

Іващенко В. П. /д. т. н./, Швачич Г. Г. /д. т. н./,  
Соболенко О. В. /к. т. н./, Ткач М. О.  
НМетАУ

## Система автоматизованого контролю температурних режимів термічної обробки сталевого виробу

*Мета роботи полягає в розробці системи автоматизованого контролю параметрів процесу сфероїдизації відпалювання каліброваної сталі. Розглянуті особливості розробки і використання багатопроцесорної обчислювальної системи з її математичним і програмним забезпеченням для моделювання режимів термічної обробки металевих заготовок. Запропоновано застосування сучасних багатопроцесорних обчислювальних комп'ютерних технологій для збільшення швидкодії та продуктивності обчислень, що дає змогу ефективно керувати технологічними процесами. Іл. 2. Бібліогр.: 5 найм.*

**Ключові слова:** автоматизований контроль, технологічні параметри, багатопроцесорна обчислювальна система, інформаційний двоспрямований інтерфейс, температурний режим

*The aim of the work is to develop a system of automated control of process parameters spheroid annealing calibrated steel. Peculiarities of the development and use of a multiprocessor computing system with its mathematical and software for simulation of heat treatment of metal workpieces. The proposed use of modern multiprocessor computer technology to increase speed and performance calculations, which allows for effective control of technological processes.*

**Keywords:** automated control, process parameters, multiprocessor systems, information directional interface, temperature

Протягом останніх декілька десятиліть все більше уваги приділяється процесам сфероїдизації карбідної фази із структурою зернистого перліту, які вважаються альтернативними тривалим традиційним процесам сфероїдизуючого відпалювання сталевих заготовок. До таких можна віднести способи та технології комбінаційних сфероїдизуючих обробок різноманітних видів металовиробів [1]. Значне скорочення тривалості сфероїдизуючого відпалювання досягається завдяки застосуванню електротермічної обробки заготовки [2]. Однак швидкісні процеси термічної обробки (ТО) і надалі потребують досліджень, в першу чергу, для контролювання основних технологічних параметрів з метою їх оптимізації.

Проте, удосконалення наявних й створення нових технологічних процесів ТО металу вимагають значних витрат, пов'язаних із проведенням великої кількості натурних експериментів на лабораторному, дослідно-промисловому устаткуванні, а також у виробничих умовах. Тому виникає необхідність дослідження швидкісних режимів ТО сталі для розробки системи автоматизованого контролю технологічних параметрів процесу з використанням комп'ютерних програм і математичних моделей.

В той же час, розв'язування зазначених задач за допомогою відомих стандартних підходів являє собою складну проблему, подолан-

ня якої можливе тільки за рахунок застосування сучасних багатопроцесорних обчислювальних комп'ютерних технологій. При цьому одна з основних особливостей застосування таких технологій полягає у збільшенні швидкодії та продуктивності обчислень. Висока продуктивність обчислень дозволяє розв'язувати багатовимірні задачі, а також задачі, які вимагають великої кількості процесорного часу. Швидкодія дає змогу здійснювати контроль технологічних параметрів в реальному режимі часу і, завдяки цьому, ефективно керувати технологічними процесами.

Виконані в даній статті розробки відрізняються тим, що в них суттєвий акцент робиться на використанні багатопроцесорних обчислювальних систем. Зауважимо, що на сьогодні у світі спостерігається стрімке зростання числа багатопроцесорних обчислювальних систем та їх сумарної продуктивності. Це викликано тим, що такі системи стали загальнодоступними і дешевими апаратними платформами для високопродуктивних обчислень. Таким чином, розробка й використання багатопроцесорних обчислювальних комплексів з їх математичним та програмним забезпеченням є актуальною проблемою, що дозволяє одержати необхідну інформацію для створення та впровадження різних технологічних нововведень.

**Постановка проблеми досліджень**

В роботі розглядається задача розробки системи автоматизації контролю параметрів технологічного процесу швидкісної ТО довгомірного виробу за рахунок застосування багатопроцесорної обчислювальної системи [3]. Застосування системи автоматизованого контролю параметрів технологічного процесу термічної обробки виробу має на меті поліпшення технологічних властивостей заготовки за рахунок забезпечення високої дисперсності й однорідності структури зразка на всій площині його перерізу. При цьому технологічний процес повинен набувати таких переваг, як висока продуктивність, знижене енергоспоживання, поліпшення експлуатаційних характеристик. Зазначених властивостей технологічний процес набуває за рахунок застосування багатопроцесорної обчислювальної системи. Багатопроцесорна обчислювальна система монтується у вигляді окремого модуля і дозволяє за допомогою спеціального програмного забезпечення задавати й контролювати необхідні температурні режими на всій площині перерізу зразка при нагріванні й витримці матеріалу.

Задачі, що розв'язуються за допомогою розробленої автоматизованої системи контролю параметрів технологічного процесу, розглядаються у двох напрямках – моніторинг (спостереження в реальному часі за температурними параметрами об'єкту) і ретроспективний контроль, аналіз і корегування температурних режимів обробки довгомірного виробу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Відомо [2], що електротермічний спосіб обробки металовиробу характеризується високою швидкістю нагрівання унаслідок впливу явищ електромагнітної індукції (індукційне нагрівання) або електроопору (електроконтактне нагрівання). Технологія ТО, в якій застосовується індукційний нагрів сталі, передбачає, що заготовка нагрівається в міжкритичний інтервал темпе-

ратур (МКІТ) з подальшою витримкою і швидким охолодженням. При цьому, для забезпечення стабільності властивостей металу необхідно підтримувати точний температурний режим. Безперечні переваги електротермічної обробки такі: надання сталевим виробам більш цінних властивостей, що зумовлюється специфічним впливом високої інтенсивності нагрівання на механізм і кінетику структурних змін у сталі, обмеженим окалиноутворенням і знеуглецюванням, уникненням забруднення доквілля, скороченням тривалості ТО в десятки разів.

Запровадження індукційного нагрівання у технологічній лінії для ТО дроту вже відоме у виробничій практиці [4]. Разом з тим описаний процес термічної обробки має певні недоліки:

1. Відсутність контролю температурних режимів нагрівання, витримки й охолодження під час ТО металу.
2. Режим ТО заготовки передбачає значну тривалість технологічного процесу (за даними авторів, від 30 до 90 хв.), що не дозволяє синхронізувати замкнутий цикл виготовлення металовиробів.

**Виклад основного матеріалу досліджень**

Щоб вирішити окреслені вище проблеми, було розроблено установку для термічної обробки довгомірного сталевого виробу [5]. На рис. 1 подано блок-схему контурів системи автоматизованого керування установкою термічної обробки довгомірного сталевого виробу, де прийнято такі позначення: БПОС – багатопроцесорна обчислювальна система; ВМ ПМ – виконавчий механізм протяжного механізму; ВМ БІВТ – виконавчі механізми блоків ізотермічної витримки температури; ВМ БП – виконавчий механізм блока підстуджування; ВМ БН – виконавчий механізм блока нагрівання зразка. Така система керування має у своєму розпорядженні блоки, які дозволяють отримати інформацію про поточні параметри керованих проце-

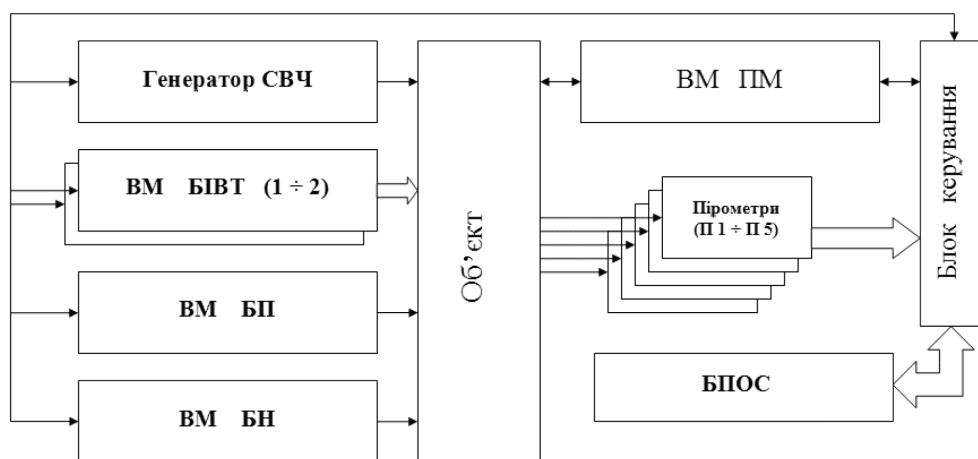


Рис. 1. Блок-схема контурів системи автоматизованого керування параметрів технологічного процесу

сів. Особливість її полягає в тому, що на кожному з п'яти етапів технологічної обробки зразка розв'язується двовимірна задача теплопровідності. При цьому програмні засоби ПОК дозволяють контролювати температурні режими, як на всій площині перерізу зразка, так і по його довжині. Контроль таких температурних режимів здійснюється в центрі площини перерізу зразка.

БПОС із спеціальним програмним забезпеченням, як єдина база, включає математичні моделі у вигляді рівняння теплопровідності, тобто

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + W, \quad (1)$$

при цьому критерій Фур'є  $\tau = \frac{at}{R^2}$ , якщо  $\tau > 0$ ,  $W$  – питома потужність у вигляді джерел тепла, Вт/м<sup>2</sup>.

Крайові умови цього рівняння мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} T(0, r, z) &= f(r, \tau); \\ T(\tau, 1, z) &= \text{var}; \\ \frac{\partial T(\tau, 0, z)}{\partial r} &= 0; \\ T(\tau, 0, z) &\neq 0. \end{aligned}$$

Два останні в крайових умовах співвідношення свідчать про те, що значення температури в ділянці осі циліндра протягом усього процесу теплообміну має бути скінченним. За координатою  $z$  граничні умови, залежно від особливостей розв'язуваної задачі, можуть бути першого, другого або третього роду. Розв'язують задачу (1) із застосуванням методів розщеплення, суть яких полягає в редукції складного оператора (1) до простих. Цей підхід дозволяє проінтегрувати дане рівняння як послідовність інтегрування одновимірних рівнянь простішої структури. З огляду на суттєву складність математичної моделі (1), великого значення набуває розробка економічних алгоритмів для розрахунку ефектів керування функціями запропонованої установки. Розглянемо процес створення зазначених алгоритмів за допомогою конструкції схем розщеплення рівняння (1). На описовому рівні ідею конструкції схем розщеплення за довжиною та радіусом зразка можна викласти таким чином. Диференціальна задача, сформульована виразом (1), приймає вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = A \cdot f, \quad (2)$$

де  $A$  – деякий оператор просторових змінних, наприклад:

$$Af = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}. \quad (3)$$

Значення  $f(z, r, t_p)$  за вже відомими величинами  $f(z, r, t_{p-1})$ , якщо  $t_p = p \cdot Dt1$  ( $Dt1 = (t_p - t_{p-1})$ ), являє собою відстань між сітковими вузлами на заданому часовому інтервалі ( $p = 1, 2, 3, \dots, n$  – номери вузлів), можна виразити формулою:

$$\begin{aligned} f(z, r, t_{p-1} + Dt1) &= f(z, r, t_{p-1}) + Dt1 \frac{\partial f}{\partial t} + O(Dt1^2) \equiv \\ &\equiv (E + Dt1 \cdot A)f(z, r, t_{p-1}) + O(Dt1^2), \end{aligned}$$

де  $E$  – одиничний оператор.

Праву частину рівняння (3) запишемо у вигляді:

$$Af = A_1 f + A_2 f.$$

Тоді воно переписується таким чином:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = A_1 f + A_2 f \quad (4)$$

Це рівняння допускає розщеплення на два вирази:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial \tau} &= A_1 v, & t_{p-1} \leq t \leq t_p, \\ v(z, r, t_{p-1}) &= f(z, r, t_{p-1}), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} &= A_2 w, & t_{p-1} \leq t \leq t_p, \\ w(z, r, t_{p-1}) &= v(z, r, t_p). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Відзначимо, що

$$w(z, r, t_p) \equiv f(z, r, t_{p-1}) + O(Dt1^2). \quad (7)$$

Рівність (7) дає підставу на кожному інтервалі часу, коли  $t_{p-1} \leq t \leq t_p$ , замість рівняння (2) послідовно розв'язувати (5) і (6).

Для практичного розв'язування рівнянь (5) і (6) формально апроксимуємо їх якими-небудь різницевиими схемами. Тоді виникає вже деяка різницева схема розщеплення, що дозволяє у два етапи обчислити значення функції  $f(z, r, t_p)$  за вже відомим значенням  $f(z, r, t_{p-1})$ .

Перший етап – обчислення величини  $v(z, r, t_p)$  за відомими значенням функції  $f(z, r, t_{p-1})$ , а другий етап розв'язування – це обчислення виразу:  $f(z, r, t_p) = w(z, r, t_p)$ , коли з першого етапу відомо, що  $w(z, r, t_{p-1}) = v(z, r, t_p)$ .

Висловлені міркування мають евристичний характер. Після того, як різницеву схему розщеплення побудовано для числового розв'язування задачі, треба якимось методом перевірити її апроксимацію та стійкість. Зазначене розщеплення двовимірного рівняння у виразі (2) на два одновимірних (5), (6) можна тлумачити як наближену заміну процесу поширення тепла по площині  $Ozr$  за час  $t$ , в межах:  $t_{p-1} \leq t \leq t_p$  ( $p = 1, 2, 3, \dots$ ), на два процеси. У першому з них, який описується першим рівнянням, подумки вводяться теплопроникні перегородки, що перешкоджають поширенню тепла в

напрямку осі  $Ox$ . Після настання часу  $Dt1$ , замість згаданих перегородок, вводяться інші, що перешкоджають поширенню тепла в напрямку осі, а колишні перегородки знімаються. Поширення тепла протягом часу  $Dt1$  тепер описується другим рівнянням.

Зауважимо, що тут саме задача керування (як і задача синтезу) в її точній постановці відноситься до класу обернених, оскільки вона передбачає визначення керуючих функціональних параметрів на основі заздалегідь заданого, необхідного результату (обернена задача керування). Алгоритмом розв'язування обернених задач слугує метод «вилки» з попереднім визначенням деякого початкового відрізка. Розв'язок задачі реалізується в два етапи: на першому реалізується відокремлення мінімуму нев'язки, на другому – визначається мінімум шуканої функції керування з відокремленого інтервалу. Зазначена процедура реалізується стандартно. Інакше кажучи, якщо  $\vartheta$  являє собою деяке дійсне значення шуканого кореня, тобто, коли  $a \leq \vartheta \leq b$ , а  $f(\vartheta)=0$ , то можна обчислити число  $w$  таким, що задовольняє умови:  $a \leq \vartheta \leq b$  та  $|\vartheta - w| < \varepsilon$ , тобто меншим від будь-якого наперед заданого малого числа  $\varepsilon$ . Подібна схема включена до складу математичного апарату керування БПОС.

#### Експериментальні дослідження

Для випробування функцій запропонованої установки було проведено кілька експериментів, коли дріт діаметром 20 мм із сталі 20Г2Р піддавався ТО. Режим ТО здійснювали шляхом нагрівання заготовки в межах міжкритичної зони температур. Для заданого матеріалу встановлено такі значення критичних точок:  $A_{c1} = 725$  °С;  $A_{c3} = 795$  °С. Нагрівання відбувалося до такого значення:  $A_{c1} + (10-30$  °С). Наступним етапом обробки була ізотермічна витримка протягом 45 с. Далі тривало охолодження сталі зі швидкістю

20-30 °С /с до температури 620 °С з подальшою ізотермічною витримкою протягом 45 с. Нарешті, на останньому етапі обробки зразок нагрівали зі швидкістю 15-25 °С /с до підкритичних температур.

Розглянемо один з них. В ході проведення експерименту одержані криві розподілу температури зразка по довжині і площині його перерізу. Моделювання таких температурних полів здійснюється з урахуванням зміни теплофізичних властивостей матеріалу під час його нагрівання.

У ході експерименту було проаналізовано структуроутворення в матеріалі зразків. На рис. 2а зображено початкову феритно-бейнітну (мартенситну) структуру металу. Остаточний вигляд структури матеріалу після сфероїдизації подано на рис. 2б. Структура являє собою перліт зернистий із стандартною оцінкою в 2 бали, його твердість становить 148-169 НВ.

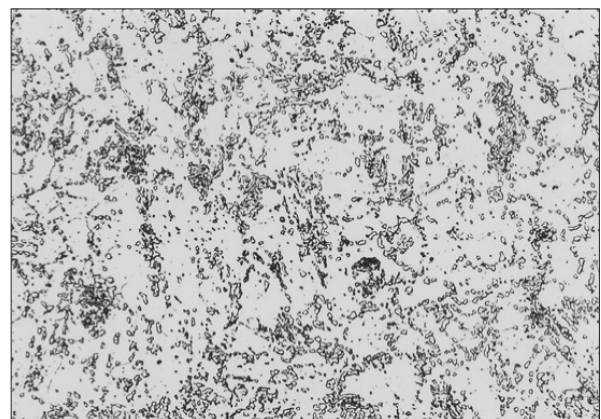
Отже, виконана сфероїдизація заготовки в умовах відповідних режимів ТО забезпечує надання матеріалу структури зернистого перліту. Причому швидкісна сфероїдизація зумовлює більш рівномірний розподіл глобул цементиту у феритній матриці (рис. 2б). Зразки із сталі майже однакової твердості після ТО набули дрібнодисперсної структури, що забезпечує більш високий рівень пластичності металу. Унаслідок швидкого нагрівання зразка й неповної аустенітизації сталі відбуваються певні зміни в морфології карбідної фази від пластинчастої до дрібнодисперсної глобулярної.

#### Висновки і перспективи подальших досліджень

Наукова новизна проведених досліджень полягає в тому, що на основі багатопроекторного обчислювального комплексу створено систе-



а)



б)

Рис. 2. Мікроструктура сталі 20Г2Р:

а – початкова феритно-бейнітна (мартенситна) структура,  $\times 500$ ;  
б – структура після відпалювання: перліт зернистий (бал 2),  $\times 500$

## АВТОМАТИЗАЦІЯ

му автоматизованого контролю температурних режимів ТО сталевго виробу в реальному часі з метою рекристалізації та сфероїдизівного відпалювання каліброваної сталі. Запропонований підхід дає можливість контролювати технологічні параметри ТО металу, зокрема температуру в центрі перерізу металевго виробу, що забезпечує надання матеріалу необхідних властивостей, причому на всій площині перерізу і по довжині зразка.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що вдалося удосконалити технологічний процес ТО металу за рахунок використання відповідних математичних моделей та комплексу програм. Застосування математичних моделей, які обробляються на багатопроцесорній обчислювальній системі дозволяє контролювати температурне поле металу в процесі його нагрівання, витримки та охолодження і тим самим забезпечує швидку адаптацію виробництва металопродукції до вимог споживача.

### Бібліографічний список

1. Долженков И. Е. Влияние пластической деформации и других предобработок на сфероидизацию карбидов в сталях / И. Е. Долженков // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 1. – С. 66-68.
2. Хасин Г. А. Электротермическая обработка и теплое волочение стали / Г. А. Хасин,

А. И. Дианов, Т. Н. Попова, Л. П. Кукарцева. – М.: Металлургия, 1984. – 152 с.

3. Пат. 57663 Україна, МПК G06F 15/16 (2011.01). Модуль вискоефективної багато-процесорної системи підвищеної готовності / Іващенко В. П., Башков Є. О., Швачич Г. Г., Ткач М. О.; власники: Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № у 2010 09341; заявл. 26.07.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.

4. Бобылев М. В. Подготовка структуры при электротермообработке сталей, применяемых для высадки высокопрочных крепежных изделий / М. В. Бобылев, В. Е. Гринберг, Д. М. Закиров, Ю. А. Лавриненко // Сталь. – 1996. – № 11. – С. 54-60.

5. Пат. 61944 Україна, МПК C21D 1/26 (2006.01), G06F 15/16 (2006.01). Установка для термичної обробки довгомірного сталевго виробу / Іващенко В. П., Башков Є. О., Швачич Г. Г., Ткач М. О., Соболенко М. О.; власники: Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № у 201014225; заявл. 29.11.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.

*Поступила 08.12.2014*

## Metallurgical and Mining Industry

[www.metaljournal.com.ua](http://www.metaljournal.com.ua)