

І.М. Карп, К.Є. П'яних, А.А. Лисенко

Інститут газу НАН України, Київ

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕХНІЧНОГО ПЕРЕОСНАЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЕЧЕЙ МАШИНОБУДІВНИХ ЗАВОДІВ НА ОСНОВІ ГЛИБОКОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННОЇ ТЕПЛОТИ ТА ЗМЕНШЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ



Наведені основні напрямки удосконалення теплової роботи камерної печі періодичної дії, які базуються на аналізі теплових втрат. Проведено аналіз заходів по модернізації печі, що дає можливість зменшити використання природного газу більше ніж у 2 рази, а також підвищити якість теплової обробки металу.

Ключові слова: енергозбереження, математична модель, пальник регенеративний, підігрів повітря, піч періодичної дії.

АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАВДАННЯ

Основним показником теплової роботи печей машинобудівних заводів є їх економічність при дотриманні вимог щодо якості термообробки металу. Споживання теплової енергії в більшості нагрівальних печей вітчизняних підприємств істотно (в ряді випадків — в рази) і перевищує рівень, досягнутий в промислово розвинених країнах [1]. Після різкого підвищення вартості природного газу негативний вплив його перевитрат, раніше не так помітний, відчули всі підприємства металообробної промисловості. Для зменшення використання газу необхідно провести реконструкцію печей, засновану на аналізі їх роботи. Для виконання такого аналізу необхідне проведення математичного моделювання, основне завдання якого — оцінка складових теплових втрат на нагрів металу в печі.

Використання палива у будь-якому тепловому агрегаті супроводжується тепловими втрата-

ми, оцінка розміру яких проводиться на базі розрахунку теплового балансу печі [2]. Основні втрати при роботі печей: втрати з відхідними газами, втрати через огорожуючі конструкції та втрати за рахунок неповноти згоряння. У печах періодичної дії до складу втрат через огорожуючі конструкції долучаються втрати на акумуляцію теплової енергії цими конструкціями та опорами (на яких розміщують садку). Аналіз теплового балансу з визначенням частки енергії, що використовується корисно, та оцінкою розподілу теплових втрат між різними їх складовими є основою для проведення модернізації теплового агрегату.

Нами була поставлена задача визначення і обґрунтування найбільш ефективних заходів, що забезпечують зменшення використання природного газу в камерних печах періодичної дії для нагрівання під ковку або штамповку та термічної обробки металевих виробів.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕЧІ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ

Дослідження проводилися на печі штучного старіння ПАТ «Центроліт» (м. Суми), осна-

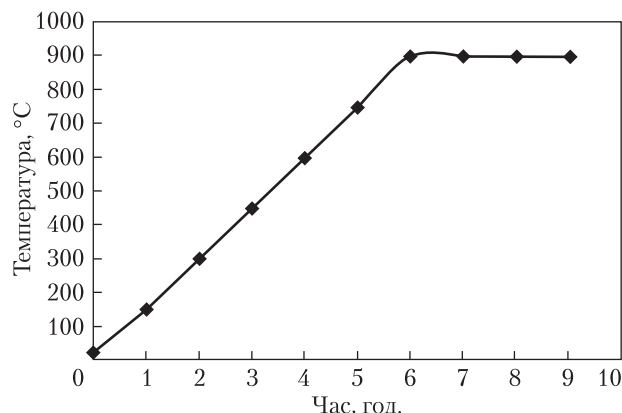


Рис. 1. Графік термообробки металу в печі штучного старіння

шеної викотним подом. Піч являє собою прямокутну камеру, викладену із шарів шамотної та діатомітової цегли. Піч працює на природному газі, обладнана 12-ма інжекційними пальниками, розташованими по 6 пальників на бокових стінах в один ярус.

Видалення продуктів згорання проводиться через 12 димовідвідних каналів, розташованих в подині по 6 димовідвідних каналів вздовж обох бокових стін печі, які з'єднуються з димовивідними каналами (боровими), що розташо-

вані під піччю. Із борів димові гази за допомогою димососа видаляються в атмосферу через димову трубу.

Основні характеристики печі приведені в табл. 1, графік термічної обробки металу наведений на рис. 1.

МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження виконані з використанням математичної моделі теплової роботи печі періодичної дії, яка включає: розрахунок горіння палива, розрахунки нагрівання металу, виконані на основі методу теплової діаграми; визначення втрат теплоти робочим простором печі, витрат палива і температури підігріву повітря в рекуператорі [3].

При виконанні досліджень приймалися такі припущення та спрощення: співвідношення газ—повітря в пальникових пристроях вибрано оптимальним (коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,05$); прогрівання кладки в усіх напрямках йде однаково; опори і садка прогріваються згідно з графіком термічної обробки по всій товщині.

Піч експлуатується періодично, тому частина теплової енергії йде на зміну теплоємності огорожуючих конструкцій. Ця зміна враховувалась рішенням рівняння теплопровідності при нестационарному режимі:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

Рішення знаходилося чисельно із застосуванням методу кінцевих різниць. При цьому диференціальне рівняння (1) представлялося у вигляді кінцево-різницевого:

$$\frac{T_{i-1,\tau} - 2 \cdot T_{i,\tau} + T_{i+1,\tau}}{(\Delta x)^2} = \frac{T_{i,\tau+\Delta\tau} - T_{i,\tau}}{a \cdot \Delta\tau} \quad (2)$$

де T — температура у відповідному вузлі просторової сітки; a — коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м² · К); Δx і $\Delta\tau$ — крок кінцево-різницевої сітки по довжині і часу, м.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розрахунки теплового балансу печі періодичної дії в існуючому стані представлені в

Таблиця 1

Технічні характеристики печі

Найменування	Одиниці вимірювання	Показники
Поверхня огорожувальних конструкцій (печі)	м ²	80
Вага металу (вага садки), середня	кг	4330
Вага металу, з якого виконані опори	кг	11200
Температура нагріву металу	°C	900
Темп нагрівання	°C/год	150
Товщина кладки	мм	170
Щільність кладки	кг/м ³	1900
Вага кладки	кг	70800
Паливо	природний газ	
Спосіб нагріву	відкритий нагрів продуктами згорання	

табл. 2. Розподіл втрат теплової енергії при нагріванні металу в печі старіння для її існуючого стану в перерахунку на природний газ наведений на рис. 2.

Аналіз результатів розрахунку існуючого стану печі старіння показав, що найбільші втрати теплової енергії (більше 45 %) приходяться на її акумуляцію кладкою в процесі нагрівання; втрати з фізичною теплотою продуктів згорання становлять 28 %, а втрати на нагрівання опор — 19 %. З урахуванням результатів аналізу в першу чергу необхідно приділити увагу втратам на акумуляцію, знизити які можна за рахунок використання волокнистих теплоізоляційних матеріалів.

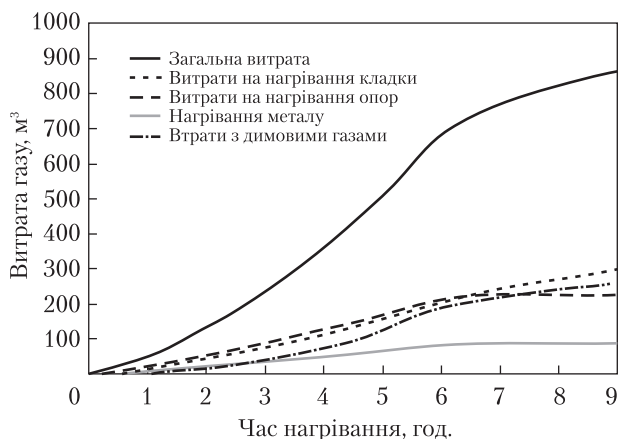


Рис. 2. Витрата природного газу при нагріванні металу

Таблиця 2

Результати розрахунків нагрівання металу в печі нормалізації

Складові витрати природного газу	Витрата газу на нагрівання в часі термічного циклу																	
	1 год		2 год		3 год		4 год		5 год		6 год		7 год		8 год		9 год	
	м³	%	м³	%	м³	%	м³	%	м³	%	м³	%	м³	%	м³	%	м³	%
Нагрівання кладки	21	30	58	36	105	39	162	40	228	41	303	41	361	44	407	45	449	45
Нагрівання опор	31	45	63	39	94	35	126	31	157	28	189	26	189	23	189	21	189	19
Втрати з димовими газами	4	6	16	10	37	13	67	17	109	20	165	23	198	24	232	26	278	28
Корисні витрати на нагрівання металу	12	17	24	15	36	13	49	12	61	11	73	10	73	9	73	8	73	7
Сумарні витрати	69	100	161	100	273	100	404	100	556	100	730	100	820	100	901	100	989	100

Таблиця 3

Залежність теплових втрат при роботі печі старіння на акумуляцію енергії огорожувачими конструкціями від товщини теплоізоляції

Складові витрати природного газу	Витрати газу (%) на нагрівання, год			
	25 мм	50 мм	100 мм	150 мм
Нагрівання теплоізоляції	1,7	3,5	7,2	10,3
Нагрівання кладки	35,7	28,5	16,3	7,4
Нагрівання опор	25,0	29,6	37,2	42,8
Втрати з димовими газами	28,0	27,0	24,9	22,9
Корисні витрати на нагрівання металу	9,7	11,4	14,4	16,5
Сумарні витрати	100,0	100,0	100,0	100,0

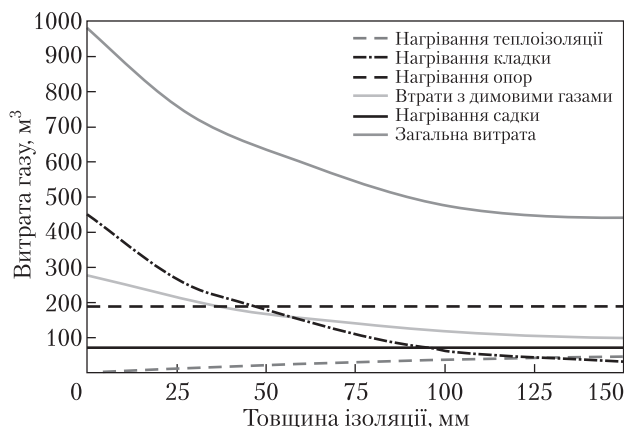


Рис. 3. Залежність витрати газу на термообробку садки в печі штучного старіння від товщини теплоізоляції

Для аналізу впливу встановлення теплоізоляції на ефективність використання природного газу в печі старіння здійснено дослідження випадків встановлення теплоізоляційних матеріалів товщиною 25; 50; 100 і 150 мм (див. табл. 3). Результати розрахунку теплового балансу печі за умови встановлення теплоізоляції товщиною 150 мм наведені в табл. 4.

Проаналізувавши отримані дані, можна зробити висновок, що встановлення теплоізоляційних матеріалів дає можливість суттєво знизити витрати газу на акумуляцію теплоти огорожувальних конструкцій. Це є найбільшим резервом економії для печей періодичної дії. Зниження витрат на акумуляцію призводить

до супутнього зменшення втрат з відхідними газами через зменшення кількості продуктів згорання, що утворюється при роботі печі.

Залежність витрати газу на нагрівання металу від товщини ізоляції наведений на рис. 3. Частина витрат на нагрівання опор, на які встановлюється садка, сягає 42 % від витраченої енергії. Зниження витрат на нагрівання опор має призвести до супутнього зниження втрат з продуктами згорання. Втрати з продуктами згорання після встановлення теплоізоляційних матеріалів будуть становити 23 % від витраченої на термообробку енергії, що підвищує ефективність застосування рекуперації теплоти або використання регенераторів.

УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ

У високотемпературних процесах термічної обробки металів втрати теплової енергії з продуктами згорання досить суттєві. За результатами досліджень втрати теплової енергії з димовими газами для печі старіння становлять 23 %. Зменшення цієї складової — обов'язкова умова ефективного використання палива. Рекуперативні теплообмінники дають можливість підігрівати повітря не більше ніж до 600 °С, а для переважної більшості рекуператорів, що використовуються в промисловості, цей показник не перевищує 400 °С. У відповідності до даних розрахунків впливу температури підігріву повітря (рис.4) на ККД процесу тер-

Таблиця 4

Тепловий баланс печі старіння (товщина ізоляції 150 мм)

Складові витрати природного газу	Витрати газу (%) на нагрівання								
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	6 год	7 год	8 год	9 год
Нагрівання теплоізоляції	4,5	6,1	7,1	7,9	8,4	8,7	9,7	10,1	10,3
Нагрівання кладки	0,0	0,0	0,2	0,5	1,1	1,9	3,4	5,3	7,4
Нагрівання опор	64,4	60,8	57,6	54,7	51,8	49,1	46,9	44,8	42,8
Втрати з димовими газами	6,1	9,7	12,8	15,8	18,7	21,4	21,9	22,4	22,9
Корисні витрати на нагрівання металу	24,9	23,5	22,3	21,1	20,0	19,0	18,1	17,3	16,5
Сумарна витрата	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

мообробки при різних робочих температурах зростання температури повітря горіння з 400 до 800 °С для процесу з температурою 1000 °С дає можливість підвищити цей показник в 1,5 рази (з 20 до 35 %).

Підігрів повітря до 800 °С та вище може забезпечити тільки регенеративний теплообмінник. Використання регенераторів дає можливість суттєво знизити споживання природного газу в металургійних печах.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОБМІННИКА ДЛЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПАЛЬНИКА

З метою вибору насадки регенеративного теплообмінника та визначення оптимальної її теплової ємності виконані дослідження з використанням математичної моделі розрахунку теплообміну в регенеративних повітропідігрівачах [4, 5, 6]. Порівнюючи можливості використання корундових кульок та блочної стільникової кераміки, можна зробити такі висновки:

- ✦ кульки суттєво звужують прохід для виходу продуктів згоряння, що обумовлює необхідність збільшувати перетин каналу для виходу газів (різниця в більшості випадків перевищує 20 %);
- ✦ площа теплообміну в одиниці об'єму насадки, виготовленої з блочної стільникової кераміки суттєво перевищує аналогічний показник для насадки, виготовленої з кульок (рис. 5); вага насадки, виготовленої з стільникових керамічних блоків, менша за насадку з кульок.

Виходячи з цих висновків, при розробці пальника з регенеративним теплообмінником було прийнято використання стільникової кераміки. Проведено дослідження для використання блоків з кількістю чарунок 40 × 40; 30 × 30; 25 × 25; 20 × 20. Вибір кількості блоків та їх характеристик зроблено на базі розрахунку, який показав, що збільшення питомої площі поверхні блоку сприяє зменшенню кількості блоків. Залежність кількості блоків від розміру чарунки показана на рис. 6.

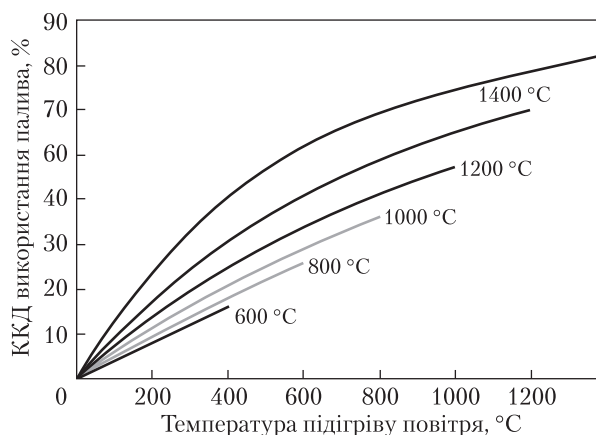


Рис. 4. Залежність ККД використання палива від температури підігріву повітря за рахунок утилізації теплоти видихних газів для процесів з різним рівнем температур

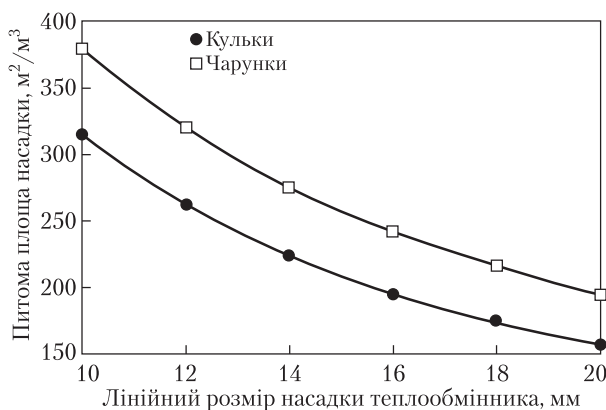


Рис. 5. Питомою площа насадок регенеративних теплообмінників

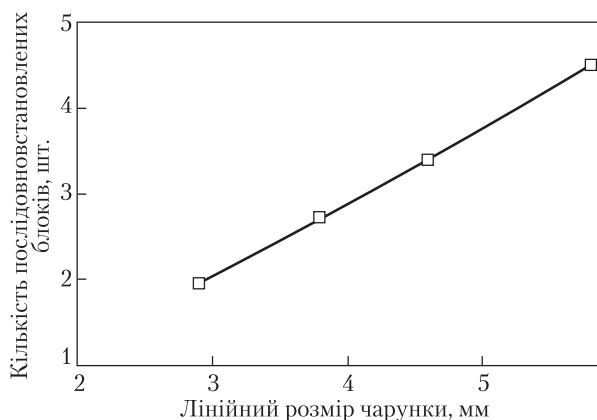


Рис. 6. Залежність кількості блоків у регенеративній насадці від розміру чарунки

Для забезпечення роботи пальника потужністю 150 кВт при температурі в печі до 950 °С та розрахунковій температурі підігріву повітря до 800 °С нами було запропоновано використання блоків з кількістю каналів 40 × 40 і чарунками розміром 2,9 × 2,9 мм.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

За результатами розрахунків рекомендовано модернізацію печі старіння ПАТ «Центроліт» (м. Суми). Основні заходи спрямовані на зменшення втрат з акумуляцією теплової енергії огорожуючими конструкціями та втрат з відхідними газами.

Вперше теплоізоляційні блоки використано одночасно зі встановленням цегляного каркасу печі. При цьому зовнішній шар печі викладено з шамотної цегли класу Б, а внутрішній шар — з теплоізоляційних модульних блоків (керамічних волокон) розмірами 300 × 300 × 250 мм. Такий підхід дозволив знизити вимоги до якості матеріалу теплоізоляційних блоків і зменшити вплив стану теплоізоляції на якість роботи печі. Вихід з ладу окремого блоку (що відбувається час від часу на сучасних печах) жодним чином не вплине на роботу печі та не призведе до аварії.

Встановлено регенеративні пальникові пристрої, які складаються з комбінованого пальника і регенератора, в пальнику організовано рециркуляцію охолоджених димових газів, на дані регенеративні пальники отримано патент на корисну модель № 70467. Використання рециркуляції продуктів згорання дало можливість знизити утворення забруднюючих речовин при роботі печі, які при термообробці сталі становили: $CO_{(\alpha=1,0)} = 14,4 \text{ мг/м}^3$; $NOx_{(\alpha=1,0)} = 159,7 \text{ мг/м}^3$.

Завдяки проведеній модернізації витрата палива на нормалізацію виробів із чавуну знизилась з 450 м³/год до 170 м³/год. Проведена модернізація також дала можливість здійснювати в печі нормалізацію виробів із сталі, чого було неможливо здійснити до модернізації. Витрата палива на нормалізацію виробів із сталі за графіком термообробки,

наведеним на рис. 1, при вазі садки 4300 кг не перевищує 370 м³/год.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз розподілу втрат теплової енергії при роботі печі на базі розрахунку теплового балансу дає можливість оцінити на стадії розробки проекту реконструкції впливовість окремих заходів та відібрати найбільш ефективні з них.

2. Для печей періодичної дії найбільшою складовою втрат теплової енергії є втрати з акумуляцією енергії огорожуючими конструкціями. Використання волокнистих матеріалів для ізоляції цих конструкцій зменшує втрати на акумуляцію теплової енергії, призводячи при цьому до зменшення втрат з відхідними газами.

3. Другим за дієвістю фактором, який впливає на ефективність використання палива, є утилізація теплоти відхідних газів. Використання регенеративних пальників та регулювання співвідношення газ—повітря при роботі високотемпературних печей термічної обробки дає можливість додатково знизити витрати палива на 20 %.

Комплексна модернізація печі періодичної дії дає можливість знизити витрати палива при її експлуатації в 2,5 рази і більше, що підтверджено на прикладі печі старіння ПАТ «Центроліт» (м. Суми).

ЛІТЕРАТУРА

1. Губинский В.И. Нагревательные печи металлургии — сегодня и завтра // Теория и практика металлургии. — 2004. — № 6. — С. 56—60.
2. Аверин С.И. и др. Расчеты нагревательных печей. — Харьков: Техника, 1969. — 540 с.
3. Расчет нагревательных и термических печей // Справ. изд. под ред. Тымчака В.М. и Гусовского В.Л. — М.: Металлургия, 1983. — 480 с.
4. Лемлек И.И., Гордин В.А. Высокотемпературный нагрев воздуха в черной металлургии. — М.: Металлургиздат, 1983. — 357 с.
5. Блох А.Г. Теплообмен излучением: справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 432 с.
6. Кадников С.Н., Ометова М.Ю. Математическое моделирование процессов теплообмена в регенеративном воздухоподогревателе. — Иваново (РФ): Вестник ИГЭУ, 2004. — Вып. 5.

И.Н. Карп, К.Е. Пьяных, А.А. Лысенко

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРЕОСНАЩЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДОВ
НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ
ВТОРИЧНОЙ ТЕПЛОТЫ И УМЕНЬШЕНИЯ
ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ

Представлены основные направления совершенствования тепловой работы камерной печи периодического действия, основанные на анализе тепловых потерь. Проведен анализ мероприятий по модернизации печи, который дает возможность уменьшить использование природного газа больше чем в 2 раза, а также повысить качество тепловой обработки металла.

Ключевые слова: энергосбережение, математическая модель, горелка регенеративная, подогрев воздуха, печь периодического действия.

I.N. Karp, K.E. Pyanykh, A.A. Lysenko

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES
TECHNICAL RE-EQUIPMENT
OF PROCESS FURNACES PLANTS BASED
ON A THOROUGH UTILIZATION
OF SECONDARY HEAT AND
REDUCE HEAT LOSS

The article presents the main directions of improving thermal performance of the chamber furnace of periodic action, based on the analysis of heat loss. The analysis of measures to upgrade the furnace, which makes it possible to reduce natural gas usage more than 2 times, and improve the quality of heat treatment of metal.

Key words: energy-saving, mathematical model, regenerative burner, heated air, furnace of periodic action.

Стаття надійшла до редакції 11.05.12