

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки Дніпропетровської металургійної академії України, Дніпропетровськ, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки Дніпропетровської металургійної академії України, Дніпропетровськ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ МЕТАЛУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Розглянуті особливості розробки і використання багато процесорної обчислювальної системи з її математичним і програмним забезпеченням для моделювання режимів термічної обробки металевих заготовок. Мета роботи полягає в розробці моделі для термічної обробки довгомірного сталевого виробу, яка може бути використана для рекристалізації та сфероїдизаційного відпалювання каліброваної сталі. Запропоновано застосування сучасних багато процесорних обчислювальних комп'ютерних технологій для збільшення швидкодії та продуктивності обчислень, що дає змогу ефективно керувати технологічними процесами. За допомогою спеціального програмного забезпечення багато процесорна система здатна задавати й контролювати необхідні температурні режими на всій площині перерізу зразка при нагріванні й витримці металу, а при необхідності може контролювати тепловий режим обробки сталі в інтервалі температур відпалювання. Багато процесорна обчислювальна система із спеціальним програмним забезпеченням містить математичні моделі у вигляді рівняння теплопровідності. Такі рівняння розв'язуються із застосуванням методів розщеплення. Завдяки цьому підходу розв'язок двохвимірної рівняння зводиться до послідовності інтегрування одновимірних рівнянь простішої структури. Застосування числово-аналітичного методу забезпечує використання економічних і стійких алгоритмів розв'язування задач даного типу. Проведено експерименти з дослідження властивостей сталевих заготовок. Результати експериментів дозволяють рекомендувати запропонований підхід до моделювання швидкісних режимів обробки металу для розробки нових технологічних процесів.

Ключові слова: математична модель, багато процесорна обчислювальна система, інформаційний двоспрямований інтерфейс, контроль температурного режиму металу.

НОМЕНКЛАТУРА

БПОС – багато процесорна обчислювальна система;
БК – блок керування;
ВМ ПМ – виконавчий механізм протяжного механізму;
ВМ БІВТ – виконавчий механізм блока ізотермічної витримки температури;
ВМ БП – виконавчий механізм блока підстуджування;
ВМ БН – виконавчий механізм блока нагрівання;
ОЗТ – обернена задача теплопровідності;
ХОШ – холодне об'ємне штампування;
ТО – термічна обробка;
 A_{c_1} – температура фазового перетворення металу;
 T_n – температура нагрівання поверхні зразка;
 T_k – контрольована температура зразка;
 $T(r, t)$ – температура зразка на його площі поперечного перерізу;
 W – питома потужність;
 τ – критерій Фур'є;
 ϑ – дійсне значення шуканого кореня.

ВСТУП

На сьогодні у світі спостерігається стрімке зростання кількості БПОС та їх сумарної продуктивності. Це викликано тим, що такі системи стали загальнодоступними і дешевими апаратними платформами для високопродуктивних обчислень. При цьому різко зріс інтерес до проблематики обчислювальних мереж і широко поширюється розуміння того, що впровадження таких мереж матиме величезний вплив на розвиток людського суспільства, порівняний із впливом на нього появи на початку сто-

ліття єдиних електричних мереж. У зв'язку з цим, розглядаючи проблеми освоєння багато процесорних систем, слід брати до уваги і те, що вони є першою сходинкою у створенні таких обчислювальних мереж.

Крім того, сьогодні практика висуває перед ученими-прикладниками різного роду проблеми, повне вирішення яких в більшості випадків можливе лише за рахунок застосування багато процесорних обчислювальних комплексів. Так, наприклад, у металургійному виробництві відбувається багато найрізноманітніших і взаємопов'язаних процесів. У першу чергу, це технології виплавки й розливання залізобуглецевих сплавів, нагрівання, прокатки й термічної обробки металопродукції та ін. Виробнича практика свідчить, що ні інтенсифікація процесів металургійного виробництва, ні конструктивне вдосконалення різноманітного металургійного устаткування неможливі без вивчення й аналізу явищ тепло- та масообміну. В той же час, розв'язування зазначених задач за допомогою відомих стандартних підходів являє собою складну проблему, подолання якої можливе тільки за рахунок застосування сучасних багато процесорних 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 або ефективно керувати технологічними процесами, або взагалі створити передумови для розробки нових перспективних технологічних процесів.

У зв'язку з цим розробка й використання багатопроекторних обчислювальних комплексів з їх математичним та програмним забезпеченням є актуальною проблемою, що дозволяє значно скоротити кількість експериментальних досліджень і час, потрібний на їх проведення, а це дозволяє одержати необхідну інформацію для створення та впровадження різних технологічних нововведень.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В даній роботі розглядається проблема впровадження нових технологічних процесів термічної обробки металу. Для цього необхідно створити модель ТО металу, яку використовують при виготовленні високоміцних кріпильних виробів методом ХОШ без завершальної термічної обробки. Така модель має на меті поліпшити технологічні властивості металопрокату за рахунок забезпечення високої дисперсності й однорідності структури зразка на всій площині його перерізу. До того ж технологічний процес термічної обробки сталі повинен набувати таких переваг, як висока продуктивність, знижене енергоспоживання, поліпшення експлуатаційних характеристик. Цього можна досягти завдяки застосуванню багатопроекторної обчислювальної системи, виконаної у вигляді окремого модуля. За допомогою спеціального програмного забезпечення багатопроекторна система здатна задавати й контролювати необхідні температурні режими на всій площині перерізу зразка при нагріванні й витримці металу, а при необхідності може контролювати тепловий режим обробки сталі в інтервалі температур відпалювання.

Використання багатопроекторної обчислювальної системи з її програмним забезпеченням дозволить на основі математичної моделі процесу нагрівання зразка вже у виробничих умовах контролювати нагрівання дроту до моменту його переходу в аустенітний стан та настання температури фазової перекристалізації на всій площині перерізу довгомірного сталевго виробу, а потім здійснювати контроль необхідного режиму ізотермічної витримки в інтервалі температур відпалювання теж на всій площині перерізу зразка.

Застосування установки, що забезпечує реалізацію режиму сфероїдизівного відпалювання, зумовлює рівномірний розподіл глобул цементиту у феритній матриці, а це створює необхідні механічні властивості металу, потрібні для подальшого виконання холодної деформації. Разом з тим багатопроекторна обчислювальна система із спеціальним програмним забезпеченням як єдина база повинна включати 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 джерела тепла, Вт/м².

Крайові умови цієї задачі мають такий вигляд:

$$T(0, r, z) = f(r, \tau);$$

$$T(\tau, 1, z) = \text{var};$$

$$\frac{\partial T(\tau, 0, z)}{\partial r} = 0;$$

$$T(\tau, 0, z) \neq 0.$$

Рівняння (1) необхідно розв'язувати із застосуванням методів розщеплення, суть яких полягає в редукції складного оператора (1) до простих. Завдяки цьому підходу необхідно звести розв'язок даного рівняння до послідовності інтегрування одновимірних рівнянь простішої структури. Застосування числово-аналітичного методу повинно забезпечити використання економічних і стійких алгоритмів розв'язування задач даного типу.

Отже, основна мета даної роботи полягає в розробці моделі ТО довгомірного сталевго виробу, яка може бути використана для рекристалізації та сфероїдизівного відпалювання каліброваної сталі на основі використання багатопроекторних обчислювальних комплексів. В основу моделі було вирішено покласти спосіб ТО заготовки з низько- й середньовуглецевих сталей, призначених для холодної висадки [1].

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Традиційна технологія сфероїдизівного відпалювання сталі передбачає використання садчикових печей (ковпакових або шахтового типу). Недоліки традиційних способів підготовки заготовок до холодної висадки з подробицями викладені в відомій роботі Долженкова І. Є. [2, 3] і глибоко проаналізовані в роботі [4].

Альтернативою способу ТО з нагріванням виробів у печі служить електротермічний спосіб, який характеризується високою швидкістю нагрівання унаслідок впливу явищ електромагнітної індукції (індукційне нагрівання) або електроопору (електроконтактне нагрівання) [5]. Запровадження індукційного нагрівання у технологічній лінії для ТО дроту вже відоме у виробничій практиці [6, 7]. Для реалізації такої технології розроблено установку для виготовлення високоміцних кріпильних виробів без завершального термозміцнення. Але в даному випадку, під час проведення ТО заготовки не здійснюється контроль температурних режимів нагрівання, витримки й охолодження у зв'язку з відсутністю засобів виміру і контролю температури металу.

Іншим підходом до реалізації електротермічного способу обробки каліброваної сталі є установка [8], в якій передбачена термокамера і терморегульовальний екран. Але процес ТО характеризується значною тривалістю режиму відпалювання, тому що ізотермічна витримка й створення необхідного режиму охолодження проводиться у термокамері і потребує довгий час. За даними авторів тривалість відпалювання дорівнює від 30 до 90 хвилин, що не дозволяє синхронізувати замкнутий цикл виготовлення трипільних виробів.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Щоб вирішити окреслені вище проблеми, було розроблено установку для термічної обробки довгомірного сталевго виробу [4] з застосуванням БПОС [9]. Використання БПОС з її програмним забезпеченням дозволяє на основі математичної моделі процесу нагрівання зразка вже у виробничих умовах контролювати нагрівання дроту до переходу в аустенітну область до температури фазової перекристалізації на всій площині перерізу довгомірного сталевго виробу, а потім, розв'язавши ОЗТ, здійснювати контроль необхідного режиму ізотермічної витримки в інтервалі температур відпалювання на всій площині перерізу зразка.

На рис. 1 зображено проектну схему установки для ТО довгомірного сталевих виробу, де 1 – розмотувальний пристрій; 2 – правильно-тяговий пристрій, обладнаний виконавчим механізмом 3; 4 – індуктор нагрівального пристрою; 5 – генератор з виконавчим механізмом; 6 – пірометр; 7 – камера ізотермічної витримки з виконавчим механізмом 8; 9 – пірометр; 10 – камера регламентованого підстуджування дроту з виконавчим механізмом 11 для регулювання подачі водоповітряної суміші; 12 – пірометр; 13 – камера ізотермічної витримки з виконавчим механізмом 14; 15 – пірометр; 16 – пристрій для інтенсивної сфероїзації з виконавчим механізмом 17; 18 – пірометр; 19 – пристрій подачі дроту на подальший технологічний цикл; 20 – інформаційний двоспрямований інтерфейс збору даних з пристроїв 3, 7, 9, 12, 15, 18, приєднаний до блока керування 21 і до виконавчих механізмів (3, 5, 8, 11, 14, 17) відповідних пристроїв; 22 – інформаційний двоспрямований інтерфейс зв'язку блока керування БПОС 23.

Установка для ТО довгомірного сталевих виробу працює в описаній нижче послідовності. З розмотувального пристрою 1 через правильно-тяговий пристрій 2 дріт подається в індуктор нагрівального пристрою 4, де нагрівається до переходу в аустенітну стадію, набуваючи температури фазової перекристалізації.

Температура нагрівання контролюється пірометром 7. Підтримання температурного режиму здійснюється за допомогою блока керування 21 і БПОС 23. Сигнал з пірометра 6 через інформаційний двоспрямований інтерфейс 20 надходить у блок керування 21, а потім через інформаційний двоспрямований інтерфейс 22 – у БПОС 23, де згідно з результатом розв'язку математичної моделі прямої задачі теплопровідності, відбувається регулювання потужності генератора 5.

Потім розігрітий дріт потрапляє в камеру ізотермічної витримки 7, температура в якій регулюється виконавчим механізмом 8. При цьому сигнал з пірометра 9 через інформаційний двоспрямований інтерфейс 20 надходить у блок керування 21, а далі через інформаційний двоспрямований інтерфейс 22 у БПОС 23, де відповідно до результатів розв'язку математичної моделі ізотермічної витримки, здійснюється регулювання температурного режиму за допомогою виконавчого механізму 8.

Далі дріт переходить у камеру регламентованого підстуджування 10. Залежно від режиму ТО, марки сталі й діаметра дроту задається необхідна швидкість підстуджування в інтервалі температур від 750 до 700 °С.

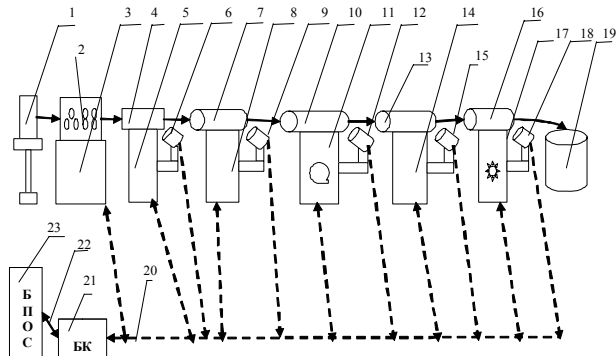


Рисунок 1 – Схема установки термічної обробки сталевих виробу

У цьому температурному інтервалі аустеніт безперервно втрачає вуглець і, досягнувши необхідної концентрації останнього, зазнає поліморфних перетворень, перетворившись на ферит, таким чином відбувається розпад аустеніту за аномальним механізмом. Температура підстуджування контролюється блоком керування 21 і БПОС 23, де з урахуванням температури, зафіксованої пірометром 12, і відповідно до результату розв'язку математичної моделі ОЗТ, виконавчий механізм 11 подає водоповітряну суміш, збільшуючи або зменшуючи її кількість, залежно від заданого температурного режиму підстуджування.

Потім дріт потрапляє в камеру ізотермічної витримки 13, температура в якій регулюється виконавчим механізмом 14. Під час ізотермічної витримки завершується утворення квазіевтектоїду (перліту), що включає зони з підвищеною концентрацією вуглецю і з готовими цементитними частинками. Сигнал із пірометра 15 через інформаційний двоспрямований інтерфейс 20 надходить у блок автоматичного керування 21, а далі через інформаційний двоспрямований інтерфейс 22 – у БПОС 23, де на підставі результатів розв'язку математичної моделі ізотермічної витримки через блок керування 21 здійснюється регулювання температурного режиму в камері 13.

Після цього дріт подається в пристрій інтенсивної сфероїзації 17, де здійснюється зміна температурного режиму із швидкістю від 15 до 20 °С/хв з досягненням підкритичної температури A_{c1} (у цій температурній зоні відбувається інтенсивна сфероїзація цементитних частинок). Сигнал із пірометра 18 через інформаційний двоспрямований інтерфейс 20 надходить у блок автоматичного керування 21, а потім через інформаційний двоспрямований інтерфейс 22 – у БПОС 23, де з урахуванням результатів розв'язку математичної моделі прямої задачі теплопровідності відбувається регулювання температурного режиму в пристрої інтенсивної сфероїзації 16. Далі через пристрій подачі 19 дріт переходить до наступного технологічного циклу його обробки.

На рис. 2 подано блок-схему контурів системи керування установкою термічної обробки довгомірного сталевих виробу. Така система керування має у своєму розпорядженні блоки, які дозволяють отримати інформацію про поточні параметри керованих процесів. Особливість її полягає в тому, що на кожному з п'яти етапів технологічної обробки зразка розв'язується двовимірною задачею теплопровідності. При цьому програмні засоби БПОС 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.

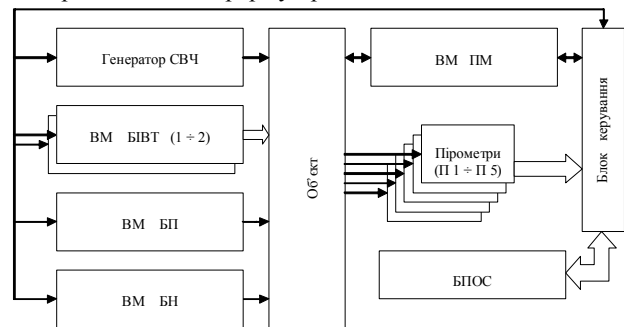


Рисунок 2 – Блок-схема контурів системи керування установкою термічної обробки довгомірного сталевих виробу

БПОС із спеціальним програмним забезпеченням як єдина база містить математичні моделі у вигляді рівняння теплопровідності (1). При цьому 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. Процес створення зазначених алгоритмів висвітлюється в роботах [10, 11].

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 етапі реалізується відокремлення мінімуму нев'язки, на другому – визначається мінімум шуканої функції керування з відокремленого інтервалу. Зазначена процедура реалізується стандартно. Інакше кажучи, якщо ϑ 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 умові: $a \leq \vartheta \leq b$ та $|\vartheta - w| < \varepsilon$, тобто меншим від будь-якого наперед заданого малого числа ε . Подібна схема включена до складу математичного апарату керування БПОС. На всіх циклах ТО металу використовується математична модель (1), тому результати моделювання будуть стосуватись циклу первинного нагрівання металу.

Проблема моделювання полягає в тому, що для забезпечення необхідної точності й стійкості обчислень доводиться брати розрахункову сітку з чималою кількістю вузлів і виконувати безліч ітерацій. Унаслідок цього число арифметичних операцій, що необхідні для розрахунку температурних полів, перебуває в межах $10^7 \div 10^8$ вузлів, а коли крок за часовою ознакою становить 10^{-2} с, то загальна кількість вузлів для обчислень може досягти 10^{20} і більше. Однопроцесорні обчислювальні системи не можуть впоратись з таким навантаженням під час моделювання в реальному масштабі часу, тому найбільш виправданим буде застосування багатопроцесорних систем, що й було здійснено з метою удосконалення технології ТО довгомірного сталевих виробу.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для випробування функцій запропонованої установки було проведено кілька експериментів, коли дрід діаметром 20 мм із сталі 20Г2Р піддавався ТО. Розглянемо один з характерних дослідів.

За початкову було взято феритно-перлітну структуру заготовки. Процес ТО матеріалу здійснювався шляхом нагрівання заготовки в межах міжкритичної зони температур. Для заданого матеріалу встановлено такі значення критичних точок: $A_{c1} = 725$ °C; $A_{c3} = 795$ °C.

Нагрівання відбувалось до такого значення: $A_{c1} + (10-30$ °C). Протягом наступного етапу обробки матеріалу було реалізовано процес ізотермічної витримки протягом 45 с. Далі тривало охолодження виробу зі швидкістю $20-30$ °C/с до температури 620 °C з подальшою ізотермічною витримкою протягом 45 с. Нарешті, на останньому етапі обробки матеріалу зразок нагрівали зі швидкістю $15-25$ °C/с до підкритичних температур. Графічну інтерпретацію режиму ТО металу відображено на рис. 3.

Механічні характеристики визначалися за результатами замірів твердості зразків. Випробування на розтягнення проведено на машині FU10000ez. Дослідження мікроструктури металу проводилося на світловому металографічному мікроскопі Neophot-2 з використанням структурного аналізатора «Eriquant», додатково обладнаного пристроєм «Anasonic» для цифрової реєстрації зображення.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

За результатами експериментів одержані криві розподілу температури зразка на площині його перерізу (рис. 4), де T_H – температура нагрівання поверхні зразка,

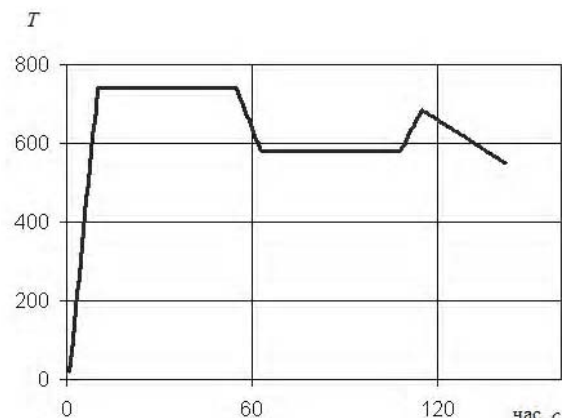


Рисунок 3 – Графік режиму термічної обробки сталі 20Г2Р

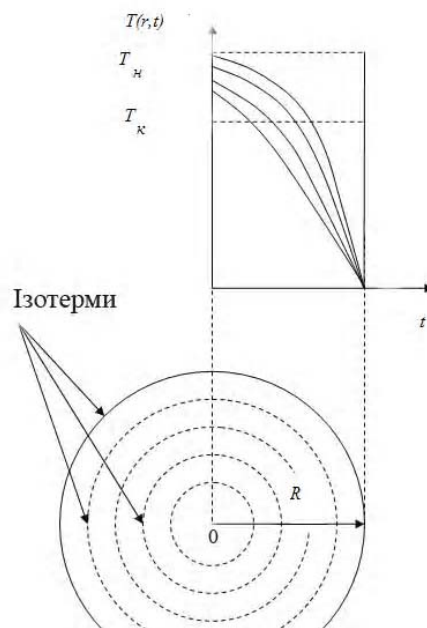


Рисунок 4 – Криві розподілу температури зразка на площині його перерізу

T_k – контрольована засобами БПОС температура фазового перетворення металу (A_{c1}) на площині перерізу зразка. Моделювання таких температурних полів здійснюється з урахуванням зміни теплофізичних властивостей матеріалу під час його нагрівання.

Криві розподілу температури зразка по довжині в процесі його нагрівання зображено на рис. 5, де цифрою 1 позначено температуру поверхні (T_H), а цифрою 2 – температуру в центрі площини перерізу. Тут зона I відображає процес нагрівання зразка до заданої температури на його поверхні, а зона II демонструє вихід на заданий температурний режим у центрі площини перерізу зразка.

На рис. 6а,б зображено мікроструктуру зразків до і після сфероїдизації, при цьому твердість зразків після ТО набула значень 150–169 НВ.

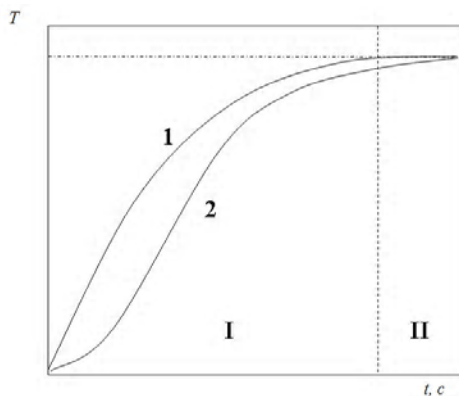
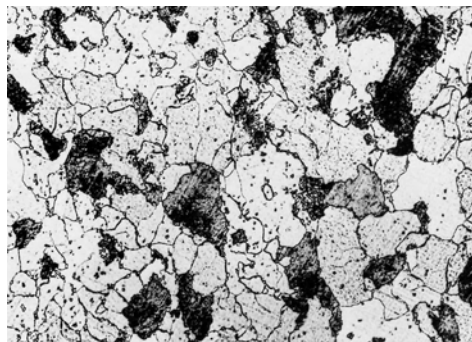
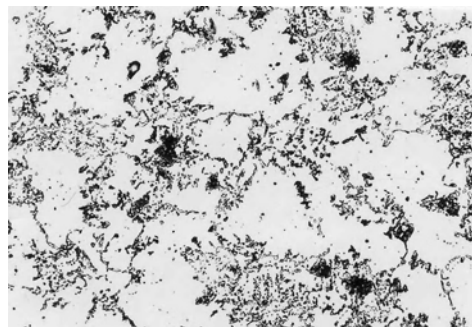


Рисунок 5 – Графіки розподілу температури зразка по його довжині в процесі нагрівання



а



б

Рисунок 6 – Мікроструктура сталі 20Г2Р:
а – початкова феритно-перлітна структура, $\times 500$; б – структура після відпалювання – перліт зернистий (бал 5), $\times 500$

6 ОБГОВОРЕННЯ

Виконана сфероїдизація карбідної фази металу в умовах відповідних режимів ТО заготовок забезпечує надання матеріалу структури зернистого перліту. Причому швидкісна сфероїдизація зумовлює більш рівномірний розподіл глобул цементиту у феритній матриці (рис. 6б). 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.

Технічний результат, що досягається при запровадженні запропонованої системи, полягає в тому, що забезпечується висока дисперсність й однорідність структури зразка на всій площині його перерізу, при цьому технологічний процес ТО сталі характеризується високою продуктивністю, малим енергоспоживанням, поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Застосування установки для реалізації режиму сфероїдизівного відпалювання зумовлює рівномірний розподіл глобул цементиту у феритній матриці, а значить забезпечує необхідні механічні властивості металу для його подальшої холодної деформації.

Відзначимо, що розв'язування задач, визначених в даній роботі, зазвичай, відбувається на основі застосування апарату різницевих рівнянь, який передбачає обов'язкову заміну похідних різницевиими співвідношеннями.

Виконані в даній роботі дослідження показують, що методи розв'язування задач даного класу мають бути не тільки різноманітними, але й поєднувати оцінювання кількісних показників із можливостями якісного аналізу. На сьогодні намітилися певні тенденції в розробці числово-аналітичних методів із складною логічною структурою, але вони мають порівняно з кусково-різницевиими методами вищий порядок точності й можливість побудови алгоритмів, адаптованих за порядками апроксимації. З обчислювальної точки зору такий підхід відрізняється певною громіздкістю, але він дає своєрідний еталон для порівняння з іншими практичними методами. Але, зважаючи на переваги проведення обчислювального експерименту засобами багатопроекторної системи, можна стверджувати, що обставина, яка стримувала розвиток числово-аналітичного підходу, на сьогодні втрачає свою актуальність. У зв'язку з цим, для розв'язування моделі (1), у даній роботі набула подальшого розвитку ідея розробки схем підвищеного порядку точності на основі числово-аналітичного підходу до розв'язування багатьох досліджуваних задач.

ВИСНОВКИ

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 виробничних умовах. Скорочення кількості експериментальних досліджень та часу на їх проведення з одержанням необхідної інформації для побудови й упровадження технологічних розробок можна здійснити шляхом застосування багатопроекторних об-

числювальних комплексів. У статті розв'язана актуальна задача контролю температурних режимів процесу рекристалізації та сфероїдизівного відпалювання каліброваної сталі шляхом застосування багатопроекторної системи, що дозволяє узгоджувати часові інтервали технологічного процесу відпалювання.

Наукова новизна проведених досліджень полягає в тому, що уперше на основі багатопроекторної обчислювальної системи створено модель швидкісної ТО довгомірного сталевого виробу в реальному часі з метою рекристалізації та сфероїдизівного відпалювання каліброваної сталі й виготовлення високоміцних кріпильних виробів методом ХОШ без завершальної ТО. Запропонований підхід дає можливість контролювати технологічні параметри в режимах ТО металу, зокрема температуру в центрі перерізу металевого виробу, що забезпечує надання матеріалу необхідних властивостей, причому на всій площині перерізу і по довжині зразка. Цього вдалося досягти за рахунок застосування багатопроекторної обчислювальної системи, що має вигляд окремого модуля, а за допомогою спеціального програмного забезпечення вона здатна задавати й контролювати необхідні температурні режими на всій площині перерізу зразка при нагріванні й витримці металу. Порівняно з традиційними підходами, було реалізовано можливість поліпшити технологічні властивості металопродукату за рахунок забезпечення високої дисперсності й однорідності структури зразка на всій площині його перерізу.

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 багатопроекторній обчислювальній системі дозволяє контролювати температурне поле металу в процесі його нагрівання, витримки та охолодження і забезпечує, тим самим, швидку адаптацію виробництва металопродукції до вимог споживача.

Втілення розробленого підходу для ТО металу на основі запровадження багатопроекторної обчислювальної системи створює проблему узгодження можливостей процесорів і мережного інтерфейсу багатопроекторної системи. Отже, перспективними подальшими дослідженнями є шляхи вирішення зазначеної проблеми на прикладі застосування багатопроекторних систем, що складаються із різних типів процесорів. За таких умов необхідно вивести аналітичні співвідношення для встановлення оптимального числа вузлів багатопроекторної системи з урахуванням обчислювальних можливостей певних процесорів.

ПОДЯКИ

Роботу виконано відповідно з тематичними планами наукових досліджень Національної металургійної академії України. Дослідження проведені в рамках бюджетних і госпдоговірних робіт:

Швачич Г. Г.¹, Соболенко А. В.²

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної математики та вичислительной техники Днепропетровской металлургической академии Украины, Днепропетровск, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и вычислительной техники Днепропетровской металлургической академии Украины, Днепропетровск, Украина

– «Розробка теоретичних основ фізико-технічних процесів обробки маловуглицевих економно легованих сталей з бейнітною структурою», номер державної реєстрації № ДР 0106U002210;

– «Математичне моделювання режимів термічної обробки при швидкісному циклічному нагріві і охолодженні довгомірного виробу», номер державної реєстрації № ДР 0107U002839.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. України № 36892, МПК С 21D 1/26 С21D 1/78. Спосіб термічної обробки прокату з низько- і середньовуглицевих сталей для холодного висадження / В. П. Ковпак, А. М. Лещенко, М. О. Соболенко, Г. В. Кокашинська ; власник : Національна металургійна академія України. – № 200807153; заявл. 23.05.2008; опубл. 10.11.2008, Бюл. № 21.
2. Долженков И. Е. Термическая и деформационно-термическая обработка металлопроката / И. Е. Долженков // Теория и практика металлургии. – 2002. – № 3. – С. 30–36.
3. 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.
4. Пат. 61944 Україна, МПК С21D 1/26 (2006.01), G06F 15/16 (2006.01). Установка для термической обработки долгомерного сталевого виробу / В. П. Іващенко, С. О. Башков, Г. Г. Швачич, М. О. Ткач, М. О. Соболенко ; власники : Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № u 201014225; заявл. 29.11.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.
5. Электротермическая обработка и теплое волочение стали / [Г. А. Хасин, А. И. Дианов, Т. Н. Попова, Л. П. Кукарцева]. – М. : Металлургия, 1984. – 152 с.
6. 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.
7. Бобылев М. В. Оптимизация режимов отжига с индукционным нагревом сталей 20Г2Р и 38ХГНМ / М. В. Бобылев, Д. М. Закиров, Ю. А. Лавриненко // Сталь. – 1999. – № 4. – С. 67–70.
8. Патент РФ 2137847, кл. С 21 D 1/32, С 21 D 9/60, С 21 D 11/00. Установка для термообработки калиброванной стали / Д. М. Закиров, М. В. Бобылев, Ю. А. Лавриненко, Л. П. Лебедев, В. И. Сьюльдин ; Патентообладатель: Открытое акционерное общество «Автонормаль». – № 98117255/02; заявл. 16.09.1998; опубл. 20.09.1999.
9. Пат. 57663 Україна, МПК G06F 15/16 (2011.01). Модуль високоєфективної багатопроекторної системи підвищеної готовності / В. П. Іващенко, С. О. Башков, Г. Г. Швачич, М. О. Ткач ; власники : Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № u 2010 09341; заявл. 26.07.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.
10. Швачич Г. Г. Об алгебраическом подходе в концепции распределенного моделирования многомерных систем / Г. Г. Швачич // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 6(61). – С. 73–78.
11. Швачич Г. Г. Математическое моделирование одного класса задач металлургической теплофизики на основе многопроекторных параллельных вычислительных систем / Г. Г. Швачич // Математичне моделювання. – 2008. – № 1 (18). – С. 60–65.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2014.

Після доробки 19.12.2014.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В работе рассмотрены особенности разработки и использования многопроцессорной вычислительной системы с ее математическим и программным обеспечением для моделирования режимов термической обработки стальных заготовок. Цель работы: разработка модели режима термической обработки длинномерного стального изделия, которая может быть использована для рекристаллизации и сфероидизирующего отжига калиброванной стали. Предложено использование современных многопроцессорных вычислительных компьютерных технологий для увеличения скорости и продуктивности вычислений, что обеспечивает эффективное управление технологическим процессом. При помощи специального программного обеспечения многопроцессорная система способна задавать и контролировать необходимые температурные режимы на всей плоскости поперечного сечения образца при нагреве и выдержке металла, а при необходимости может контролировать тепловой режим обработки стали в интервале температур отжига. Многопроцессорная вычислительная система со специальным программным обеспечением включает математические модели в виде уравнения теплопроводности. Такие уравнения решаются с применением методов расщепления. Благодаря этому подходу решение двумерного уравнения сводится к последовательности интегрирования одномерных уравнений более простой структуры. Применение численно-аналитического метода обеспечивает использование экономических и устойчивых алгоритмов решения задач данного типа. Проведены эксперименты с исследованием свойств стальной заготовки. Результаты экспериментов позволяют рекомендовать предлагаемый подход к созданию моделей скоростных режимов обработки металла для разработки новых технологических процессов.

Ключевые слова: математическая модель, многопроцессорная вычислительная система, информационный двунаправленный интерфейс, контроль температурного режима металла.

Shvachych G. G.¹, Sobolenko O. V.²

¹Dr. Sc., Professor, Chief of the Department of Applied Mathematics and Computer Science of the National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine

²PhD, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Computer Science of the National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine

SIMULATION OF SPEED SCHEDULES FOR METAL ON THE BASIS OF USING THE HIGH-PERFORMANCE MULTIPROCESSOR COMPUTER SYSTEMS

The paper deals the features of the development and use of the multiprocessor computing system with mathematical and software of the latter for simulation of heat treatment of the steel billets. Objective of the work: developing the model of heat treatment of a long steel product, which can be used for recrystallization and spheroidizing annealing of calibrated steel. The use of the up-to-date multiprocessor computing technologies had been proposed for increasing speed and productivity of computations, what maintains the effective control of the technological process. Through the special software the multiprocessor system is able to set and control necessary temperature conditions on all plane of cross-sectional of standard at heating and self-control of metal, and if necessary maybe began to control the thermal mode of treatment in the interval of temperatures of annealing. The multiprocessor computer system with the special software includes mathematical models as equation of heat conductivity. Such equations decide with the use of methods of breaking up. Due to this approach the decision of two-dimensional equation is taken to the sequence of integration of one-dimensional equations of more simple structure. Application of numeral-analytical method provides the use of economic and steady algorithms of decision of problems of this type.

Experiments had been carried out with studying the properties of a steel billet. Results of the experiments allow recommending the proposed approach to creating models of high-speed schedules of metal treatment for development of new technological processes.

Keywords: mathematical model, multiprocessor computing system, information bidirectional interface, control of the temperature schedule of metal.

REFERENCES

1. Kovpak V. P., Leshtshenko A. M., Sobolenko M. O., Kokashinska G. V. Pat. Ukrainy № 36892, MPK C 21D 1/26 C21D 1/78. Sposib termichnoi obrobky prokatu z nyzko- i seredniovgletsevykh stalej dlya kholodnogo vysadzhenya ; vlasnyk : Natsionalna metalurgijna akademiya Ukrainy, №200807153; zayavl. 23.05.2008; opubl.10.11.2008, Bul. №21.
2. Dolzhenkov I. Ye. Termicheskaya i deformatsionno-termicheskaya obrabotka metalloprokata, *Teoriya i praktika metallurgii*, 2002, No. 3, pp. 30–36.
3. Dolzhenkov I. Ye. Vliyanie plasticheskoy deformatsii i drugih predobrabotok na sferoidizatsiyu karbidov v stalajch, *Teoriya i praktika metallurgii*, 2007, No. 1, pp. 66–68.
4. Ivashchenko V. P., Bashkov Ye. O., Shvachich G. G., Tkach M. O., Sobolenko M. O. Pat. 61944 Ukraina, MPK C21D 1/26 (2006.01), G06F 15/16 (2006.01). Ustanovka dlya termichnoi obrobki dovgomirnogo stalevogo vyrobu ; vlasnyky, Natsionalna metalurgijna akademiya Ukrainy, Donetskyj natsionalnyj tekhnichnyj universytet, № u 201014225; zayavl. 29.11.2010; opubl. 10.08.2011, Bul. №15.
5. Khasin G. A., Dianov A. I., Popova T. N., Kukartseva L. P. Elektrotermicheskaya obrabotka i typloje volocheniye stali. Moscow, Metallurgiya, 1984, 152 p.
6. Bobylev M. V., Grinberg V. Ye., Zakirov D. M., Lavrinenko Yu. A. Podgotovka stryktury pri elektrotermoobrabotke stalej, primenyayemykh dlya vysadki vysokoprochnykh krepuzhnykh izdelij, *Stal*, 1996, No. 11, pp. 54–60.
7. Bobylev M. V., Zakirov D. M., Lavrinenko Yu. A. Optimizatsiya rejimiv otjiga s induktsionim nagrevom staltej, primenyaemich dlya visadki visokoprochnich krepjnykh itsdeliy, *Stal*, 1999, No. 4, pp. 67–70.
8. Zakirov D. M., Bobylev M. V., Lavrinenko Yu. A., Lebedev L. P., Syuldin V. I. Patent RF 2137847, kl. C 21 D 1/32, C 21 D 9/60, C 21 D 11/00. Ustanovka dlya termoobrabotki kalibrovannoj stali; Patentobladatel: Otkrytoje aktsionernoye obshtshestvo «Avtonormal», №98117255/02; zayavl. 16.09.1998; opubl. 20.09.1999.
9. Ivashchenko V. P., Bashkov Ye. O., Shvachych G. G., Tkach M. O. Pat.57663 Ukraina, MPK G06F 15/16 (2011.01). Modul vysokoeffektivnoi bagatoprotsesnnoi systemy pidvyshtshenoj gotovnosti ; vlasnyky: Natsionalna metalurgijna akademiya Ukrainy, Donetskyj natsionalnyj tekhnichnyj universytet. № u 2010 09341; zayavl. 26.07.2010; opubl. 10.03.2011, Bul. №5.
10. Shachich G. G. Ob algebraicheskom podkhode v kontseptsii raspredelyonnogo modelirovaniya mnogomernykh sistem, *Teoriya i praktika metallurgii*, 2007, No.6(61), pp. 73–78.
11. Shvachich G. G. Matematicheskoye modelirovaniye odnogo klassa zadach metallurgicheskoy teplofiziki na osnovyе mnogoprotsesnnykh parallelnykh vychislitelnykh sistem, *Matematychnе modelyuvannya*, 2008, No. 1(18), pp. 60–65.