

УДК 785.3:621.383.245

DOI:10.26661/2071-3789-2019-1-41-16

Усенко Юрій Іванович ⁽¹⁾, доцент, кандидат технічних наук
Іванов Віктор Ілліч ⁽²⁾, старший науковий співробітник
Чепрасов Олександр Іванович ⁽²⁾, професор, кандидат технічних наук
Зінченко Володимир Юрійович ⁽²⁾, доцент, кандидат технічних наук
Каюков Юрій Миколайович ⁽²⁾, доцент, кандидат технічних наук
Полешко Юрій Павлович ⁽³⁾, начальник цеху

ТЕПЛОВА РОБОТА ПРОТЯЖНИХ ЕЛЕКТРОПЕЧЕЙ ЗА НАГРІВАННЯ СТАЛЕВОГО ДРОТУ ПІД ТЕРМООБРОБКУ

⁽¹⁾ Національна металургійна академія України, м. Дніпро

⁽²⁾ Запорізька державна інженерна академія
 ВАТ «Дніпрометиз», м. Дніпро

Подано результати розробки алгоритму аналітичного дослідження процесу нагрівання сталевих дротів під термічну обробку в протяжних електропечах типу СПЗ перед гарячим цинкуванням. Розроблено заходи щодо раціонального перерозподілу теплової потужності печей за довжиною робочого об'єму, а також зниження до мінімуму втрат теплоти через склепіння та бокові стіни другої та третьої зон.

Ключові слова: протяжні електропечі, сталевий дріт, раціональний температурний режим, футерівка склепіння та бокових стін, дослідження

Вступ. На деяких підприємствах України з виробництва метизів сталевий дріт марки 08 і 012 перед гарячим оцинкуванням піддають нагріванню під термообробку в горизонтальних протяжних електропечах типу СПЗ транспортуванням кожної нитки через окремий муфель. Печі обладнані стрічковими нагрівачами опору, об'єднаними у чотири зони регулювання температури (I - 850 °C; II - 850 °C; III - 840 °C; IV - 830 °C), а також муфелями циліндричної форми, розташованими над ними.

Практика експлуатації печей такого типу показала, що під час їх роботи зафіксовано значну витрату електроенергії та суттєві втрати теплоти випромінюванням через склепіння і бічні стіни другої та третьої зон робочого об'єму.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка енергозбережного режиму нагрівання сталевих дротів під термообробку в протяжних електропечах, а також пошук раціонального конструктивного вирішення щодо підвищення теплоізоляційної здатності футерівки склепіння та бічних стін.

Головна частина досліджень. На першому етапі розглядали процес нагрівання сталевих дротів під термообробку в зазначених агрегатах. Автори використовували алгоритм аналітичного дослідження, що містить процедуру пошуку раціонального температурного режиму, який забезпечує одержання металу з аналогічними показниками якості за нижчої питомої витрати електроенергії. До основи алгоритму покладено

рівняння нагрівання термічно тонкого тіла за променистим теплообміном на зовнішній поверхні з коефіцієнтами тепловіддачі, які залежать від температури робочого об'єму печі та поверхні металу, що нагрівають. Алгоритм реалізує відомий принцип економічного управління протяжними електропечами [1,2], що передбачає інтенсифікацію нагрівання металу в зонах, останніх за ходом його транспортування, для забезпечення мінімальних енергетичних витрат на його реалізацію. Справедливість такого принципу було багаторазово підтверджено практикою [2,3].

Для адаптації алгоритму до умов роботи горизонтальної протяжної електропечі використовували раніше одержані результати експериментів [4-6]. За критерій ідентифікації приймали максимальне відхилення розрахункових та експериментальних значень температури дроту в зонах печі, значення якого не повинно перевищувати 2,0 % вимірюваної величини для режиму, що передбачено технологічною інструкцією. Встановлено, що максимальне відхилення температури для різної швидкості транспортування дроту не перевищує заданого значення (табл. 1), тобто зафіксовано адекватність запропонованої моделі реальному процесу.

Таблиця 1 – Значення відносної погрішності ($\Delta T_{\max}$) адаптації моделі

Швидкість транспортування, м/хв.	$\Delta T_{\max}$, % за зонами			
	I	II	III	IV
18,9	1,37	1,22	1,17	0,87
22,0	1,44	1,35	1,21	1,04
24,7	1,65	1,45	1,30	1,12
27,2	1,87	1,62	1,41	1,29

Під час наступного коригування існуючого температурного режиму нагрівання сталевго дроту під термообробку в електропечах типу СПЗ дотримували виконання таких вимог:

– пониження питомої витрати електроенергії до мінімально можливого значення із збереженням незмінних значень якісних показників металу;

– завершення періоду нагрівання сталевго дроту за температури 810 ± 5 °С у кінці третьої зони печі;

– обмеження рівня температури в робочому об'ємі печі значенням 900 °С для запобігання передчасному виходу з ладу нагрівачів опору та пониження стійкості футерівки її склепіння і бічних стін.

Динаміку нагрівання дроту в i -ій зоні горизонтальної протяжної електропечі, що вміщує i зон, можна описати рівнянням

$$\frac{dT(\ell)}{d\ell} = \frac{1}{v \cdot \theta_i} \cdot [T_{i\hat{a}+,i} - T(\ell)], \quad 0 \leq \ell \leq L_i, \quad (1)$$

де $T(\ell)$ – температура металу в точці ℓ за довжиною i -ої зони електропечі; L_i – довжина i -ої зони електропечі; v – швидкість руху дроту через електропіч; θ_i – деяка постійна часу, яку визначають під час ідентифікації моделі (1) для i -ої зони; $T_{i\hat{a}+,i}$ – температура робочого об'єму в i -ій зоні.

Використовуючи розв'язання рівняння (1), можна показати, що температура металу на початку $T_{i\hat{a}+,i}$ та в кінці $T_{i\hat{a}+,i}$ зони, а також температура робочого об'єму зони $T_{i\hat{a}+,i}$ пов'язані співвідношенням

$$T_{i\hat{a}+,i} = -(T_{i\hat{a}+,i} - T_{i\hat{a}+,i}) \cdot \exp\left(\frac{-L_i}{v \cdot \theta_i}\right). \quad (2)$$

Розрахунок розподілу температури за зонами протяжної печі починають з останньої за хо-

дом руху дроту зони IV. Одночасно, виходячи з принципу економного управління, вважають, що температуру в цій зоні підтримують на максимально припустимому рівні.

З технологічної інструкції визначають задану середньомасову температуру дроту на виході з печі $\bar{O}_{i,\hat{a}+}$. Знаючи швидкість руху дроту v , параметр θ_i для зони IV, значення $T_{i\hat{a}+,IV}$ і L_{IV} , з використанням співвідношення (2) обчислюють температуру $\bar{O}_{i,\hat{a}+,IV}$, яку повинен мати дріт на вході до зони IV, або, що теж саме, температуру дроту на виході із зони III. Далі порівнюють значення температури дроту на виході із зони III ($T_{i\hat{a}+,0}$) $T_{i\hat{a}+,IV}$ з її температурою на вході до зони $T_{i,\hat{a}+,i}$. Якщо $T_{i,\hat{a}+,i} < T_{i\hat{a}+,IV}$, то вважають, що в зоні IV температуру слід підтримувати на максимально припустимому рівні та переходять до розрахунку температури в зоні III, що здійснюють аналогічно розрахунку температури в зоні IV.

Якщо під час розрахунків температури в якій-небудь зоні печі виявиться, що її значення менше мінімально припустимого рівня для цієї зони, то температуру підтримують на зазначеному рівні та здійснюють перерахунок заданого значення температури в наступній зоні. У разі, коли за максимально припустимим значенням температури в усіх зонах печі не забезпечується нагрівання дроту до необхідної температури, то здійснюють зниження швидкості її руху в робочому об'ємі печі.

Результати досліджень щодо коригування існуючого режиму нагрівання дроту діам. 2,0 мм під термообробку за швидкості її транспортування 18,9 м/хв наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристика запропонованого (чисельник) та існуючого (знаменник) режимів нагрівання дроту діаметром 2,0...3,0 мм під термічну обробку

Показники	Зона			
	I	II	III	IV
Температура печі, °С	760	895	895	–
	850	850	840	830
Температура дроту, °С				
– початкова	20	325	625	–
	20	440	685	780
– кінцева	325	625	815	–
	440	685	785	815

Реалізація теоретично розрахованого режиму нагрівання дроту в протяжній електропечі

типу СПЗ пов'язана із значним збільшенням теплового навантаження в її зонах III і IV, що мо-

же призвести до скорочення терміну служби нагрівачів опору. Тому виконували коригування запропонованого режиму за довжиною робочого об'єму електропечі у бік одночасного її збільшення (до 800 °С) для зони I та зменшення температури (до 880 °С) для зон II і III.

На другому етапі досліджень виконували обчислювальний експеримент з використанням ПЕВМ: оцінювали значення втрат теплоти через склепіння та бічні стіни у вказаних зонах електропечі, рівень температури на стиках її окремих шарів залежно від температури в робо-

чому об'ємі, товщини вогнетривкого та теплоізоляційного шарів футерівки з урахуванням теплофізичних характеристик таких матеріалів [7,8] для різних варіантів розміщення додаткових шарів футерівки печі, а також економічну ефективність і термін окупності кожного варіанту.

Розглядали шість варіантів розміщення додаткових шарів теплоізоляційних волокнистих матеріалів у вигляді прошивних матів (товщиною 0,05; 0,10; 0,15 і 0,20 м) на склепінні та бічних стінах електропечі.

Таблиця 3 – Техніко-економічні показники розміщення додаткової теплоізоляції на склепінні та бічних стінах протяжної печі

Показники	Варіанти					
	I	II	III	IV	V	VI
Товщина шарів прошивних матів:						
- на склепінні печі, м	0,05	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15
- на бічних стінах печі, м	0,15	0,10	0,15	0,10	0,15	0,20
Втрати теплоти ^{*)} , %	62	54	42	34	18	30
Зниження витрати електроенергії, 10 ³ кВт протягом року	21,6	25,5	27,1	28,4	29,9	29,2
Економічний ефект, 10 ³ грн.	7,20	7,80	8,20	8,60	9,50	8,80
Термін окупності, год.	310	285	312	298	320	340

^{*)} Примітка: значення втрат теплоти в існуючому варіанті прийнято за 100 %

Як показали результати обчислень (табл. 3), раціональним варіантом слід визнати розміщення додаткових шарів теплоізоляційних матеріалів товщиною 0,15 м на склепінні та бічних стінах печей, оскільки за його реалізації досягають як мінімальні втрати теплоти, так і максимального значення річного економічного ефекту [9].

Наступними промисловими випробуваннями зафіксовано можливість реалізації скоригованого режиму нагрівання сталевго дроту під термообробку в типовому технологічному процесі із збереженням заданого рівня якісних показників металу [10].

Механічні характеристики дроту із сталі марки 08, що піддано нагріванню за розробленим (чисельник) та існуючим (знаменник) режимами (у дужках - середні значення) наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Фізико-механічні властивості дроту із сталі марки 08

Характеристика	Чисельні значення
Тимчасовий опір σ_B , Н/мм ²	42,0 – 44,4 (42,9)
	43,0 – 44,6 (43,5)
Відносне подовження δ , %	19,4 – 21,8 (20,6)
	21,9 – 22,4 (22,3)

Застосування запропонованого режиму нагрівання сталевго дроту під термообробку дозволило поліпшити його фізико-механічні влас-

тливості, зокрема, підвищити їх рівномірність. Так, значення середньоквадратичного відхилення відносного подовження та тимчасового опору оцинкованого дроту діам. 2,0-3,0 мм після обробки за запропонованим режимом не перевищує 1,5-1,8 % і 1,8-2,2 Н/мм² відповідно, тоді як за існуючим режимом складає 2,5-2,9 % і 3,2-3,9 Н/мм² відповідно. Одночасно, значення параметра δ підвищується в середньому на 8,2 %, а значення параметра σ_B – на 10,1 %, що дозволяє дещо збільшити швидкість руху дроту в електропечах, а, отже, і продуктивність таких агрегатів.

Економічну ефективність запропонованого режиму нагрівання сталевго дроту під термообробку визначали зіставленням значень витрати електроенергії на електропечі у виробничих умовах за існуючого та скоригованого режимів.

Значення зниження витрати електроенергії (ΔW) на протяжній електропечі після реалізації скоригованого режиму нагрівання дроту під термообробку оцінювали з використанням формули:

$$\Delta W = 1,732 \cdot U \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=\tau_1}^m (I_{2,i} \cdot \tau_{2,j} - I_{1,i} \cdot \tau_{1,j}) , \quad (1)$$

де U – значення напруги, що підводять до електропечі, В; $I_{1,i}$, $I_{2,i}$ – значення сили струму за реалізації на електропечі існуючого та скоригова-

ного режимів нагрівання дроту під термообробку протягом доби, А, відповідно; $\tau_{1,j}$, $\tau_{2,j}$ – тривалість дії i -го значення сили струму за реалізації на електропечі існуючого та скоригованого режимів нагрівання дроту під термічну обробку протягом доби, год., відповідно.

Результатами розрахунків встановлено, що значення показника ΔW після реалізації скоригованого режиму нагрівання дроту під термообробку відповідає зниженню витрати електроенергії в електропечах цього типу на 20 %.

Висновки та рекомендації. Запропоновано

заходи щодо раціонального коригування температурного режиму нагрівання сталевих дроту під термообробку в протяжних електропечах, а також зниження втрат теплоти через футерівку склепіння та бічних стін. Подальше поліпшення теплової роботи протяжних електропечей виробництва метизів слід здійснювати у напрямі інтенсифікації процесу нагрівання за збільшенням швидкості транспортування дроту, а також впровадження секційного методу збирання електропечей такого типу.

Бібліографічний перелік

1. **Бутковский, А. Г.** Управление нагревом металла [Текст] / А. Г. Бутковский, Ю. И. Андреев. – М. : Металлургия, 1981. – 270 с.
2. **Панферов, В. И.** Управление нагревом металла в протяжных печах и агрегатах [Текст] / В. И. Панферов, Г. П. Кулаченков // Сталь. – 1991. – № 3. – С. 57-59.
3. **Гельман, Г. А.** Автоматизация тепловых режимов протяжных печей [Текст] / Г. А. Гельман. – М. : Металлургия, 1975. – 290 с.
4. **Каз, И. Г.** Совершенствование тепловой работы горизонтальных протяжных электропечей [Текст] / И. Г. Каз, Ю. П. Полешко, Ю. И. Усенко и др. // Черная металлургия. – 1997. – Вып. 11-12 (1183-1184). – С. 67-69.
5. **Усенко, Ю. И.** О снижении расхода электроэнергии в горизонтальных протяжных электропечах метизного производства [Текст] / Ю. И. Усенко, В. Б. Пульпинский, В. И. Иванов и др. // Промышленная энергетика. – 1997. – № 11. – С. 37-39.
6. **Усенко, Ю. И.** Удосконалення режиму відпалювання сталевих дроту в протяжних муфельних електропечах [Текст] / Ю. И. Усенко, В. Ф. Сапов, В. І. Иванов та ін. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 1 (235). – С. 105-108.
7. **Литовский, Е. Я.** Теплофизические свойства огнеупоров [Текст] / Е. Я. Литовский, Н. А. Пучкевич. – М. : Металлургия, 1982. – 152 с.
8. **Факторович, Л. М.** Краткий справочник тепловой изоляции [Текст] / Л. М. Факторович. – М. : Энергия, 1962. – 450 с.
9. **Усенко, Ю. И.** Підвищення теплоізоляційної здатності футерівки протяжних електропечей виробництва метизів [Текст] / Ю. И. Усенко, В. І. Иванов, О. І. Чепрасов, Ю. М. Каюков // Strategiczne pytania swiatowej nauki-2019. Materials of XV International research and practice conference. – 07.02-15.02.2019. – Przemysl, 2019. – Vol. 10. – P. 56-58.
10. **Іванов, В. І.** Коригування температурного режиму нагрівання сталевих дроту під термічну обробку в протяжних електропечах виробництва метизів [Текст] / В. І. Иванов, Ю. И. Усенко, Ю. М. Каюков, О. І. Чепрасов // XV Strategiczne pytania swiatowej nauki-2019. Materials of XV International research and practice conference. – 07.02-15.02.2019. – Przemysl, 2019. – Vol. 10. – P. 59-61.

Усенко Юрій Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри екології, теплотехники і охорони труда, Національна металургічна академія України (Україна, Дніпро). E-mail: ktemp@ktemp.dp.ua

Іванов Віктор Ільич, старший науковий співробітник кафедри автоматизованого управління технологічними процесами, Запорізька державна інженерна академія (Україна, Запоріжжя). E-mail: vitas1850@gmail.com

Зинченко Владимир Юрьевич, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованого управління технологічними процесами, Запорізька державна інженерна академія (Україна, Запоріжжя). E-mail: elelna.zinchenko@mail.xu

Чепрасов Александр Іванович, кандидат технічних наук, професор кафедри теплоенергетики і гідроенергетики, Запорізька державна інженерна академія (Україна, Запоріжжя). E-mail: alex.i.cheprasov@gmail.com

Каюков Юрій Николаевич, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики і гідроенергетики, Запорізька державна інженерна академія (Україна, Запоріжжя). E-mail: lenajura2010@gmail.com

Полешко Юрій Павлович, начальник цеху ОАО «Дніпрметиз» (Україна, Дніпро). E-mail: sale@dneprometiz.com

ТЕПЛОВАЯ РАБОТА ПРОТЯЖНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ ПРИ НАГРЕВЕ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ ПОД ТЕРМООБРАБОТКУ

Представлены результаты разработки алгоритма аналитического исследования процесса нагрева стальной проволоки под термическую обработку в протяжных электропечах типа СПЗ перед горячим оцинкованием. Разработаны меры по рациональному перераспределению тепловой мощности печей по длине рабочего объема, а также снижения до минимума потерь теплоты через свод и боковые стены.

Ключевые слова: протяжные электропечи, стальная проволока, рациональный температурный режим, футеровка свода и боковых стен, исследование

Usenko Yuri, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of Ecology, Heating and Protection Labor (National Metallurgical Academy of Ukraine (Ukraine, Dnieper). E-mail: ktemp@ktemp.dp.ua

Ivanov Victor, Senior Staff Scientist of the Department of Automated Control by Technological Process, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: vitas1850@gmail.com

Zinchenko Yuri, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of Automated Control by Technological Process, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: elena.zinchenko@mail.ru

Cheprasov Alexander, candidate of technical sciences, Professor of Department of Heat and Power Engineering Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: alex.i.cheprasov@gmail.com

Kayukov Yuri, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of Heat and Power Engineering Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: lenajura2010@gmail.com

Poleshko Yuri, machine shop manager, PJSA «Dneprometiz» (Ukraine, Dnieper). E-mail: sale@dneprometiz.com

THERMAL WORK OF PROLONGED ELECTRICAL FURNACES AT HEATING OF STEEL WIRE UNDER THERMAL TREATMENT

The results of development of algorithm for analytical research of heating of steel wire under heat treatment in prolonged electrofurnaces before the hot zinc-plating are presented. Measures are worked out on the rational redistribution of thermal power of stoves after length of the swept volume, and also decline to a minimum of losses of warmth through a vault and lateral walls of second and third areas. Practice of exploitation of prolonged electrofurnaces showed before the hot zincing of steel wire, that during their work the considerable expense of electric power and substantial losses of warmth by a radiation through a vault and lateral walls of second and third areas of the swept volume are fixed. During development of the energy-saving mode of heating of steel wire under heat treatment in prolonged electrofurnaces. Authors used the algorithm of analytical research, which contains procedure of search of rational temperature condition which provides the receipt of metal with the analogical indexes of quality at more subzero specific expense of electric power. To basis of algorithm equation of heating thermally of thin body is fixed on radiation heat exchange on an external surface with the coefficients of heat emission, which depend on the temperature of the swept volume of furnace and surfaces of metal, which heat. Such algorithm will realize the known principle of economic control prolonged electrofurnaces that foresees intensification of heating of metal in areas, last on motion of its transporting, for providing of minimum power charges on its realization. As a criterion authentications authors accepted the maximal rejection of calculation and experimental values of temperature of wire in the areas of furnace, the value of which must not exceed 2,0 % measured for the mode, that it is foreseen by technological instruction. It is set that the maximal rejection of temperature for different speed of transporting of wire did not exceed a set value, id est adequacy of the offered model is fixed to the real process. Results of calculations is set, that the value of decline of expense of electrofurnaces after realization of the corrected mode of heating of wire under heat treatment answers the decline of expense of electric power in electrofurnaces Key words: prolonged electrical furnace, steel wire, rational temperature mode, fettling of arch and lateral walls, researches

Стаття надійшла до редакції 07.02.2019 р.

Рецензент, проф. І.Г. Яковлева