепловіддачі до інтенсивності теплообміну в критичній точ-

ці, а ефективність тепловіддачі струменів при варіюванні геометричних параметрів оцінювали величинами теплосприймання поверхонь - відносними кількостями сприйнятого ними тепла.

На підставі аналізу експериментальних даних встановлено оптимальні значення геометричних параметрів системи "сопло-заготовка-камера", які забезпечують умови для досягнення високої інтенсивності та рівномірності тепловіддачі струменів не тільки до поверхні заготовки, але й до кладки печі при найбільш високій ефективності тепловіддачі в її камері. Високі показники конвективної тепловіддачі до кладки спричиняють підвищенню її температури, інтенсифікують радіаційний теплообмін в печі і, як наслідок, збільшують швидкість нагріву металу. Підвищення ефективності конвективної тепловіддачі (теплосприймання заготовки та кладки) призводить до зростання ефективності використання тепла в камері та рівнозначно підвищенню економічності печі. Рекомендовані оптимальні геометричні параметри становлять: $d/d_{0opt}=2,5-3,5$; $s/d_{0opt}=6-10$; $x/d_{0opt}=4-6$ і $h/d_{0opt}=0-1$.

Результати досліджень узагальнено в діапазоні $Re=4,41 \cdot 10^3-8,82 \cdot 10^4$, $d/d_0=2-5$, $s/d_0=6-12$, $x/d_0=4-7$ і $h/d_0=0-2$ критеріальними виразами:

- для визначення відносної відстані x/d_0 , якій відповідає максимальна інтенсивність тепловіддачі до заготовки

$$(x/d_0)_{max} = [6-0,454(d/d_0-3,333)^2] \cdot [(d/d_0)/3,333]^{0,451}; \quad (1)$$

- для розрахунку тепловіддачі в лобовій критичній точці заготовки

$$Nu_{хл} = 1,227 \cdot Re^{0,612} \cdot Pr_0^{0,25} \cdot (Pr_0/Pr_{II})^{0,25} \cdot \epsilon_d \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_x \cdot \epsilon_h, \quad (2)$$

$$де: \epsilon_d = 18,478 \cdot Re^{-0,561} \cdot (14,375 \cdot Re^{0,612} - d/d_0)^2 + 1,171 \cdot Re^{-0,019} \quad (3)$$

$$\epsilon_s = [(s/d_0)/8]^{k_1+k_2} \quad (4)$$

$$k_1 = -[1,224 + 0,743(d/d_0 - 3,333)^2] \cdot Re^{-0,253} \quad (5)$$

$$k_2 = [1,593 + 2,457 \cdot 10^{-3} \cdot (d/d_0 - 3,333)^{16}] \cdot Re^{-0,394} \quad (6)$$

$$\epsilon_x = \{1 - k_3 \cdot [(x/d_0 - x/d_{0max})^2 - (x/d_{0max} - 5)^2]\} \times [(x/d_0)/5]^{k_4} \quad (7)$$

$$k_3 = 0,463 \cdot (d/d_0)^{2,134} \cdot Re^{-0,460} \quad (8)$$

$$k_4 = -\{121,81 + 7,356[(d/d_0)/3,333]^{3512} \times (d/d_0 - 3,333)^4\} \cdot Re^{-0,635} \quad (9)$$

$$\epsilon_h = 1 + 0,610 \cdot Re^{-0,413} \cdot k_5 \cdot (h/d_0 - 1)^2 \cdot [(3 - h/d_0)/2]^{k_6} \quad (10)$$

$$k_5 = [1 - (d/d_0 - 3,333)^2] \cdot (d/d_0)^{0,282} \quad (11)$$

$$\kappa_6 = 0,158 \cdot (d/d_0)^{-0,498} \cdot \text{Re}^{0,269}; \quad (12)$$

- для розрахунку середньої тепловіддачі до поверхні заготовки

$$\text{Nu} = 8,643 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re}^{0,818} \cdot \text{Pr}_0^{0,25} \cdot (\text{Pr}_0/\text{Pr}_n)^{0,25} \cdot \zeta_d \zeta_s \zeta_x \zeta_h. \quad (13)$$

$$\text{де: } \zeta_d = 1 - 1,887(d/d_0 - 3,333)^2 \cdot \text{Re}^{-0,338}. \quad (14)$$

$$\zeta_s = [(s/d_0)/8] l_1 + l_2. \quad (15)$$

$$l_1 = -[159,3 + 6,311(d/d_0 - 3,333)^8] \cdot \text{Re}^{-0,562}. \quad (16)$$

$$l_2 = [119,1 + 6,559(d/d_0 - 3,333)^8] \cdot \text{Re}^{-0,650}. \quad (17)$$

$$\zeta_x = \{1 - l_3 \cdot [(x/d_0 - x/d_{\text{omax}})^2 - (x/d_{\text{omax}} - 5)^2]\} \times [(x/d_0)/5] l_4 \quad (18)$$

$$l_3 = \{18,091 + 4,804[(d/d_0)/3,333]^{-1,151} \times (d/d_0 - 3,333)^2\} \text{Re}^{0,454}. \quad (19)$$

$$l_4 = -\{19,979 - 8,352[(d/d_0)/3,333]^{-0,487} \times (d/d_0 - 3,333)^2\} 10^3 \cdot \text{Re}^5. \quad (20)$$

$$l_5 = -\{0,888 - 0,204[(d/d_0)/3,333]^{1,562} \times (d/d_0 - 3,333)^2\}. \quad (21)$$

$$\zeta_h = 1 + 3,954 \cdot \text{Re}^{-0,519} \cdot l_6 \cdot (h/d_0 - 1)^2 \cdot [(3 - h/d_0)/2] l_7. \quad (22)$$

$$l_6 = [1 - (d/d_0 - 2)^2] \cdot (d/d_0)^{-0,772}. \quad (23)$$

$$l_7 = \{6,507 - 4,482[(d/d_0)/3,333]^{-0,746} \times (d/d_0 - 3,333)^2\} \text{Re}^{0,135}. \quad (24)$$

- для розрахунку середньої тепловіддачі до поверхні кладки

$$\text{Nu}_{\text{кл}} = 4,384 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re}^{0,813} \cdot \text{Pr}_0^{0,25} \cdot (\text{Pr}_0/\text{Pr}_n)^{0,25} \cdot \zeta_d \zeta_s \zeta_x \zeta_h. \quad (25)$$

$$\text{де: } \zeta_d = 1 - 0,182(d/d_0 - 3,333)^2 \cdot \text{Re}^{-0,129}. \quad (26)$$

$$\zeta_s = [(s/d_0)/8] m_1. \quad (27)$$

$$m_1 = -41,946 \cdot \text{Re}^{-0,417}. \quad (28)$$

$$\zeta_x = [(x/d_0)/5] m_2. \quad (29)$$

$$m_2 = -7,149(d/d_0)^{0,843} \cdot \text{Re}^{-0,369}. \quad (30)$$

$$\zeta_h = 3,145 \cdot \text{Re}^{-0,090} \cdot (h/d_0 + 1) m_3. \quad (31)$$

$$m_3 = -22,363 \cdot \text{Re}^{-0,422}. \quad (32)$$

Поправочні функції ε_i , ξ_i , та ζ_i у виразах (2), (13) і (25) являють собою відношення поточних значень Nu_i в указаних діапазонах геометричних параметрів системи до відповідних значень Nu_i при $d/d_0=3,333$, $s/d_0=8$ $x/d_0=5$ та $h/d_0=1$, для яких вірно $\varepsilon_i = \xi_i = \zeta_i = 1$. Ці функції дозволяють в

розрахунках конвективного теплообміну в печі оцінити змінювання тепло-
віддачі до заготовки та до кладки, обумовлене відхиленням конструктив-
них параметрів від оптимальних значень.

Середньоквадратичне відносне відхилення при аппроксимації експери-
ментальних даних приведеними виразами становить $\pm 3,0\%$, а загальна по-
грішність в дослідженнях з врахуванням помилок експерименту $\pm 6,53\%$.

Розробка ефективних режимів низькотемпературного нагріву металу. При створенні технології та конструкцій печей струменевого типу необхідно, з одного боку, використати всі існуючі резерви по швид-
кості нагріву для збільшення продуктивності, підвищення економічності нагрівальних пристроїв та якості металу, а з другої - не перевищити допустиму інтенсивність нагріву, за межами якої виникає загроза руйну-
вання металу від термічних напружень. Тому проблема визначення допусти-
мої інтенсивності нагріву заготовок, та відповідно - допустимої гущи-
ни теплового потоку до них представляє значний практичний інтерес.

В цій роботі вказані величини знайдено із розв'язання задачі опти-
мального керування процесом нагріву, направленої на визначення керую-
чого впливу - сумарного коефіцієнту тепловіддачі як функції часу $\alpha_{\Sigma 1}(\tau)$, - забезпечуючого мінімальну тривалість нагріву заготовки τ_{\min} при таких умовах:

1. В допластичному стані, коли мінімальна температура в перерізі заготовки нижче $t_{\text{пл}} = (450-600)^\circ\text{C}$ - в залежності від марки сталі (спла-
ву), - температурні напруження σ_{τ}^+ не перевищують допустимої величини $(0,8-0,9)\sigma_B$, де σ_B - тимчасовий опір металу розриву

$$\sigma_{\tau}^+(\tau) \leq (0,8-0,9)\sigma_B, \quad 0 < \tau < \tau_{\min}; \quad (33)$$

2. Температура поверхні заготовки в процесі нагріву не перевищує температури початку різки $t_{\text{зад}} = (500-800)^\circ\text{C}$ - в залежності від марки сталі (сплаву)

$$t_{\text{п1}}(\tau) \leq t_{\text{зад}}, \quad 0 < \tau < \tau_{\min}; \quad (34)$$

3. По закінченні нагріву температура поверхні заготовки $t_{\text{п1}}$ стано-
вить $t_{\text{зад}}$, а максимальна різниця температур в поперечному перерізі не перевищує заданого значення $\Delta t_{\text{зад}} = (20-30)^\circ\text{C}$

$$t_{\text{п1}}(\tau_{\min}) = t_{\text{зад}}; \quad (35)$$

$$\Delta t_{\text{max}}(\tau_{\min}) \leq \Delta t_{\text{зад}}; \quad (36)$$

4. Значення сумарного коефіцієнту тепловіддачі обирається, згідно з результатами досліджень конвективного теплообміну в камері з врахуван-
ням радіаційної складової в печах струменевого типу

$$\alpha_{\Sigma 1}(\tau) \leq 1500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (37)$$

Температурні напруження, які виникають в заготовці при її нагріві, обчислювали згідно з виразом:

$$\sigma_T = \beta \cdot E \cdot (t - t_0) / (1 - \chi), \quad (38)$$

в якому коефіцієнт Пуассона для сталі був прийнятий рівним $\chi = 0,3$.

Динаміку та розподілення температури в перерізі заготовки визначали розв'язанням двумірною диференціальним рівнянням теплопроводності в полярній системі координат

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot a \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(a \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) \quad (39)$$

при початкових умовах

$$t(r, \theta, \tau) = t(r, \theta, 0) = t_0(r, \theta) \quad (40)$$

та граничних умовах третього роду

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)_{r=R} = \alpha_{\Sigma i} (t_r - t_{\Pi i}), \quad (41)$$

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі до заготовки визначено як

$$\alpha_{\Sigma i} = \alpha_1 + \alpha_{\text{г.к.м.}}^{\text{изл.}} \quad (42)$$

де коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням газ-кладка-метал становить

$$\alpha_{\text{г.к.м.}}^{\text{изл.}} = C_{\text{ш}}^{\text{г.к.м.}} \frac{[(T_r)^4 - (T_{\Pi i})^4]}{(t_r - t_{\Pi i}) \cdot 10^8} \quad (43)$$

значення приведенного коефіцієнту випромінюванням $C_{\text{ш}}^{\text{г.к.м.}}$ знайдено згідно з загальновідомою методикою, а температура газу становить $t_r = 1400^\circ\text{C}$

Допустиму густину теплового потоку до поверхні заготовки розраховували за виразом

$$q_{\Pi i}^{\text{доп}} = \alpha_{\Sigma i} \cdot (t_r - t_{\Pi i}), \quad (44)$$

Поставлену задачу вирішено чисельним методом розщиплення згідно з алгоритмом, реалізованим у ФОРТРАН-програмі ЕС ВОМ. При цьому на кожному інтервалі часу Δt визначали максимальне значення сумарного коефіцієнту тепловіддачі $\alpha_{\Sigma i}$, за врахуванням умови 4, і відповідно - густину теплового потоку до заготовки $q_{\Pi i}^{\text{доп}}$, котрі забезпечують виконання умов 1 та 2. Закінчення процесу нагріву визначали за виконанням умов 3 - співвідношень (35) та (36).

Величиною $\alpha_{\Sigma 1}$ під час обчислень варіювали за рахунок змінення значень коефіцієнтів конвективної тепловіддачі α_1 . Змінення ж останніх при струменевому нагріві циліндричних поверхонь, як було показано в другій главі данної роботи, може здійснюватися в надзвичайно широких межах, що дозволяє гнучко та ефективно керувати зовнішнім теплообміном в печі, і таким чином - швидкістю нагріву металу.

Розрахунки виконано для заготовок різноманітних діаметрів та марок сталей (сплавів). Аналіз одержаних при цьому даних свідчить про те, що для більшої частини марок сталей та сплавів, термічні напруження обмежують швидкість нагріву тільки в початковій стадії, до того ж, дуже короткочасно. В подальшому єдиним фактором, лімітуючим інтенсивність процесу, який розглядається, виступає тільки температура поверхні заготовки. В такі проміжки часу, котрі становлять більш половини всього періоду нагріву металу, відбувається вирівнювання температурного поля по перерізу заготовки при надзвичайно низьких значеннях теплового потоку до нагріваної поверхні. Головна ж позитивна якість струменевого нагріву - висока густина теплового потоку до заготовки - при цьому не реалізується, що спричиняє зниження продуктивності печі, збільшенню її довжини, теплових втрат через кладку і, як наслідок, - невиправданим витратам пального.

Для усунення вказаних недоліків запропоновано технічні рішення по вдосконаленню режимів низькотемпературного нагріву металу в печі з допустимою інтенсивністю, враховуючі охолодження заготовки на ділянці піч - прес-ножиці. З цією метою були відкоректовані та доповнені слідуючі умови, які визначають алгоритм розрахунків (тут збережена прийнята вище нумерація, але з додаванням індексів):

2а. Температура поверхні заготовки в процесі нагріву в печі не перевищує максимальної температури нагріву під різку - (750-1050)°C в залежності від марки сталі (сплаву).

3а. На виході з печі температура поверхні заготовки та перепад температур по її перерізу відповідають максимальним значенням, при яких у момент різки (після закінчення встановленого часу охолодження) забезпечуються оптимальні температури різки $t_{\text{зад}}$ та $\Delta t_{\text{зад}}$;

4а. Значення сумарного коефіцієнту тепловіддачі при нагріві в печі, як і раніш, не перевищує $\alpha_{\Sigma 1}^{\text{нагр}} = 1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а при охолодженні $\alpha_{\Sigma 1}^{\text{охл}}$ визначається умовами теплообміну з навколишнім середовищем.

Введено також додаткову умову:

5. Тривалість охолодження заготовки на ділянці піч - прес-ножиці

прийнята рівною $\tau_{\text{охл}} = (0,5-2)$ мин, як найбільш ймовірна у виробництві.

Розрахунки нагріву у даному випадку здійснювали згідно з виразами (38)-(44), а для обчислень температур металу при його охолодженні використовували ті ж, або аналогічні рівняння, в яких замість температури газу t_g , фігурувала температура повітря, прийнята рівною $t_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$. Як початкові умови для процесу охолодження використовували розподілення температур в перерізі заготовки на виході з печі, а тепловіддачу випромінюванням та свobodною конвекцією при охолодженні розраховували за відомою методикою.

Ця задача також вирішена чисельним методом розщиплення з використанням ФОРТРАН-програми на ЕС ЕОМ. При розрахунках нагріву на кожному інтервалі часу визначали максимальне значення коефіцієнту тепловіддачі $\alpha_{\text{ст}}^{\text{нагр}}$, з врахуванням обмеження 4а, та густину теплового потоку до поверхні заготовки, при яких виконуються умови 1 та 2а. Закінчення процесу визначали по виконанню умов 2а та 3а. В розрахунках охолодження металу на кожному інтервалі часу визначали сумарний коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{\text{ст}}^{\text{охл}}$, густину теплового потоку до поверхні заготовки та розподілення температур в її перерізі. Процес завершували з закінченням часу, заданого умовою 5.

Згідно з розробленим алгоритмом проведено розрахунки нагріву заготовок різноманітних діаметрів та марок сталі для різної тривалості охолодження металу між піччю та прес-ножицями. Отримані результати показали, що використання запропонованих режимів дозволяє підвищити інтенсивність нагріву заготовок різних діаметрів та марок сталі у 1,1-1,9 разів в порівнянні з режимами, розробленими без врахування охолодження заготовок на ділянці піч - прес-ножиці. А це, як звісно, рівнозначно збільшенню продуктивності печі або зменшенню її довжини в означене число разів та призводить до зниження витрат пального. Крім того, розроблені режими забезпечують оптимальну температуру різки стабільно, незалежно від часу охолодження заготовок між піччю та прес-ножицями, що сприяє значному підвищенню надійності та довговічності ріжучого інструменту та устаткування.

Дослідження режимів низькотемпературного нагріву металу у дослідно-промисловій печі. На підставі висновків, зроблених з аналізу існуючих конструкцій нагрівальних пристроїв, рекомендацій, сформульованих, виходячи з експериментальних даних по конвективній тепловіддачі системи струменів до поверхні циліндру в стислом просторі, а також результатів розрахунків нагріву заготовок з допустимою інтенсив-

ністю та врахуванням охолодження металу на ділянці піч - прес-ножиці розроблена конструкція проходної печі струменевого типу з боковим опаленням для низькотемпературного нагріву довгомірних циліндричних штанг різноманітних діаметрів, новизну та доцільність практичного використання якої захищено авторським свідоцтвом про винахід. Дослідно-промисловий зразок печі впроваджено в ковальському цеху ЗВО "Моторостроитель".

Ця піч призначена для нагріву заготовок (штанг) діаметром (0,030-0,150)м і довжиною (0,8-6,0)м з конструкційних, легірованих та жаростійких сталей (сплавів). Продуктивність печі 3600кг/г. Як пальне використовується природний газ с теплотою згоряння 34,0 МДжм³. Номінальна витрата газу становить $V_{г.}=120\text{м}^3/\text{г}$. В бокових стінах печі встановлено 12 швидкісних пальників типу СВА (по шість штук з кожного боку) у шахматному порядку под кутом 20° до горизонту. Відстань між осями поряд розташованих пальників становить 0,265м, а протилежних - 0,133м. Камера печі в поперечному перерізі представляє собою рівнобоку трапецію з верхню основою 0,33м, нижньою - 0,46м та кутом у нижньої основи -70°. При збільшенні (зменшенні) діаметру заготовки верхню частину камери за допомогою спеціального механізму переміщують вгору (вниз) до рівня, при якому осі струменів пересікаються з продольною оссю заготовки. Цим забезпечуються умови для найбільш інтенсивного та рівномірного нагріву заготовок різних діаметрів у процесі конвективного теплообміну зі струменями продуктів згоряння. Заготовки проштвхуються вздовж печі по неохолоджуваним роликам із сплаву ХН77ТМР, які встановлені з кроком 0,345м по довжині камери та з'ясовані по рівню з приводними роликками цехового рольгангу. Розміри печі в плані-(2,345x1,080)м, а висота - 1,570м. Піч обладнано необхідними засобами для вимірювання витрат газу та повітря, температур печі та поверхні металу на виході з неї. Встановлена також автоматика для аварійного відключення подачі газу на піч при раптовому зниженні тиску в системах її газо- та повітропостачання. Керування нагрівом металу здійснюється автоматично по його кінцевій температурі шляхом змінення теплової потужності печі та темпу проштвхування заготовок.

Для оцінки ефективності теплової роботи печі, яка розглядається, було проведено нагрів заготовки діаметром 0,090м із сплаву ХН38ВТ (ЗІ703). З цією метою в центрі контрольної заготовки, а також на її поверхні в діаметрально протилежних точках: верхній та нижній, - були зачеканені хромель-алюмелеві термомпари. Такі ж термомпари були установлені на своді та боковій стінці камери для вимірювання температури

кладки. Під час проведення контрольного нагріву витрати газу, повітря, а також температуру печі реєстрували по щитовим приладам КСП-3 та КСП-3-II. Запис показань термопар, установлених в заготовці та кладці, здійснювали шеститочечним потенціометром КСП-4, а температуру продуктів згоряння в камері та на зрізі сопел пальників вимірювали термопарою гальмування у комплекті з переносним потенціометром ПП-63. Водночас з цим було зроблено відбір проб продуктів згоряння для визначення їх хімічного складу. Тривалість контрольного нагріву становила 5,5 хв. По завершенні експерименту піч було відключено для оцінки її теплової інерційності.

Одержані експериментальні дані було порівняно з результатами спеціально виконаних розрахунків нагріву заготовки вказаного діаметру та марки сплаву згідно з алгоритмом, який розглянуто в попередній главі, з врахуванням охолодження металу між піччю та прес-ножницями на протязі 2 хвилин. Практично співпадаючі результати обчислень та експерименту свідчать про високу достовірність розробленої математичної моделі та точність методу розрахунків режимів нагріву. Незначні відхилення експериментальних даних від розрахованих кривих обумовлено розповсюдженням тепла вздовж осі заготовки, чого не відображає використане двумірне рівняння теплопроводності (39). Внаслідок цього і розрахована тривалість нагріву була на 0,5хв. менше встановленої в експерименті.

Температура кладки при проведенні контрольного нагріву не перевищувала 1080°C, що сприяє збільшенню терміну служби вогнетривних матеріалів, підвищує надійність та довговічність печі, а також знижує її теплові втрати. Після відключення пальників температура кладки стрімко знижується, що служить доказом низької інерційності печі, яка в свою чергу забезпечує широкі можливості по керуванню нагрівом металу.

Помітних змінень в структурі сплаву та порушень цілесності заготовки після контрольного нагріву зафіксовано не було. Хімічний склад диму в камері відповідав повному згорянню пального з коефіцієнтом витрати повітря рівним 1,05. Питома витрата тепла на нагрів металу при проведенні експерименту становила 2,076 МДж/кг, витрата умовного пального 70,781 кг/т, а ККД печі навіть без використання рекуператора - 28,45%, що відповідає сучасному рівню розвитку пічної теплотехніки.

Заключення. Основні підсумки виконаних досліджень та розробок полягають в тому, що:

1. Вивчено закономірності конвективного теплообміну системи швидкісних осесиметричних струменів з циліндричною поверхнею в стислому

просторі - камері печі з боковим опаленням. Досліджено вплив початкової швидкості струменів, діаметру нагрівасмої заготовки, та відстані між осями поряд розташованих струменів (шагу між пальниками), від зрізу сопел до поверхні заготовки, та від заготовки до поду камери на локальну та середню тепловіддачу до заготовки та до кладки, на рівномірність теплообміну струменів з нагрівасмою поверхнею, а також на ефективність використання тепла в камері печі.

2. Визначено оптимальні конструктивні параметри системи "сопло-заготовка-камера", котрі при високій інтенсивності та рівномірності тепловіддачі струменів до поверхні заготовки та до кладки забезпечують високу ефективність використання тепла в камері печі.

3. Одержані експериментальні дані та результати їх аналізу узагальнено критеріальними виразами для розрахунку конвективного теплообміну при розробці нагрівальних пристроїв та режимів струменевого нагріву циліндричних заготовок.

4. З використанням загальних підходів та методів розрахунково-теоретичного аналізу допустимої інтенсивності швидкісного струменевого нагріву металу, розроблених П.Г.Краснокутським та В.А.Кривандіним, проведено математичний опис задачі, складено алгоритм та виконано розрахунки допустимої інтенсивності низькотемпературного нагріву довгомірних циліндричних заготовок різноманітних діаметрів та марок сталей (сплавів).

5. Виходячи з аналізу результатів виконаних розрахунків допустимої інтенсивності нагріву металу, запропоновано засоб вдосконалення режимів низькотемпературного нагріву заготовок з врахуванням їх охолодження на дільниці піч - прес-ножиці.

6. Розроблено алгоритм та розраховано раціональні режими низькотемпературного нагріву довгомірних циліндричних заготовок різноманітних діаметрів та марок сталей (сплавів) з допустимою інтенсивністю та з врахуванням охолодження металу на протязі різного часу перебування на ділянці між пічю та прес-ножицями. Показано високу ефективність та значні перспективи використання запропонованих режимів низькотемпературного нагріву довгомірних штанг перед різкою на мірні заготовки, які забезпечують суттєве збільшення продуктивності печі, зменшення її розмірів та матеріалоемкості, підвищення надійності та довговічності устаткування, а також якості готової продукції.

7. На підставі результатів виконаних експериментальних та розрахунково-теоретичних досліджень, а також висновків, зроблених з аналізу

лізу та узагальнення, розроблено конструкцію та виготовлено дослідно-промислово проходну піч струменевого типу з боковим розташуванням швидкісних газопальних пристроїв та подвижною камерою для низькотемпературного нагріву довгомірних циліндричних заготовок різноманітних діаметрів перед різкою на прес-ножицях, новизну та доцільність практичного використання якої захищено авторським свідоцтвом про винахід.

8. Досліджено теплову роботу створеної печі та режимів нагріву металу в ній, в результаті чого було доказано високу достовірність розробленої математичної моделі низькотемпературного нагріву заготовок з врахуванням їх охолодження на ділянці піч-прес-ножиці, залучено експериментальне підтвердження високої продуктивності, надійності та економічності печі, її низької теплової інерційності та можливості гнучкого керування теплообміном в робочому просторі.

Розроблену конструкцію печі впроваджено на Запорізькому виробничому об'єднанні "Моторостроитель". Річний економічний ефект від впровадження в цінах 1989 року становив 78,4 тисяч карбованців.

Матеріали дисертації опубліковано в таких роботах:

1. А.С.1225862 СССР, МКИ С 21 D 1/52. Способ скоростного струйного нагрева цилиндрических заготовок различных диаметров в проходных печах/П.Г.Краснокутский, В.А.Кривандин, А.В.Шперный и др. (СССР). - N 3812178/22-02; Заявлено 20.09.84; Опубл.23.04.86, Бюл. N 15// Открытия, изобретения. - 1986. - N 15. - С.74.
2. Определение допустимой интенсивности низкотемпературного скоростного струйного нагрева металла/ П.Г.Краснокутский, В.А.Кривандин, В.Н.Трикашная и А.В.Шперный // Известия вузов.Черная металлургия. - 1988. - N 11. - С.128-131.
4. Краснокутский П.Г., Шперный А.В., Трикашная В.Н. К вопросу об оптимальных режимах низкотемпературного струйного нагрева металла. - УкрНИИТИ, 1988. - Деп. N 1676-Ук88. - 25 с., ил.
5. Расчеты допустимой интенсивности струйного нагрева заготовок перед разрезкой с учетом их охлаждения на участке печь - пресс-ножицы/ П.Г.Краснокутский, В.А.Кривандин, В.Н.Трикашная, А.В.Шперный// Кузнечно-штамповочное производство. - 1989. - N 1. - С.29-31.
6. Краснокутский П.Г., Шперный А.В., Трикашная В.Н. Эффективные технологии низкотемпературного струйного нагрева металла// Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в черной металлургии: Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции - Днепропетровск. 1989. - С.48.

7. Перспективы применения печей струйного типа для низкотемпературного нагрева металла/ Краснокутский П.Г., Шперный А.В., Толмачев В.И. и Трикашная В.Н.// Теплотехническое обеспечение технологических процессов металлургии: Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции - Свердловск, 1990.- С.79-80.
8. Шперный А.В., Краснокутский П.Г., Трикашная В.Н. Исследование конвективного теплообмена в камере печи при набегании системы осесимметричных струй на цилиндрическую поверхность// Известия вузов.Черная металлургия.- 1992.- N 3.- С.61-65.
9. Шперный А.В., Краснокутский П.Г., Трикашная В.Н. Определение конструктивных параметров печи при нагреве цилиндрической заготовки системой струй//Известия вузов.Черная металлургия.- 1992.- N 1.- С.108-111.
10. Краснокутский П.Г., Шперный А.В. Расчет конвективного теплообмена при набегании системы осесимметричных струй на цилиндрическую поверхность//Известия вузов.Черная металлургия.- 1992.- N 5.- С.81-83.
11. Краснокутский П.Г., Шперный А.В. Печь струйного типа для нагрева длинномерных изделий под разрезку на пресс-ножницах// Кузнечно-штамповочное производство.- 1992.- N 3.- С.34-36.
12. Краснокутский П.Г., Шперный А.В., Трикашная В.Н. Перспективные методы нагрева металла в печах машиностроения// Научно-технические проблемы энергомашиностроения и пути их решения: Тез. докл.Республиканской научно-технической конференции - Санкт - Петербург.- 1992.- С.57.



459499

AB 30.918

AB 30.918

Підписано до друку 4.07.94 г. Заказ N 253.
Об'єм 1 д.а. Формат 60x80/16. Тираж 100 прим.

ЗДТУ. Коп.- множ. бюро.
м.Запоріжжя, 330063, вул. Жуковського, 64