

УДК 621.783

Іванов Віктор Ілліч ⁽¹⁾, старший науковий співробітник
Чепрасов Олександр Іванович ⁽¹⁾, професор, кандидат технічних наук
Каюков Юрій Миколайович ⁽¹⁾, доцент, кандидат технічних наук
Назар Петро Іванович ⁽²⁾, начальник цеху

РАЦІОНАЛЬНЕ РОЗМІЩЕННЯ ВСТАНОВЛЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОПЕЧЕЙ ОПОРУ ЗА ВИСОТОЮ НАГРІВАЛЬНОГО КОВПАКА

⁽¹⁾ Запорізька державна інженерна академія

⁽²⁾ ПАТ «Запорізький сталепрокатний завод»

Виконано комплекс експериментів з дослідження зовнішнього теплообміну в робочому об'ємі ковпакових електропечей опору з використанням електротеплового моделювання. Запропоновано рекомендації щодо раціонального розміщення встановленої потужності зазначених електропечей за висотою нагрівального ковпака для нагрівання металу з мінімальною нерівномірністю розподілу температури за осьовим та радіальним напрямом стопи бунтів дроту.

Ключові слова: ковпакова електропечі, нагрівальний ковпак, розміщення встановленої потужності, бунт дроту, нагрівання під термічну обробку

Вступ. Теплова робота ковпакових електропечей опору характеризується наявністю нерівномірного розподілу температури, як у осьовому напрямі стопи, так і радіальному напрямі бунтів (рулонів) металу, що нагрівають.

Мінімальний рівень температури, що зафіксовано у зоні дії нагрівачів опору першої (нижньої) зони, зумовлено відсутністю надійної ізоляції між стендом електропечі й основиною нагрівального ковпака, анізотропією теплофізичних властивостей стопи бунтів дроту та рулонів листового прокату, а також розміщенням гарячого нагрівального ковпака (з температурою 650...700 °С) перед початком нагрівання металу на холодному стенді печі.

Як встановлено експериментами, що виконано на декількох металургійних підприємствах [1-4], розміщення нагрівачів опору в робочому об'ємі печей зазначеного типу суттєво впливає на рівномірність нагрівання сталевих прокатів.

Відсутність рівномірності розподілу температури в робочому об'ємі таких електропечей супроводжується значною неоднорідністю якісних показників металу. В зв'язку з цим актуальним є вивчення впливу поля температури в робочому об'ємі зазначених печей та розподілу потужності за висотою нагрівального ковпака на якість нагрівання стопи бунтів (рулонів) металу.

Постановка завдання. Дослідження процесу зовнішнього теплообміну в робочому об'ємі ковпакових електропечей опору та розробка рекомендацій щодо раціонального розміщення встановленої потужності за висотою нагрівального ковпака.

Головна частина досліджень. Дослідження

виконували з використанням електротеплового моделювання. Модель подавали як систему, що містить кладку поверхні стенду, стін і зведення ковпака електропечі, нагрівачі опору, муфель, зовнішню та внутрішню бічні поверхні стопи бунтів (рулонів), яку за висотою поділяли на ряд ділянок (умовних зон) [5].

Під час побудови моделі кутові коефіцієнти випромінювання у стопі бунтів дроту, що розглядали як порожнистий циліндр обмеженої довжини, обчислювали за відомою формулою [6]. Визначення кутових коефіцієнтів випромінювання у кільцевій зоні, яку обмежено внутрішньою та зовнішньою бічними поверхнями муфеля, а також внутрішньою бічною поверхнею нагрівального ковпака, виконували за допомогою метода «уявних» поверхонь [7].

Перевірку моделі на адекватність реальному процесу виконували за результатами теплового експерименту в ковпакових електропечах типу ПСК [8]. Встановлено, що поле потенціалів, яке одержано на моделі, має достатню збіжність з полем температури, зафіксованим у стопі рулонів металу за виробничих умов.

На початковому етапі досліджень на електротепловій моделі визначали поле температури кладки нагрівального ковпака, яке змінюється під час нагрівання стопи бунтів (рулонів), і виявляли розподіл температури за висотою муфеля та нагрівачів. Далі вибирали параметри окремих нагрівачів, що забезпечують раціональне значення корисних теплових потоків на різних ділянках за висотою стопи, та виконували пошук оптимального розміщення потужності зазначених нагрівачів за висотою ковпака печі, під час реалізації якого досягають нагрівання бічної поверхні бунтів (рулонів) металу з мінімальною

неоднорідністю температури.

Під час експериментів¹ на моделі встановлено, що перерозподіл потужності нагрівачів у другій і вище розміщених зонах нагрівального ковпака не має помітного впливу на рівномірність поля температури за висотою стопи бунтів (рулонів) металу, проте умови їх розміщення значно ускладнюються. В зв'язку з цим детальніше розглядали теплову роботу першої зони ковпака, де розташовують три стрічкові нагрівачи однакової довжини та потужності, які виконано у вигляді окремих кільцевих зигзагів на різних рівнях щодо її висоти.

Численними експериментами на електротепловій моделі² отримано рівняння у безрозмірному виді, які описують раціональний діапазон змінювання потужності та довжини нагрівачів окремих кільцевих зигзагів залежно від рівня їх розміщення за висотою першої зони:

$$\bar{P}_i = (32,2...67,5) + (22,5...46,0)H_i - (27,2...73,5)H_i^2; \quad (1)$$

$$\bar{L}_i = (9,6...30,5) + (7,9...63,8)H_i - (3,7...25,6)H_i^2, \quad (2)$$

де \bar{P}_i – відносна потужність нагрівачів i -го кільцевого зигзага; $\bar{P}_i = P_i / \sum P_i$; P_i , $\sum P_i$ – потужність нагрівачів i -го кільцевого зигзага та загальна потужність першої зони нагрівального ковпака відповідно; \bar{L}_i – відносна довжина нагрівачів i -го кільцевого зигзага; $\bar{L}_i = L_i / \sum L_i$; L_i , $\sum L_i$ – довжина нагрівачів i -го кільцевого зигзага та розрахункова загальна довжина нагрівачів першої зони ковпака відповідно; $\sum L_i = K \cdot \sum L_{i,0}$; K – поправковий коефіцієнт, $K = 1,0...1,25$; $\sum L_{i,0}$ – загальна довжина нагрівачів першої зони, які виконано однакової довжини, м; $\sum L_{i,0} = 9U^2 \cdot S / \sum P_i \cdot \rho$; U – напруга, що підводять до нагрівачів, В; S – площа поперечного перерізу нагрівача, м²; ρ – питомий електричний опір матеріалу нагрівача, Ом·мм²/м; \bar{H}_i – відносна висота розміщення нагрівачів i -го кільцевого зигзага; $\bar{H}_i = H_i / H$; H_i , H – відстань від подовжньої осі i -го кільцевого зигзага до основи нагрівального ковпака та висота першої зони ковпака відповідно, м.

Під час розглядання рівнянь (1) і (2) видно, що раціонального розміщення потужності нагрівачів у межах першої зони досягають змінюванням її від максимального значення для нижнього кільцевого зигзага до мінімального – для верх-

нього зигзага. Одночасно перерозподіл потужності між окремими зигзагами відбувається або у межах встановленої потужності зони, або за абсолютним її зниженням, а межові значення коефіцієнтів, що наведено у рівняннях (1) і (2), характеризують мінімально можливий та максимально припустимий ступінь перерозподілу потужності у межах зони відповідно. Окрім того, за результатами виконаного експерименту встановлено, що ступінь перерозподілу потужності щодо висоти першої зони, за якої забезпечують рівномірне нагрівання бунтів (рулонів) металу в аксиальному напрямі стопи, зростає під час підвищення температури нагрівального ковпака та збільшення нерівномірності поля температури за висотою його кладки, а також зменшення температури стенда електропечі та практично не залежить від його потужності.

Слід зазначити, що зниження потужності нагрівачів верхніх кільцевих зигзагів обмежується площею внутрішньої бічної поверхні ковпака, висотою (B) окремих зигзагів і відстанню (Δ) між ними.

Відомо, що довжину одного витка $\ell_{B,i}$ i -го нагрівача опору можна обчислити за формулою

$$\ell_{B,i} = \frac{2\ell_{n,i}}{\pi \cdot D_k} \cdot (a_i + \Delta_i), \quad (3)$$

де $\ell_{n,i}$, a_i – довжина та товщина i -го нагрівача, м, відповідно; D_k – діаметр внутрішньої бічної поверхні нагрівального ковпака, м.

З іншого боку

$$\ell_{B,i} = 2(B_i - 2a_i - \Delta_i) + \pi \cdot (a_i + \Delta_i). \quad (4)$$

У такому разі, під час прирівнювання правих частин рівнянь (3) і (4), можна отримати формулу для визначення висоти зигзага i -го нагрівача

$$B_i = (a_i + \Delta_i) \cdot \left(\frac{\ell_{n,i}}{\pi \cdot D_k} - 0,5\pi \right) + 2a_i + \Delta_i. \quad (5)$$

Звісно, що для стрічкових нагрівачів [9] $\Delta_i/b_i \geq 0,8$, де b_i – ширина нагрівача. Звідси, маючи на увазі, що $b_i = 10a_i$, можна записати

$$\Delta_i \geq 8a_i. \quad (6)$$

Після підставлення співвідношення (6) до рівняння (5) маємо

$$B_i \geq \left(\frac{2,87\ell_{n,i}}{D_k} - 4,10 \right) \cdot a_i. \quad (7)$$

З рівняння (7) виходить, що

$$\ell_{n,i} \leq \left(\frac{0,35B_i}{a_i} + 1,43 \right) \cdot D_k. \quad (8)$$

Мінімально припустима довжина нагрівача

¹ Роботу виконано під науковим керівництвом доцента, к.т.н. Усенка Ю.І.

² за участі О.М. Воробійової та Н.С.Врублевської

i -го кільцевого зигзага має бути обмеженою значенням, що обчислюють за формулою

$$l_{\min} \geq \frac{U \cdot S}{I_{\text{прин}} \cdot \rho}, \quad (9)$$

де $I_{\text{прин}}$ – припустиме значення струму за умови експлуатації електропечі, А.

Як відомо, площа поперечного перерізу стрічкового нагрівача дорівнює $S = 10a^2$, тому формулу (9) можна записати як

$$l_{\min} \geq \frac{10U \cdot a^2}{I_{\text{прин}} \cdot \rho}. \quad (10)$$

Коли довжина стрічкових нагрівачів складає величину, що є меншою за припустиме значення l_{\min} , то спостерігають збільшення струмових навантажень у силових колах зони, яке призводить до виходу з ладу електрообладнання.

Як ілюстрацію практичного використання запропонованого підходу здійснювали раціональне розміщення потужності кільцевих зигзагів у першій (нижній) зоні нагрівального ковпака електропечі типу СГЗ ПАТ «Запорізький сталепрокатний завод» для нагрівання під термічну обробку бунтів сталевго дроту марки БСтОМ. Встановлену потужність зазначеної електропечі (180 кВт) рівномірно розміщено у нагрівачах шести кільцевих зигзагів двох зон за висотою ковпака. Значення параметра H_i для кільцевих зигзагів першої зони складає: $H_1 = 0,17$; $H_2 = 0,50$; $H_3 = 0,87$. Встановлено, що градієнт температури за висотою зовнішньої та внутрішньої бічної поверхні стопи трьох щільно намотаних бунтів (зовнішній діаметр 800...900 мм, внутрішній діаметр 300...400 мм, висота 400...500 мм, маса 0,9...1,0 т) сталевго дроту діаметром 6,0 мм складає 130 і 100 °С відповідно [10].

Згідно до результатів моделювання (табл. 1), для вирішення поставленої задачі у трьох кільцевих зигзагах першої зони печі слід розмістити відповідно 39, 32 і 29 % її загальної потужності, чого досягають виконанням нагрівачів довжиною, яка складає 28,3, 34,6 і 37,1 % їх загальної довжини.

У цеху сталевго дроту зазначеного підприємства модернізацію нагрівальних ковпаків електропечей типу СГЗ виконали шляхом раціонального перерозподілу потужності у межах першої зони та здійснили серію порівняльних експериментів щодо нагрівання під термічну обробку бунтів дроту марки БСтОМ на електропечах з рівномірним і запропонованим розміщенням

встановленої потужності³.

Таблиця 1 – Параметри нагрівачів першої зони до (чисельник) і після (знаменник) модернізації електропечі

Номер зигзага	Довжина, м	Переріз, мм ²	Опір, Ом	Потужність, кВт
I	57,5	2x20	1,60	30
	52,5	2x20	1,46	33
II	57,5	2x20	1,60	30
	64,4	2x20	1,78	27
III	57,5	2x20	1,60	30
	68,8	2x20	1,92	25

Аналіз результатів експериментів за виробничих умов показує, що, після модернізації нагрівальних ковпаків печей, тривалість нагрівання різних ділянок стопи бунтів дроту до мінімально припустимого рівня температури (620 °С) зменшується на 35...42 %. Одночасно зафіксовано суттєве пониження значення градієнта температури в осьовому напрямі стопи бунтів як для зовнішньої (з 130 до 35 °С), так і внутрішньої бічної поверхні (з 100 до 30 °С).

Наступні лабораторні випробування зразків дроту від витків різних бунтів стопи на тимчасовий опір розриванню, межу плинності та відносне подовження (табл. 2) свідчать про стабільно високий рівень характеристик міцності та пластичності дроту, який піддають нагріванню під термічну обробку в електропечі з раціональним розміщенням її потужності.

Таблиця 2 – Результати механічних випробувань дроту, термічно обробленого до (чисельник) та після (знаменник) модернізації електропечі

Параметр	Бунт стопи		
	нижній	середній	верхній
σ_B , Н/мм ²	278,2...342,0	302,0...350,4	310,4...360,6
	332,8...350,6	336,0...352,5	342,2...354,5
σ_T , Н/мм ²	149,2...217,6	167,0...234,2	149,2...217,6
	186,9...230,2	191,7...236,0	202,5...241,6
δ , %	24,0...28,2	29,0...32,7	31,9...33,2
	29,6...32,4	31,4...33,5	32,4...34,5

Висновки. Відповідно до результатів електротеплового моделювання теплообміну в ковпачових електропечах опору, а також експериментів за виробничих умов, запропоновано раціональне розміщення потужності нагрівачів за висотою нагрівального ковпака.

³ В експериментах приймали участь Ю.В. Михеев та П.В. Сергеев

Бібліографічний список

1. **Горшков, Ю. Ф.** Повышение эффективности тепловой работы колпаковых электропечей [Текст] / Ю. Ф. Горшков, Ю. И. Усенко, В. Ф. Гусев и др. // Сталь. – 1978. – № 6. – С. 569-570.
2. **Мастрюков, Б. С.** Совершенствование тепловой работы многостопной колпаковой электропечи сопротивления [Текст] / Б. С. Мастрюков, В. И. Титов, Э. Д. Тузов и др. // Сталь. – 1982. – № 6. – С. 86-88.
3. **Тандура, И. П.** Повышение эффективности тепловой работы одностопных колпаковых электропечей типа ОКБ [Текст] / И. П. Тандура, В. С. Баздырев, В. И. Иванов и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1985. – № 1 (135). – С. 33-34.
4. **Усенко, Ю. И.** Повышение производительности колпаковых электропечей и качества термообработки стальной полосы в рулонах [Текст] / Ю. И. Усенко, А. Н. Минаев, Ю. Ф. Горшков и др. // Черная металлургия. – 1987. – Вып. 7 (1035). – С. 60-62.
5. **Усенко, Ю. И.** Электротепловое моделирование внешнего теплообмена в колпаковой электропечи / Ю. И. Усенко, Ю. Ф. Горшков, В. И. Иванов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1994. – № 4. – С. 81-82.
6. **Усенко, Ю. И.** Повышение тепловой эффективности колпаковых печей [Текст] / Ю. И. Усенко, А. Н. Минаев, Ю. Ф. Горшков, В. И. Иванов // Промышленная теплотехника. – 1988. – Т. 10, № 5. – С. 82-84.
7. **Сперроу, Э. М.** Теплообмен излучением [Текст] / Э. М. Сперроу, Р. Д. Сесс. – М. : Энергия, 1971. – 295 с.
8. **Мерффт, Ю. К.** Тепловой расчет электропечей сопротивления [Текст] / Ю. К. Мерффт, Г. К. Рубин, И. А. Фельдман. – М. : ВНИИЭТО, 1977. – 160 с.
9. **Свенчанский, А. Д.** Электрические промышленные печи [Текст] / А. Д. Свенчанский. – М. : Металлургия, 1975. – Ч. 1. – 384 с.
10. **Усенко, Ю. И.** Совершенствование процесса нагрева бунтов стальной проволоки в одностопных колпаковых электропечах типа СГЗ [Текст] / Ю. И. Усенко, Ю. В. Михеев, В. И. Иванов и др. // Черная металлургия. – 1993. – Вып. 7 (1119). – С. 30-32.

Иванов Виктор Ильич, старший научный сотрудник кафедры металлургии, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

Чепрасов Александр Иванович, кандидат технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: alex.i.cheprasov@gmail.com

Каюков Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: lenajura2010@gmail.com

Назар Петр Иванович, начальник сталепроволочного цеха, ПАО «Запорожский сталепрокатный завод» (Украина, Запорожье). E-mail: market.tdm@yandex.ru

РАЦИОНАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО ВЫСОТЕ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО КОЛПАКА

Выполнен комплекс экспериментов по исследованию внешнего теплообмена в рабочем объеме колпаковых электропечей сопротивления с использованием электротеплового моделирования. Предложены рекомендации по рациональному размещению установленной мощности электропечи по высоте нагревательного колпака, обеспечивающие нагрев металла с минимальной неравномерностью в осевом и радиальном направлении стопы бунтов проволоки.

Ключевые слова: колпаковая электропечь, нагревательный колпак, размещение установленной мощности, бунт проволоки, нагрев под термическую обработку

Ivanov Viktor, Senior Staff Scientist of Metallurgy Department, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

Cheprasov Alexander, Candidate of Technical Sciences, professor of Department of Heat Power Engineering and Hydroenergetics, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: alex.i.chepraov@gmail.com

Kayukov Yuriy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Heat Power Engineering and Hydroenergetics, Zaporizhzhia State Engineering Academy, (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: lenajura2010@gmail.com

Nazar Peter, Head of Steel-Wire Shop, PAJ «Zaporizhzhia Steel-Rolling Plant» (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: market.tdm@yandex.ru

RATIONAL ALLOCATION OF THE INSTALLED CAPACITY FOR ELECTRIC RESISTANCE FURNACES ON HEIGHT OF HEATING BELL

The complex of experiments on study of external heat exchange in the work volume of bell-type electric resistance furnaces with the use of electro-thermal modeling is executed. Recommendation on the rational allocation of the installed capacity of electric furnace on height of heater bell, providing heating of metal with

the minimum unevenness of temperature distribution in axial and radial direction of wire stack bundles are offered.

Keywords: bell-type electric furnace, heating bell, allocation installed capacity, bundle of wire, heating under thermal treatment

Стаття надійшла до редакції 14.02.2018 р.

Рецензент, проф. І.Г. Яковлева

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>