

УДК 669.041

М.П. Ревун, професор, д.т.н.

В.Ю. Зінченко, доцент, к.т.н.

В.І. Іванов, ст. наук. співробітник

О.І. Чепрасов, професор, к.т.н.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ Й АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКІВ НАГРІВАННЯ ТЕРМІЧНО МАСИВНИХ ТІЛ У ПОЛУМЕНЕВИХ ТЕРМІЧНИХ ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПУ

(Повідомлення I)

Запорізька державна інженерна академія

Выполнен анализ известных задач математической оптимизации нагрева металла под термическую обработку в пламенных печах камерного типа. Установлено, что решение задач указанного типа усложнено отсутствием простой модели, определяющей зависимость конечных показателей качества нагрева от управляющих воздействий в системе «греющие газы – кладка – металл». Принятие ряда допущений позволяет использовать результаты моделирования только для качественного анализа тепловой работы печей. Указано на необходимость разработки оптимальной модели нагрева термически массивных тел, позволяющей определять как форму управляющего воздействия, так и моменты их переключения.

Ключевые слова: пламенная термическая печь камерного типа, алгоритм расчета нагрева металла, математическая модель, анализ

Виконано аналіз відомих задач математичної оптимізації нагрівання металу під термічну обробку в полумєневих печах камерного типу. Встановлено, що вирішення задач вказаного типу є ускладненим відсутністю простої моделі, яка визначає залежність кінцевих показників якості нагрівання від дій, що управляють, у системі «гріючі гази – кладка – метал». Під час прийняття низки припущень результати моделювання можливо використовувати тільки для якісного аналізу теплової роботи печей. Необхідно вибрати оптимальну модель нагрівання термічно масивних тіл, яка дозволить визначати як форму дій, що управляють, так і моменти їх переключення.

Ключові слова: полумєнева термічна піч камерного типу, нагрівання металу, математична модель, аналіз, алгоритм розрахунків

There are carried out analysis of mathematical optimization featured tasks for heating metal by heat treatment in the flaming furnaces of chamber type. It is set that for solution of stated type tasks is complicated by absence of simple model, define-like dependence of end measures for quality of heating on control responses in the system «warming gases – laying – metal». The acceptance of row assumptions allows to use on modeling results only for the high-quality analysis of heat work for furnaces. It is necessary to choose the optimal model of heating for thermally massive bodies, allowing to determine both the form of control responses and moments of their switching.

Keywords: flaming thermal furnace of chamber type, heating of metal, mathematical model, analysis, algorithm of calculations

Введение. За умов безперервного зростання ринкової вартості енергоносіїв та обмеження споживання природного газу, а також, як наслідок, зниження економічної ефективності енергоємних теплотехнологічних процесів актуальною залишається задача економії зазначеного газу в металургійному виробництві, де його головними споживачами слугують полумєневі термічні печі камерного типу.

Печі зазначеного типу набули найбільшого поширення через універсальність щодо виконання термічної обробки різних за формою та масою зливків, проте значна частина констук-

цій таких агрегатів залишається фізично та морально застарілою. У зв'язку з цим головним напрямком вдосконалення їх теплової роботи слід вважати поліпшення управління полями температури у робочій камері та рухом газів, що здійснюють нагрівання металу, а також оптимізацію їх теплової роботи у цілому [1].

Відомо, що для печей такого типу температурно-часові режими обробки задають не лише для забезпечення заданої температури поверхні металу та рівномірного її розподілу за його перерізом, але й для досягнення теплофізичних перетворень у металі під час термічної обробки. Такі режими нерідко є багатоступінчастими з обмеженням як швидкості нагрівання, так і охо-

лодження металу. Зливки, яких нагрівають у полумених печах камерного типу, за термічною масивністю відносять до перехідної зони критерію Біо ($Bi = 0,25 \dots 0,50$), що підвищує вимоги до точності реалізації заданих температурно-часових режимів обробки. Під час роботи зазначених печей є складнощі щодо забезпечення рівномірного підведення теплоти до поверхні зливків, оскільки процес вирівнювання температури металу відбувається за умови безперервного зниження теплового потоку, що пов'язано із підтриманням на поверхні металу заданого рівня температури. До кінця періоду нагрівання зливків, у міру пониження загальної витрати газів, що нагрівають метал, та, як наслідок, швидкості їх руху в робочій камері печі, відбувається зменшення значень сумарного коефіцієнта передавання теплоти, що призводить до ускладнення організації процесу нагрівання металу.

Під час розробки раціональних температурно-часових режимів нагрівання металу під термічну обробку широко застосовують їх математичне моделювання. Для автоматизованих систем управління зазначеним процесом математичні моделі застосовують:

- у разі відсутності засобів інструментального контролю якості нагрівання металу для оцінки його поточних показників за результатами вимірювання інших величин, що піддаються контролю [2-5];

- у разі математичної оптимізації процесу нагрівання металу для одержання алгоритмів управління, які є оптимальними за певними критеріями [6-9];

- у разі визначення раціональних конструктивних параметрів печей, а також розробки технологічних інструкцій щодо процесів нагрівання металу під термічну обробку [10-12];

- у разі дослідження нештатних ситуацій, коли виконання експериментів на практиці фізично або технічно є неможливим [13,14].

Моделі першого та четвертого виду відносять до задач аналізу із визначенням за відомими геометричними, фізичними та крайовими умовами полів температури (пряма задача теплопровідності), моделі другого та третього виду – до задачі синтезу зі знаходженням крайових умов або параметрів системи за заданим розподілом температури у металі, якого нагрівають (зворотна задача теплопровідності).

Для термічно тонких тіл ($Bi \leq 0,25$) математичні моделі нагрівання, як правило, розробляють на основі звичайних диференціальних рівнянь теплопровідності у безрозмірному вигляді. Під час вирішення таких рівнянь вважають, що змі-

нювання теплофізичних параметрів металу за часом є невідомим, тобто їх значення приймають постійними та у процесі моделювання не піддавали уточненню, що знижувало цінність одержаних результатів.

Спроби урахування залежності теплофізичних параметрів металу від температури, а також нестационарного характеру температури газів, що нагрівають метал, приводили як до ускладнення як моделі, так і вирішення прямої та зворотної задачі теплопровідності.

Аналітичне вирішення нелінійних задач конвективно-радіаційного теплообміну за нестационарної температури газів, які нагрівають метал, має суттєві складнощі. У зв'язку з цим розроблено ряд наближених чисельних і чисельно-аналітичних методів. Так, задаючи функцію розподілу температури за перерізом металу, рівняння у частинних похідних приводили до системи звичайних диференціальних рівнянь. Проте, зважаючи на нелінійну залежність теплофізичних параметрів металу від температури лінійні диференціальні рівняння використовували для моделювання нагрівання металу лише у вузьких діапазонах температури для печей безперервної дії. Для полумених термічних печей камерного типу із змінним за часом температурним режимом диференціальні рівняння є нелінійними і не мають єдиного вирішення [15].

До теорії теплопровідності суттєвий внесок здійснено теплотехніками-металургами Г.П. Іванцовим, Н.Ю. Тайцем, Ф.Р. Шклярком та Е.М. Гольдфарбом, за участі яких успішно було побороно низку математичних складнощів. На основі гіпотези про послідовне залучення елементів тіла до процесу нагрівання, а також кінцеву швидкість поширення теплоти в нім, Й.Д. Семикінім подано динаміку нагрівання металу послідовним включенням типових ланок транспортного запізнювання або аперіодичних ланок і вирішено ряд інженерних задач [16].

Під час вирішення теплотехнічних задач широко застосовували спрощення А.Й. Вейника [17] про стабілізацію теплового потоку в глибині тіла незалежно від його форми, що дозволяє розраховувати поля температури для тіл довільної форми, використовуючи вирішення одномірного рівняння теплопровідності для тіл простої форми (пластини, циліндра або кулі). При цьому вносили певні поправки на відмінність геометрії тіла, що досліджують, від канонічної форми, які зводили до урахування змінювання площі його поверхні порівняно із площею тіла, що має правильну форму. Подібну задачу вирішували в роботі [18] для масивної пластини з використан-

ням допоміжних функцій, які визначали з таблиць, складених за допомогою гідростатичного інтегратора.

У роботах [19-21] уперше аналітично вирішено задачу нагрівання термічно масивних тіл базової форми з використанням методу еквівалентних джерел, що дозволяє забезпечити достатній рівень збігання із результатами розрахунків за методикою О.В. Кавадєрова [18].

Серед перших робіт з оптимізації управління тепловою роботою печей камерного типу застосовують на увагу задачі нагрівання термічно тонких тіл з мінімальною витратою палива [22,23]. У роботі [24] одержано аналогічні результати щодо нагрівання термічно масивних тіл. Оптимізацію виконували з використанням спрощеної моделі нагрівання термічно тонкого тіла з оцінкою теплового стану металу за температурою тіла, яку усереднювали за його масою.

У роботі [25] визначали оптимальний за вартістю палива режим нагрівання металу з використанням двох видів палива та кисню, а також вирішували задачу вибирання калорійності газоподібного палива.

Оптимальні режими роботи печей за економічними критеріями розроблено у роботах [26,-27]; управління їх тепловою роботою з позиції забезпечення заданої точності нагрівання розглядали у роботі [28].

Для задач оптимізації нагрівання за часом одержували ступінчасті температурно-часові режими, тобто релейні закони змінювання теплового навантаження у повній відповідності до теорії Фельдбаума про «*n*» інтервали управління [29]. Під час поширення математичних методів оптимізації: методу Понтрягіна та динамічного програмування Беллмана [30], – на системи, що описують за допомогою рівнянь у частинних похідних, одержували аналогічне за виглядом оптимальне вирішення.

Під час оптимізації управління нагріванням металу нерідко вводили обмеження не лише на якість спалювання газоподібного палива, але й на склад газів, що гріють метал. Вважали, що оптимальний вміст кисню в атмосфері робочої камери печі не повинен перевищувати 1,0 % [31]. Окрім того, вводили обмеження на максимальне та мінімальне теплове навантаження печі з урахуванням її продуктивності, типу па-

льників, їх діапазону регулювання, а також перепускної спроможності димовідвідного тракту.

Виходячи з того, що теплотехнічні характеристики печей камерного типу та зливоків не є постійними за часом, а система «гази, що гріють – кладка – металі» є індивідуальним об'єктом, було розроблено модель нагрівання з налаштуванням щодо фактичного розподілу температури у зливках, якого оцінюють за поточною температурою у контрольних точках садки зливоків [32].

Під час управління тепловою роботою нагрівальних печей камерного типу є складнощі щодо забезпечення рівномірного підведення теплоти до поверхні металу, оскільки процес вирівнювання температури відбувається за умов безперервного зниження теплових потоків, яких підводять до поверхні металу. За управлінням тепловою потужністю печі її необхідно здійснювати з урахуванням найбільш і найменш нагрітих ділянок садки зливоків.

Таким чином, управління тепловою роботою печей зазначеного типу повинне передбачати організацію цілеспрямованої дії на теплообмінні процеси, які відбуваються у газовому середовищі робочої камери, у шарах футеровки печі та метал, що нагрівають, і його слід здійснювати шляхом змінювання теплового навантаження зазначених агрегатів.

Висновки. Вирішення задачі оптимізації процесу нагрівання металу під термічну обробку в полумєневих термічних печах камерного типу ускладнюється відсутністю простої математичної моделі, яка б визначала залежність кінцевих показників якості нагрівання металу під термічну обробку від дій, що управляють, у системі «гази, що гріють – кладка – метал». Відомі способи оптимізації такого процесу на основі вирішення складних диференціальних рівнянь теплопровідності не забезпечують реального характеру розподілу температури за перерізом зливоків, що термічно обробляють, а також за висотою та шириною робочої камери печі. Таким чином, потрібною є розробка простої математичної моделі нагрівання зливоків з адаптацією безпосередньо під час процесу управління [33], що забезпечує розрахунок оптимальних температурно-часових режимів, з метою зниження вартості енергетичних ресурсів і підвищення продуктивності печей камерного типу.

Бібліографічний список

1. **Ольшанский, В. М.** Проблема энергосбережения при производстве проката на металлургических предприятиях Украины [Текст] / В. М. Ольшанский // Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов

- государственной металлургической академии Украины. – Днепропетровск : ГМетАУ, 1999. – Т. 2. – С. 63-66. – Библиогр.: с. 66.
2. **Соколов, А. К.** Численно-аналитические модели температурных полей тел простой формы [Текст] / А. К. Соколов // Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов государственной металлургической академии Украины. – Днепропетровск : ГМетАУ, 1989. – Т. 2. – С. 242-244. – Библиогр.: с. 244.
 3. **Торопов, Е. В.** Некоторые проблемы построения АСУТП нагревательных печей [Текст] / Е. В. Торопов, В. И. Панферов // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 2. – С. 93-96. – Библиогр.: с. 96.
 4. **Панферов, В. И.** Адаптивные системы контроля качества нагрева металла в печах [Текст] / В. И. Панферов // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 4. – С. 42-45. – Библиогр.: с. 45.
 5. **Ревун, М. П.** Моделирование нагрева металла при автоматизированном проектировании и управлении [Текст] : учеб. пособие / М. П. Ревун, А. К. Соколов. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2000. – 350 с. – Библиогр.: с. 344-349. – 300 экз.
 6. **Ольшанский, В. М.** Разработка оптимальных режимов нагрева металла в камерных печах [Текст] / В. М. Ольшанский, Т. Н. Шемет // Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов государственной металлургической академии Украины. – Днепропетровск : ГМАУ, 1989. – Т. 2. – С. 192-193. – Библиогр.: с. 193.
 7. **Соколов, А. К.** О математическом моделировании режима нагрева металла [Текст] / А. К. Соколов // Теплообмен в промышленных установках : темат. сборник трудов. – Иваново : Изд-во ИЭИ, 1972. – Вып. 1. – С. 13-17. – Библиогр.: с. 17.
 8. **Тайц, Н. Ю.** Выбор режима нагрева металла с минимальным расходом топлива [Текст] / Н. Ю. Тайц, Л. А. Гузов, В. М. Ольшанский и др. // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1974. – № 4. – С. 164-167. – Библиогр.: с. 167.
 9. **Гольдфарб, Э. М.** Применение методов динамического программирования для оптимизации температурного режима печей [Текст] / Э. М. Гольдфарб, Э. М. Гескин // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1966. – № 1. – С. 175-182. – Библиогр.: с. 181-182.
 10. **Пыжов, В. К.** Математическая модель печи периодического действия с учетом циклической работы обмуровки [Текст] / В. К. Пыжов, А. К. Соколов // Теплообмен в промышленных установках : темат. сборник трудов. – Иваново : ИЭИ, 1975. – Вып. 3. – С. 63-67. – Библиогр.: с. 67.
 11. **Решетняк, И. С.** Математическое моделирование нагрева металла в камерных печах [Текст] / И. С. Решетняк, А. И. Литвин, С. И. Решетняк // Математические методы тепломассопереноса : сборник научных трудов. – Днепропетровск : ДГУ, 1983. – С. 39-43. – Библиогр.: с. 43.
 12. **Бухмиров, В. В.** Математическая модель нагревательной печи периодического действия [Текст] / В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников, С. В. Носова // Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск : НМетАУ, 2002. – Вып. 7. – С. 24-32. – Библиогр.: с. 32.
 13. **Арутюнов, В. А.** Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей [Текст] : учебник / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. – М. : Металлургия, 1990. – 239 с. – Библиогр.: с. 238. – ISBN 5-229-00476-2. – 3170 экз.
 14. **Лисиенко, В. Г.** Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах [Текст] / В. Г. Лисиенко, В. В. Волков, А. Л. Гончаров. – Киев : Наукова думка, 1984. – 230 с. – Библиогр.: с. 217-226. – 1000 экз.
 15. **Бутковский, А. Г.** Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами [Текст] / А. Г. Бутковский. – М. : Наука, 1965. – 476 с. – Библиогр.: с. 467-474. – 8000 экз.
 16. **Свинолобов, Н. П.** Инженерная модель в теории теплопроводности в трактовке И.Д. Семикина [Текст] / Н. П. Свинолобов // Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов государственной металлургической академии Украины. – Днепропетровск : ГМетАУ, 1999. – Т. 2. – С. 226-235. – Библиогр.: с. 234-235.
 17. **Вейник, А. И.** Техническая термодинамика и основы теплопередачи [Текст] : учеб. пособие / А. И. Вейник. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1965. – 362 с. – Библиогр.: с. 361-362. – 9100 экз.
 18. **Кавадеров, А. В.** Закономерности нагрева массивного тела излучением в противотоке [Текст] / А. В. Кавадеров, В. П. Калугин // Нагрев металла и работа нагревательных печей : сборник научных трудов Всесоюзного научно-исследовательского института металлургической теплотехники. – Свердловск : Металлургия, 1960. – № 6. – С. 59-70. – Библиогр.: с. 69-70.
 19. **Постольник, Ю. С.** Математическая модель нагрева массивных тел в теоретическом противотоке [Текст] / Ю. С. Постольник, А. П. Огурцов, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова // Математичне моделювання. – 2000. – № 2(5). – С. 87-91. – Библиогр.: с. 91.
 20. **Постольник, Ю. С.** Математическая модель нагрева массивных тел в условиях сложного противоточного теплообмена [Текст] / Ю. С. Постольник, А. П. Огурцов, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова // Математичне моделювання. – 2001. – № 1(6). – С. 87-92. – Библиогр.: с. 92.
 21. **Постольник, Ю. С.** Противоточный радиационно-конвективный нагрев массивных тел [Текст] / Ю. С. Постольник, В. И. Тимошпольский, А. П. Огурцов и др. // Известия Вузов и энергетических объединений. – 2001. – № 3. – С. 65-76. – Библиогр.: с. 75-76.

22. **Бровкин, Л. А.** К выбору оптимальных режимов нагрева [Текст] / Л. А. Бровкин // Теплообмен в промышленных установках : темат. сборник трудов. – Иваново : ИЭИ, 1973. – Вып. 2. – С. 55-59. – Библиогр.: с. 59.
23. **Антонов, В. И.** Математическая модель процесса нагрева слитков под ковку в камерных печах [Текст] / В. И. Антонов // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1979. – № 1. – С. 131-134. – Библиогр.: с. 134.
24. **Бутковский, А. Г.** Применение принципа максимума для оптимизации температурного режима печей [Текст] / А. Г. Бутковский, Э. М. Гольдфарб, Э. С. Гескин // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1967. – № 7. – С. 173-177. – Библиогр.: с. 177.
25. **Ревун, М. П.** Оптимизация нагрева металла при использовании двух видов топлива и кислорода [Текст] / М. П. Ревун, В. Н. Погорелов, А. И. Чепрасов // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 1. – С. 79-81. – Библиогр.: с. 81.
26. **Капустин, Л. Э.** Программирование нагрева металла по расходу топлива с учетом технологических ограничений [Текст] / Л. Э. Капустин, Д. Э. Гольдфарб, Г. Н. Сидорин и др. // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 7. – С. 114-118. – Библиогр.: с. 118.
27. **Гольдфарб, Э. М.** Оптимальный режим нагрева металла по критерию минимума суммарной стоимости расхода топлива и потерь металла на окисление [Текст] / Э. М. Гольдфарб, В. С. Ибряев // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1971. – № 12. – С. 144-148. – Библиогр.: с. 148.
28. **Минаев, А. Н.** К вопросу нагрева тел с заданной точностью [Текст] / А. Н. Минаев, В. Я. Гринберг, В. М. Ольшанский и др. // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1975. – № 7. – С. 184-186. – Библиогр.: с. 186.
29. **Фельдбаум, А. А.** Основы теории оптимальных автоматических систем [Текст] / А. А. Фельдбаум. – М. : Наука, 1966. – 623 с. – Библиогр.: с. 594-618. – 13000 экз.
30. **Кузин, Л. Т.** Основы кибернетики [Текст] : учеб. пособие / Л. Т. Кузин. – М. : Энергия, 1973. – 504 с. – Библиогр.: с. 496-498. – 30000 экз.
31. **Самойлович, Ю. А.** Определение перепада температуры в слое окалины, растущем на поверхности нагреваемой стальной заготовки [Текст] / Ю. А. Самойлович // Нагрев и охлаждение стали. Теплотехника слоевых процессов : сборник научных трудов Всесоюзного научно-исследовательского института металлургической теплотехники. – М. : Металлургия, 1970. – Вып. 23. – С. 71-81. – Библиогр.: с. 80-81.
32. **Тайц, Н. Ю.** Технология нагрева стали [Текст] / Н. Ю. Тайц. Изд. 2-е испр. и доп. – М. : Металлургия, 1962. – 567 с. – Библиогр.: с. 562-567. – 5200 экз.
33. **Ревун, М. П.** К моделированию нагрева металла в пламенных печах камерного типа [Текст] / М. П. Ревун, В. Ю. Зинченко, В. И. Иванов // Наука в інформаційному просторі : матеріали XI Міжнар. науково-практичн. конф. – Дніпропетровськ : видавець Біла К. О. 2015. – Т. 2. – С. 25-28. – Бібліогр.: с. 28.

Стаття надійшла до редакції 19.10.2015 р.
Рецензент, проф. І.Г. Яковлева

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