

ДЕРЖАВНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

На правах рукопису

РАДЧЕНКО Юрій Миколайович

ОПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАГРІВУ ЗЛИТКІВ  
У КАМЕРНІЙ ПЕЧІ З МЕТОЮ  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Спеціальність 05.16.02. «Металургія чорних металів»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ, 1995

Ав 32.529

Роботу виконано на кафедрі теплотехніки і екології металургійних печей Державної металургійної Академії України

Науковий керівник - доктор технічних наук,  
професор Губинський В.И.

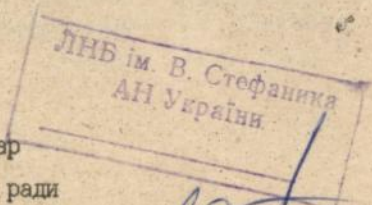
Офіційні опоненти : - доктор технічних наук,  
професор Ревун М.П.  
- кандидат технічних наук,  
доцент Буличев В.В.

Ведуче підприємство :- комбінат "Запоріжсталь"  
ім.С.Орджонікідзе

Захист відбудеться "22" серпня 1995 р. о 12<sup>30</sup> годині  
на засіданні спеціалізованої ради К 068.02.01. при Державній  
металургійній Академії України за адресою :  
320065, м.Дніпроперовськ, пр.Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Державної  
металургійної Академії України.

Автореферат розісланий "22" серпня 1995 р.



Вчений секретар  
спеціалізованої ради

кандидат технічних наук, доцент [Signature] В.С.Паніотов

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00779109 (X)

43 - 32.520

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність роботи. Основними напрямками розвитку чорної металургії України в умовах ринкової економіки є створення та впровадження у виробництво нових технологічних процесів і устаткування, що забезпечують зменшення паливно-енергетичних та інших матеріальних витрат на випуск одиниці продукції.

До складу металургійного переділу машинобудівних підприємств входять великі ковальсько-пресові цехи (КПЦ).

Застосовувані в цей час для нагріву злитків великовантажні камерні печі з викатним подом мають низькі техніко-економічні показники, робота таких печей погано узгоджується з роботою пресового устаткування КПЦ. У той же час камерні печі широко розповсюджені і будуть грати важливу роль в майбутньому. Тому опрацювання нових енергозберігаючих теплових схем і конструкції камерних печей набуває особливу актуальність.

Мета роботи. Опрацювання принципової схеми двокамерної печі для нагріву злитків під ковку з глибокою утилізацією теплоти відходячих газів та технології нагріву злитків в цій печі, що забезпечує зниження питомого видатку палива і зменшення пічного вигару металу.

Наукова новизна. Одержані аналітичні рішення диференціальних рівнянь теплопровідності штаби і короткого циліндра з урахуванням змінності теплофізичних властивостей матеріалу для граничних умов другого роду. На основі цих рішень розроблен обчислювальний алгоритм розрахунку із застосуванням числено-аналітичного методу. Розроблена методика визначення допустимої величини часової дискретизації для розрахунку температур числено-аналітичним методом. Розроблена матема-

тична модель сполученого теплообміну в двокамерній печі, що враховує умови зпалювання палива, циркуляцію пічних газів, процеси нестационарної теплопровідності в металі і кладці.

Практична цінність. Розроблена конструкція малоємної двокамерної печі для нагріву злитків з глибокою утилізацією теплоти пічних газів. На основі створеної математичної моделі сполученого теплообміну в печі визначені раціональні розміри печі і розроблена енергозберігаюча технологія нагріву злитків під ковку. Впровадження двокамерної печі дозволяє знизити питомий видаток умовного палива на 33...36% і зменшити вигар металу більше ніж в два рази у порівнянні з найкращими великовантажними печами із викатним подом.

Особистий внесок автора дисертації складається в дослідженні теплових схем роботи двокамерної печі та опрацюванні технології нагріву: в одержанні нових аналітичних рішень диференціальних рівнянь теплопровідності з урахуванням зміності теплофізичних властивостей матеріалу для штаби і короткого циліндра; в поширенні кола завдань, що вирішуються із застосуванням числено-аналітичного методу; в опрацюванні методики визначення погрішності розрахунків температурних полів числено-аналітичним методом.

Засіб дослідження. В дисертаційній роботі застосовувались експерименти на діючому обладнанні і математичне моделювання на ЕОМ процесів сполученого теплообміну в подум'яних нагрівальних печах, засноване на сучасній теорії тепломасопереноса.

Реалізація результатів роботи. Розроблена технологія нагріву злитків під ковку і конструкція двокамерної печі були використані в проекті реконструкції печей КІЩ АТ "Дніпроважмаш", виконаному проектно-конструкторським технологічним інс-

титутом металургійного устаткування АТ "Дніпроваяжмаш". Очищення економічний ефект від впровадження результатів роботи на одній печі складає 24146 крб/рік (в цінах 1990 року).

Апробація роботи. Основні результати роботи докладалися і обговорювалися на науково-технічні конференції "Енергозберігаючі технології і теплоенергетичні проблеми оптимізації пічного господарства металургійних підприємств" (Міасс, 1987 р.); на Республіканській конференції "Підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів в чорній металургії" (Дніпропетровськ, 1989 р.).

Публікації. По матеріалам дисертації опубліковані 4 наукові роботи.

Обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів і укладення, бібліографічного списку із 73 найменувань, містить 121 сторінку машинописного тексту, 24 малюнки, 15 таблиць, 3 додатки.

На захист виносяться:

1. Математична модель сполученого теплообміну в двокамерній печі, що враховує умови зпаловання палива і циркуляції пічних газів.

2. Аналітичні рішення завдань теплопровідності штаби і короткого циліндра з урахуванням змінності теплофізичних властивостей матеріалу для граничних умов другого роду.

3. Числено-аналітичний метод розрахунку теплопровідності штаби і короткого циліндра для граничних умов другого роду.

4. Методика визначення допустимої величини кроку часової дискретизації при заданій погрішності розрахунку температур числено-аналітичним методом.

5. Теплова схема двокамерної печі і режими нагріву

злитків під ковку, що забезпечують зменшення питомого видатку палива і вигару металу в печі.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

1. Аналіз нагрівального обладнання ковального виробництва. Їх розвиток на основі поліпшення теплової роботи.

Печі із викатним подом мають істотні недоліки: невисоку якість нагріву, чималі втрати тепла з відходячими димовими газами, великий вигар металу.

Аналіз літературних даних виявив основні напрямки, по яким ведеться вдосконалення конструкція і теплових схем нагрівального обладнання. Так, все більше розповсюдження знаходять принципи реверсування теплоносія, струмний нагрів, імпульсні системи опалення, а також їх комбінації. Іншим напрямком поліпшення ефективності роботи печей є використання тепла відходячих димових газів і зменшення теплових втрат печі через кладку.

В останні роки з'явилися конструкції, в яких тепло відходячих продуктів спалення використовують для попереднього підігріву металу, що надходить в піч.

В плані організації процесу своєчасне видавання злитків на ковку зменшує простої печі на холодостому ходу, знижує питомий видаток палива і вигар металу.

Проведені в КПІ АТ "Дніпроважмаш" дослідження показали, що існуючі там великовантажні печі із викатним подом не відповідають сучасним вимогам і погано вписуються в технологічний ланцюг.

2. Опрацювання конструкції печі з глибокою утилізацією тепла.

Для умов мілкосерійного випуску поковок, розроблена

принципова схема малосмної двокамерної печі із підігрівом металу 1 повітря відходячими газами (мал. 1).

Дві камери 1 і 2, що повідомляються через отвір 3-а, обладнані пальниками 4, встановленими в верхній частині задньої торцової стіни 1 металевим рекуператором 6. Димопровідна система печі обладнана трьома димовими клапанами: клапани 7 і 8 - відсічні, клапан 9 - регулюючий.

В наданій печі здійснюється двохстадійний нагрів металу: попередній - в камері, пальники якої виключені, остаточний - в камері з включеними пальниками. При досягненні стану готовності металу в камері, з включеними пальниками, злиток видається на прес. Після цього на подину завантажують черговий холодний злиток і цикл нагріву відновлюється. Ролі камер змінюються: підігрівальна стає нагрівальною і навпаки.

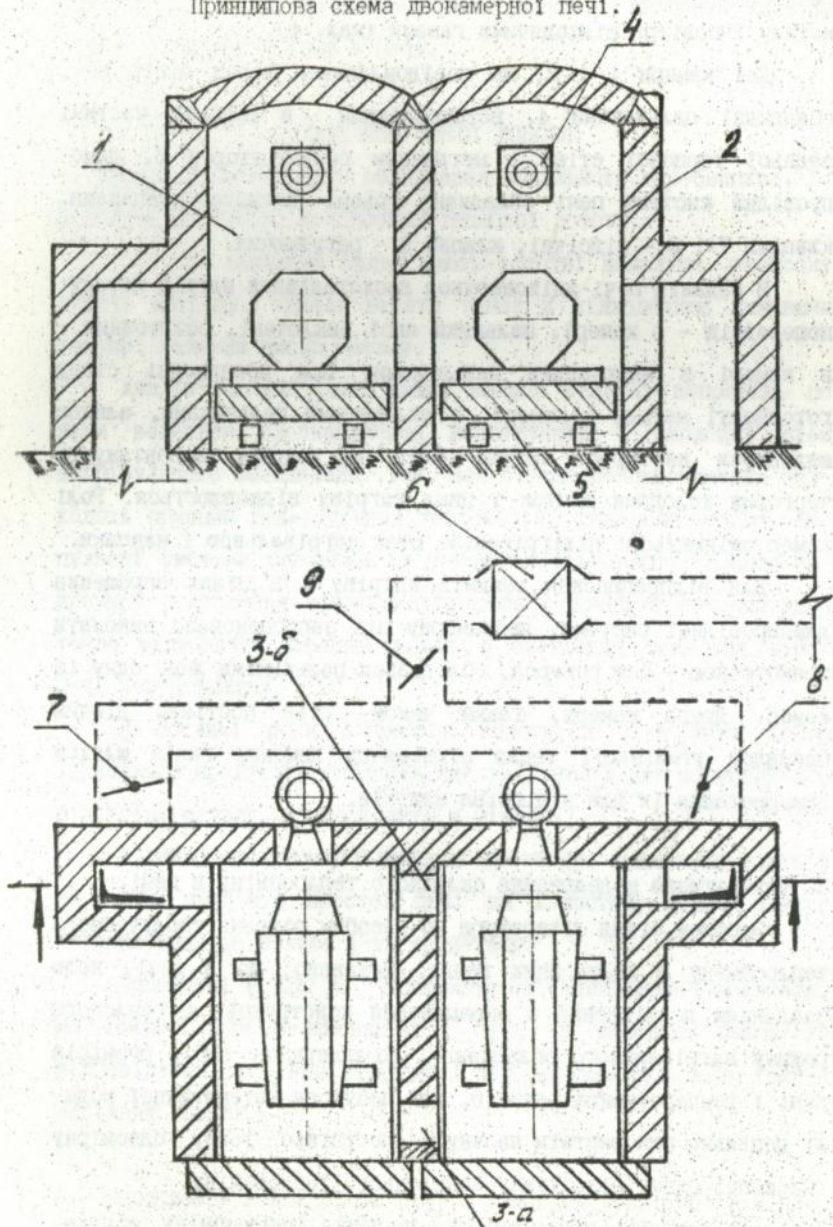
Для відпрацювання режимів нагріву і в цілях спрощення димопровідної системи, двокамерну піч запропоновано виконати прямоючюю - без реверса, обладнавши пальниками лише одну із камер. Друга камера, таким чином, стає постійно діючим приладом утилізації тепла відходячих димових газів шляхом використання їх для підігріву злитків.

### 3. Математичне моделювання складного теплообміну в печі.

Зроблен огляд літератури по засобам рішення сполученого теплообміну в подум'яних печах. Показано, що в разі, коли завданням дослідження є опрацювання конструкції і теплового режиму нагрівального обладнання, що припускає вибір розмірів печі і температурних режимів, для побудови математичної моделі доцільно використати наочну і достатньо точну одномірну (слоюву) схему розрахунку зовнішнього теплообміну.

Для рішення внутрішнього з'єднання теплообміну обгрун-

## Принципова схема двокамерної печі.



Мал.1.

товано привілею числено-аналітичного методу розрахунку (ЧАМ) перед іншими засобами. Для побудови обчислювального алгоритму із застосуванням ЧАМ одержані аналітичні рішення диференціальних рівнянь теплопровідності короткого циліндра і штаби для граничних умов другого роду при залежних від часу теплофізичних властивостях. Питома теплоємність  $c$  і коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  задані у вигляді довільних функцій часу.

Оскільки ліва частина рівняння теплопровідності становить зміну ентальпії в одиницю часу  $\dot{d}i = c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}$ , а  $c$  та  $\rho$  знаходяться за знаком диференціалу, тому вид рівняння теплопровідності не змінюється

$$c(\tau) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda(\tau) \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] \quad (1)$$

Вважаючи, що торці циліндра адиабатні, а тепловий струм змінюється по довжині циліндру у вигляді довільної функції, граничні і початкові умови записуються у вигляді:

$$\frac{\partial T(R, x, \tau)}{\partial r} = \frac{1}{\lambda(\tau)} \cdot q(x, \tau) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(r, 0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T(r, L, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(0, x, \tau)}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$T(r, x, 0) = f(r, x) \quad (5)$$

Застосувавши кінцеве інтегральне перетворення (КІП) Ханкеля по радіусу і Фур'є по довжині циліндра, після деяких перетворень одержали рішення рівняння (1) в загальному вигляді:

$$T(r, x, \tau) = \frac{2}{R^2} \left\{ \frac{1}{L} \left[ \int_0^R \int_0^L f(r, x) r dr dx + R \int_0^\tau \int_0^L \frac{a(\nu)}{\lambda(\nu)} q(x, \nu) dx d\nu \right] + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(b_n z) \left[ \exp(-b_n^2 \int_0^{\tau} a(\nu) d\nu) \left[ \int_0^R \int_0^L f(r, x) r \cos(b_n x) dx dr + \right. \right. \\
& \left. \left. + R \int_0^{\tau} \int_0^L \frac{a(\nu)}{\lambda(\nu)} q(x, \nu) \cos(b_n x) \exp(b_n^2 \int_0^{\nu} a(\omega) d\omega) dx d\nu \right] \right] + \\
& + \frac{2}{R^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(p_m R)}{J_0^2(p_m R)} \left\{ \frac{1}{L} \left[ \exp(-p_m^2 \int_0^{\tau} a(\nu) d\nu) \left[ \int_0^R \int_0^L f(r, x) r \times \right. \right. \right. \\
& \times J_0(p_m r) dx dr + R J_0(p_m R) \int_0^{\tau} \int_0^L \frac{a(\nu)}{\lambda(\nu)} q(x, \nu) \exp(p_m^2 \int_0^{\nu} a(\omega) d\omega) dx d\nu \left. \left. \right] + \right. \\
& \left. + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(b_n x) \left[ \exp(-(p_m^2 + b_n^2) \int_0^{\tau} a(\nu) d\nu) \left[ \int_0^R \int_0^L f(r, x) r J_0(p_m r) \times \right. \right. \right. \\
& \times \cos(b_n x) dx dr + R J_0(p_m R) \int_0^{\tau} \int_0^L \frac{a(\nu)}{\lambda(\nu)} q(x, \nu) \cos(b_n x) \times \\
& \left. \left. \left. \times \exp((p_m^2 + b_n^2) \int_0^{\nu} a(\omega) d\omega) \cdot dx d\nu \right] \right] \right\} \quad (7)
\end{aligned}$$

де  $T$  - температура циліндра,  $K$ ;  $\tau, \nu$  - кінцевий і поточний час процесу,  $s$ ;  $r, R$  - відповідно координата по радіусу і радіус циліндра,  $m$ ;  $x, L$  - відповідно координата по довжині і довжина циліндра,  $m$ ;  $p_m = \mu_m/R$ ,  $\mu_m$  - корінь характеристичного рівняння  $J_1(\mu_m) = 0$ ;  $m = 1, 2, 3, \dots, \infty$ ;  $b_n = n \cdot \pi/L$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ .

Скориставшись таким же підходом до рішення диференціального рівняння теплопровідності штаби

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\tau) \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] \quad (8)$$

при граничних і початкових умовах виду

$$\frac{\partial T(S, x, \tau)}{\partial y} = \frac{1}{\lambda(\tau)} \cdot q(x, \tau) \quad (9)$$

$$\frac{\partial T(y, 0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T(y, L, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial T(0, x, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$T(y, x, 0) = f(y, x) \quad (12)$$

одержано рішення аналогічне (7).

На основі цих рішень розроблен обчислювальний алгоритм із застосуванням числено-аналітичного методу. Основна ідея ЧАМ укладає в інтегруванні аналітичних рішень по просторовим координатам і численому інтегруванні по часу. Існуючі в аналітичних рішеннях інтеграли по часу представляють у вигляді сум, включаючих значення параметрів в попередні моменти часу, за допомогою квадратурної формули

$$\int_{\tau_{l-1}}^{\tau_l} \varphi(\tau) d\tau \cong \left[ \beta \cdot \varphi(\tau_l) + (1-\beta) \cdot \varphi(\tau_{l-1}) \right] \cdot (\tau_l - \tau_{l-1}); \quad (13)$$

де  $\beta$  - параметр розкриття,  $0 \ll \beta \ll 1$  (надалі  $\beta$  приймаємо рівним нулю).

Таким чином, числено-аналітичні рішення, в разі рівномірного початкового розподілу температури мають вид:

-температурне поле короткого циліндра

$$T_{(k)}(r, x) = T_0 + \frac{2}{R L} C_{(k)} + \frac{4}{R L} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(b_n x) A_{(n, k)} + \\ + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(p_m r)}{J_0(p_m R)} \left[ \frac{2}{R L} B_{(m, k)} + \frac{4}{R L} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(b_n x) D_{(m, n, k)} \right] \quad (14)$$

-середньомасова температура циліндра

$$\bar{T}_{(k)} = T_0 + \frac{2}{R L} C_{(k)} \quad (15)$$

-температурне поле штаби

$$T(y, x)_{(k)} = T_0 + \frac{1}{S L} E_{(k)} + \frac{2}{S L} \sum_{w=1}^{\infty} \cos(d_w x) F_{(w, k)} + \\ + \frac{2}{S L} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos(b_n y) \left[ G_{(n, k)} + 2 \sum_{w=1}^{\infty} \cos(d_w x) H_{(w, n, k)} \right] \quad (16)$$

-середньомасова температура штаби

$$\bar{T}_{(k)} = T_0 + \frac{1}{S L} E_{(k)} \quad (17)$$

Значення коефіцієнтів А, В, С, D, E, F, G, H знаходяться по рекурентним виразам типу

$$A_{(n,k)} = \exp(-b_n^2 a_{(k-1)} \Delta\tau) \left[ A_{(n,k-1)} + \frac{B_{(k-1)}}{\lambda_{(k-1)}} q_{(n,k-1)}^{**} \Delta\tau \right], \quad (18)$$

де  $q_{(n,k-1)}^{**} = \int_0^L q(x, \nu)_{(n,k-1)} \cos(b_n x) dx$ .

Алгоритм розрахунку температурних полів представляє собою цикл по часу з моменту  $k=1$  до  $k=N$  з кроком часової дискретизації  $\Delta\tau$  ( $\tau_{k1\text{шц}} = N \cdot \Delta\tau$ ).

1. В нульовий момент часу  $k=0$  задається початкова температура тіла і визначаються теплофізичні властивості матеріалу при цій температурі.
2. По рекурентним формулам визначаються значення коефіцієнтів А, В, С, D, E, F, G, H.
3. По виразам (14) і (16) розраховується температурне поле циліндра і штаби в наступний  $(k+1)$ -й момент часу.
4. По формулам (15) і (17) розраховуються середньомасові температури, по яким визначаються теплофізичні властивості матеріалів в  $(k+1)$ -й момент часу.

Виконуючи дії по пп. 2, 3, 4, розраховуються температури аж до закінчення процесу, коли  $k = N$ .

При використанні числено-аналітичного методу стає питання про точність розрахунку температурних полів в тілі. В роботі показано, що помилка  $\delta$ , що з'являється при обчисленні по рекурентним виразам, залежить від величини кроку часової дискретизації  $\Delta\tau$  і комплексу  $\Pi_1 = (p_m^2 + b_n^2) \cdot a$  - для циліндра і комплексу  $\Pi_2 = (b_n^2 + d_w^2) \cdot a$  - для штаби. ( $a$  - коефіцієнт теплопровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ). Встановлена залежність  $\Delta\tau$  від комплексів  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  для заданої точності розрахунків.

Другим чинником, що впливає на точність розрахунків, є змушене усереднення теплофізичних властивостей по об'єму тіла. Помилка, що виникає в цьому випадку, залежить від перепадів температур в тілі.

Проводили порівняння результатів розрахунків по методам ЧАМ і МКР. Одержано, що для вуглецевих сталей, що відрізняються різко відбитою змінністю теплофізичних властивостей в області структурних перетворень, температурні поля розраховуються із помилкою не більш як 4% при  $\Delta t^{\max} = 100^\circ\text{C}$ . Час нагріву циліндра до заданої температури, що визначається обома методами, відрізняє не більш як на 5...10% при  $\Delta t^{\max} = 300^\circ\text{C}$ . Для групи аустенітних сталей, у яких відсутні фазові перетворення, результати розрахунків добре сходяться практично при будь-яких значеннях перепада температур  $\Delta t$ . Помилка не перевищує 1,5%.

Для розрахунку нагріву метала в печі вирішується сполучена задача лучисто-конвективного теплообміну в системі з селективним середовищем, що випромінює.

Кожна камера печі розбита на умовні слої по довжині. Розподіл температури продуктів згоряння уздовж камери печі в  $k$ -й момент часу знаходили із рівняння теплового балансу  $i$ -го газового слоя, послідовно вирішуючи його для всіх слоїв:

$$\begin{aligned}
 & B_T \xi_i Q_{\text{н}}^0 + B_T (i_T + L_0^0 n i_B) + B_T V_0 K_{\text{роч}} c_{\text{га}i-1} (T_{2i-1} - 273) - \\
 & - B_T V_0 K_{\text{роч}} c_{\text{га}i} (T_{2i} - 273) + A_{\text{мз}i}^{\Sigma} T_{\text{м}i}^4 + A_{\text{хз}i}^{\Sigma} T_{\text{х}i}^4 - A_{\text{з}i}^{\Sigma} T_{\text{з}i}^4 - \\
 & - \alpha_m F_{\text{м}i} (T_{\text{з}i} - T_{\text{м}i}) - \alpha_x F_{\text{х}i} (T_{\text{з}i} - T_{\text{х}i}) = 0, \quad (19)
 \end{aligned}$$

де  $B_T$  - видаток палива на піч,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\xi_i$  - частка палива, що згоряє в  $i$ -м слої;  $Q_{\text{н}}^0$  - нижча теплота спалення палива,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $i_T, i_B$  - ентальпія палива і повітря що надходять на горіння,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $L_0^0$  - теоретично необхідний видаток повітря на горіння,

$\text{м}^3/\text{м}^3$  палива;  $n$  - коефіцієнт видітку повітря;  $V_0$  - питомий видаток продуктів спалення,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $K_{\text{pec}} -$  кратність внутрішньої рециркуляції продуктів спалення в печі;  $C_0$  - питома тепловмісткість продуктів спалення,  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;  $T_z, T_m, T_x$  - температури газу, поверхні металу і кладки, К;  $A_{mz}^{\Sigma}, A_{xz}^{\Sigma}, A_x^{\Sigma}$  - селективні коефіцієнти радіаційного обміну,  $\text{Вт}/\text{К}^4$ ;  $\alpha_m, \alpha_k$  - коефіцієнти тепловіддачі конвекцією,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $F_m, F_k$  - площа поверхні металу і кладки,  $\text{м}^2$ .

Сполучення внутрішнього і зовнішнього теплообміну здійснюється через результуючі струми тепла на поверхні металу і кладки в розрахункових слоях для  $k$ -го моменту часу:

-результуючий тепловий струм на метал

$$Q_{mi}^{\text{рез}} = A_{zm}^{\Sigma} T_{zi}^4 + A_{km}^{\Sigma} T_{ki}^4 - A_m^{\Sigma} T_{mi}^4 + \alpha_m F_m (T_{zi} - T_{mi}) \quad (20)$$

-результуючий тепловий струм на кладку

$$Q_{ki}^{\text{рез}} = A_{zk}^{\Sigma} T_{zi}^4 + A_{mk}^{\Sigma} T_{mi}^4 - A_k^{\Sigma} T_{ki}^4 + \alpha_k F_k (T_{zi} - T_{ki}) \quad (21)$$

Теплові струми протягом розрахункового кроку  $\Delta t$  приймаються постійними.

Процес окалиноутворення при нагріві в печі враховували шляхом визначення кількості окалини, що утворюється протягом нагріву, по виразу

$$W = \sqrt[k_0]{k_0 \sum_{k=0}^N \exp\left(-\frac{B}{T_{m(k)}}\right) \Delta t} \quad (22)$$

де  $W$  - кількість окалини,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;  $k_0$  - константа швидкості окалиноутворення,  $\text{кг}^2/(\text{м}^4 \cdot \text{с})$ ;  $B$  - постійна окислення, К;  $T_{m(k)}$  - температура поверхні металу в  $k$ -й момент часу, К;  $\Delta t$  - тривалість інтервала часу, протягом якого температура постійна, с.

Математична модель реалізована у вигляді FORTRAN - програми для ЕОМ ЕС-1060. У вигляді вхідних даних в програму задаються: геометричні розміри печі і злитків; склад про-

дуктів спалення палива, одержання із розрахунку горіння газоподібного палива із заданим  $n$ ; початковий тепловий стан системи (температури металу і кладки); кінцева температура і допустима нерівномірність нагріву злитків: довжина факелу і режим циркуляції димових газів.

#### 4. Опрацювання технології нагріву злитків в двокамерній печі.

Стосовно до умов виробництва в КПЦ АО "Дніпроважмаш" визначені базові розміри двокамерної печі.

Для вибору раціональної теплової схеми печі дослідили якість нагріву металу при наступних режимах циркуляції газів:

- звичайний режим ( $K_{p_{\text{оу}}}=1$ );
- рециркуляційний режим ( $K_{p_{\text{оу}}}>1$ );
- режим ідеального перемішування (П);
- реверсивно-рециркуляційний, з частотою реверса  $\Delta t_{p_{\text{оу}}} \ll t_{\text{кін}}.$

Одержано, що звичайна схема опалення не забезпечує необхідну рівномірність нагріву по довжині злитка (в кінці нагріву  $\Delta t_{p_{\text{оу}}}^{\text{кін}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ) при задовільному перепаді температури по перетину ( $\Delta t_{p_{\text{оу}}}^{\text{кін}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Рециркуляційний режим (РЦ), що створюється шляхом підсмоктування частини пічних газів до пальників через отвір 36 (див. мал.1), покращив якість нагріву. При цьому в кінці нагріву перепад по поверхні був на рівні  $\Delta t_{p_{\text{оу}}}^{\text{кін}} \approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , а по радіусу  $\Delta t_{p_{\text{оу}}}^{\text{кін}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , що цілком допустимо.

Режим ідеального перемішування, що створюється за рахунок розосередженого підводу палива в камеру нагріву, забезпечив рівномірний нагрів по поверхні злитка при перепаді температури по перетину на рівні  $\Delta t_{p_{\text{оу}}}^{\text{кін}} \approx 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Реверсивно-рециркуляційний режим нагріву з частотою реверса  $\Delta t_{p_{\text{оу}}} = 10 \dots 20$  хвилин опинився абсолютно неефективним і надалі не аналізувався.

Порівняння показників паливовикористання в двокамерній печі при роботі в режимах РІ і ІІ виявило деякий привілей першого. Так, питомий видаток умовного палива в режимі РІ при  $K_{\text{печ}} = 2$  на 1,9 кг/т (2,9%) менше, чим в режимі ІІ, а коефіцієнт використання палива відповідно дорівнює 0,82 і 0,79. Існуюча при цьому нерівномірність температур в злитках цілком допустима. Таким чином, для двокамерної печі був рекомендований рециркуляційний режим із  $K_{\text{печ}} \approx 2$ .

Для визначення термоінерційної характеристики печі, досліджувалася динаміка процесу розігріву печі із холодного стану до наступу циклічного режиму. Результати розрахунків показали, що після закінчення третього циклу нагріву, процес можна вважати що установився. Середньомасова температура злитків і загальна тривалість циклу практично незмінні.

Основним завданням при опрацюванні режимів нагріву злитків було забезпечення заданої продуктивності печі і якості нагріву металу. Відповідно до цього були визначені і регламентовані наступні технологічні параметри роботи двокамерної печі: 1- максимальний видаток палива ( максимальна теплова потужність ) в період підйома температури поверхні металу до заданої; 2- тривалість періоду підйома температури; 3-тривалість витримки металу при заданій температурі поверхні; 4- загальний час нагріву.

Режими нагріву розроблені для холодних злитків вуглецевих і легованих сталей в діапазоні від  $\varnothing$  400 мм (1,7 т) до  $\varnothing$  1100 мм (15,6 т). Продуктивність двокамерної печі коливається від 1,96 т/ч до 2,23 т/ч залежно від розмірів (маси) злитків. Питомий видаток умовного палива на нагрів злитків складає 62...65 кг/т, що в середньому на 40...43 кг/т (33...36% ) менше, чим в найкращих камерних печах із викатним

подом. Пічний вигар металу знизився в середньому із 2,7% до 1,2%, т.ч. більше ніж в два рази. Коефіцієнт корисної дії печі знаходиться на достатньо високому рівні - 40...42%. Чималий ефект енергозбереження і зменшення втрат металу від окислення одержан завдяки двом чинникам: 1 - заміні велико-вантажної печі із викатним подом на малоємну двокамерну стієї ж продуктивності, що дозволило усунути тривалі гарячі простой печі при видаванні металу на ковку; 2 - глибокія утилізації тепла шляхом підігріву металу і повітря відходчими пічними газами.

#### Загальні висновки.

1. Економія палива в ковально-пресовом виробництві повинна здійснюватися по двом напрямкам: шляхом опрацювання нових економічних технологій і засобів нагріву і шляхом раціонального планування сумісної роботи цехового устаткування - пресів і печей.

2. Найбільш повно умовам виробництва відповідає малоємна двокамерна піч із попереднім підігрівом металу в одній із камер.

3. Для вибору раціональних розмірів печі і опрацювання технології нагріву :

- розроблена математична модель сполученого теплообміна в двокамерній печі з урахуванням умов спалювання палива і циркуляції продуктів спалення;

- одержані аналітичні рішення диференціальних рівнянь теплопровідності штаби і короткого циліндра з урахуванням змінності теплофізичних властивостей матеріалу для граничних умов другого роду;

- розроблен обчислювальний алгоритм для розрахунку температурних полів з використанням чисельно-аналітичного методу;

-розроблена методика визначення допустимої величини часової дискретизації для розрахунку температур числено-аналітичним методом.

4. За допомогою FORTRAN-програми досліджені різноманітні схеми опалення і циркуляції газів в двокамерній печі і визначені конструктивні розміри печі стосовно до умов КПЦ АТ "Дніпроважмаш". Встановлено, що найбільш раціональним є рециркуляційний режим роботи печі з кратністю рециркуляції  $K \approx 2$ .

5. Досліджена динаміка процесу виходу печі на циклічний режим роботи. Перехідний процес закінчується до початку четвертого циклу роботи, т.ч. тривалість нагріву злитків стає постійною.

6. При заміні великовантажної печі із викатним подом на двокамерну отієї ж продуктивності, питомий видаток умовного палива знижується на 33...36%. Вигар металу зменшується більше ніж в два рази, у порівнянні з показниками найкращих ковальних печей, за рахунок істотного скорочення часу перебування металу в печі при високих температурах.

7. Розроблені режими нагріву в двокамерній печі холодних злитків вуглецевих і легованих марок сталі діаметром від 400 мм (1,7 т) до 1100 мм (15,6 т).

8. Одержані результати використані в проекті реконструкції печей КПЦ АТ "Дніпроважмаш", виконаному проектно-конструкторським технологічним інститутом металургійного устаткування АТ "Дніпроважмаш". Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів роботи на одній печі складає 24146 крб/рік ( в цінах 1990 р. ).

Основний зміст дисертації відбито в роботах :

1. Решение нелинейной двухмерной задачи теплопроводности

цилиндра/ Губинский В.И., Радченко Ю.Н.// Изв.вузов. Чер. металлургия. -1989. -№ 1. -С.124-127.

2.Современное состояние качества нагрева и экономии топлива в кузнечных нагревательных печах/ Радченко Ю.Н., Днепропетр. металлург. ин.-т. -Днепропетровск, 1987. -29 с.: Библиогр. 77 назв. -Деп. в УкрНИИНИ 13.04.87, № 1215-ук87.

3.Решение нелинейных задач теплопроводности численно-аналитическим методом/ Волковский О.С., Губинский М.В., Радченко Ю.Н., Днепропетр. металлург. ин.-т. -Днепропетровск, 1987. -42 с.: Библиогр. 29 назв. -Деп. в УкрНИИНИ 01.07.87, № 1812-ук87.

4.Рационализация топливоиспользования при нагреве слитков под ковку/ Пеккер А.Н., Радченко Ю.Н., Андреяченко Л.И.// Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в черной металлургии: Тез. докл. Респ. конф. -Днепропетровск, 1989. -С.46.

Радченко Ю.Н. Разработка технологии нагрева слитков в камерной печи с целью энергосбережения.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.02. -металлургия черных металлов, Государственная металлургическая Академия Украины, Днепропетровск, 1995. -Рукопись, с.121, табл.15, рис.24, библиогр.-73.

Содержит результаты разработки принципиальной схемы двухкамерной печи для нагрева слитков под ковку с глубокой утилизацией теплоты уходящих газов и технологии нагрева в этой печи. Установлено, что двухкамерная печь с предварительным подогревом металла, обеспечивает улучшение технико-экономических показателей при заданном качестве нагрева и производительности.

Radchenko Y.N. Technology working out of bullions heating in chamber's furnace for the purpose of low power inputs. -Master's thesis on the speciality 05.16.02. - ferrous metallurgy. State Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, 1995. -Manuscript, p.-121, tabl.-15, fig.-24, ref.-73.

Considers the results of working out the principal plan of two-chamber's furnace for heating of bullions for forging with deep utilization of gasesheat which is spent. As well as technology of heating in this furnace. It is proved, that two-chamber's furnace with preheating of metal, raises technical and economical indices at necessary quality of heating and productivity.

Key words: chamber's furnace, power inputs, preheating, recirculation.

Ключові слова: камерна піч, енергозбереження, попередні підігрів, рециркуляція.





Відомості про авторів та редакційну раду  
Державного інституту інженерів інструментальних заводів  
України, Київ, 1989. 112 с. ISBN 5-7045-0111-1.  
Відомості про результати експериментів, проведені в  
Державному інституті інженерів інструментальних заводів  
України, Київ, 1989. 112 с. ISBN 5-7045-0111-1.  
Відомості про результати експериментів, проведені в  
Державному інституті інженерів інструментальних заводів  
України, Київ, 1989. 112 с. ISBN 5-7045-0111-1.  
Відомості про результати експериментів, проведені в  
Державному інституті інженерів інструментальних заводів  
України, Київ, 1989. 112 с. ISBN 5-7045-0111-1.  
Відомості про результати експериментів, проведені в  
Державному інституті інженерів інструментальних заводів  
України, Київ, 1989. 112 с. ISBN 5-7045-0111-1.  
Відомості про результати експериментів, проведені в  
Державному інституті інженерів інструментальних заводів  
України, Київ, 1989. 112 с. ISBN 5-7045-0111-1.  
Відомості про результати експериментів, проведені в  
Державному інституті інженерів інструментальних заводів  
України, Київ, 1989. 112 с. ISBN 5-7045-0111-1.

### ОПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАГРІВА ЗЛИТКІВ В КАМЕРНІЙ ПЕЧІ..

Відповідальний за випуск Паніотов Ю. С.

Підписано до друку 19.05.95. Формат 60x84/16. Папір друкарський. Офсетний друк. Умовн. фарб.-віаб. 1,16. Облік. вид. арк. 1,16. Тираж 50. Замовлення N 275. Замовлене. Ціна договірна. Видавничо-поліграфічне орендне підприємство "Дніпро". ВПОП "Дніпро", 320070, м. Дніпропетровськ, вул. Серова, 7.

448482

A

AB 32.529

AB 32.529