

УДК. 621.771.23.016.3.519.

Ткаченко В.І.¹, Сімкін О.І.²

**ВДОСКОНАЛЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ
ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ТА ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЯ**

Детально проаналізовано процес охолодження листового прокату з урахуванням нерівномірностей розподілу температур по площі листового прокату та теплових ефектів структурних перетворень в сталях. Розроблено комплексну математичну модель та її програмну реалізацію. Порівняльний аналіз результатів, отриманих за допомогою розробленої моделі та відомих алгоритмів, показав її адекватність.

Листовий прокат є одним з головних видів продукції металургійних підприємств України і зарубіжжя. Досягнення його високої якості є можливим за умов отримання сприятливого комплексу механічних властивостей сталей в результаті термічної або термомеханічної обробки. Визначальним етапом цих процесів є охолодження, для проведення якого в наш час, частіше за все, застосовуються, окремо або в різній послідовності, такі середовища як: вода, повітря, піч. За цих умов практично неможливо, зокрема, отримати найбільш сприятливе поєднання необхідних властивостей листового прокату багатьох сталей, яке забезпечує структура нижнього бейніту [1]. Перспективним вирішенням цієї проблеми є застосування водоповітряної суміші для охолодження металопрокату. За цих умов, обов'язковим є забезпечення потрібного виду лінії охолодження у відповідності до термокінетичної діаграми сталі [2], що може бути досягнуто тільки при автоматизованому керуванні швидкістю охолодження прокату протягом усього процесу. Суттєвий вплив на якість листового прокату справляють також: нерівномірність розподілу температур та структурних складових в межах площі та товщини прокату, теплові ефекти під час структурних перетворень та ін., дія яких не враховується існуючими моделями охолодження.

Метою роботи є розробка вдосконаленої комп'ютерної моделі охолодження листового прокату, з урахуванням нерівномірності охолодження по площі листа, крайових ефектів та тепла, що виділяється в результаті реакцій структурних перетворень.

Математичне моделювання охолодження прокату здійснювали шляхом розв'язання задачі теплопровідності за допомогою явної схеми розв'язку диференціальних рівнянь. При моделюванні враховуються неконтрольовані збурення, такі як нерівномірність охолодження по площі листа, крайові та теплові ефекти. Теплопередача моделюється в одній восьмій об'єму листа, яка відображає необхідні граничні умови теплообміну. Цей об'єм розділяється на чарунки, кількості яких є одними з вихідних параметрів моделі. Вихідними параметрами моделі слугують також: густина металу; геометричні розміри листа; коефіцієнти теплоємності, теплопровідності та тепловіддачі; температура охолоджуючого середовища; температура металу на початку охолодження; температури початку та кінця структурних перетворень.

Кількість тепла, яка передається шляхом внутрішнього теплообміну, розраховується для кожної чарунки, що є «не граничною» за своїм розташуванням в межах листа, з застосуванням виразів (1) та (2):

– для чарунок, що розташовані вздовж осі OX:

$$Q_i^x(T, i, j, k, t) = \frac{T_{i+1, j, k, t} + T_{i-1, j, k, t} - 2T_{i, j, k, t}}{\Delta x} \Delta y \Delta z, \quad (1)$$

де $T_{i, j, k, t}$ – температура чарунки за координатами i, j, k, t ;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – розміри чарунки.

– для чарунок, які належить центральній площині OYZ ($i = 0$):

¹ ПДТУ, аспірант

² ПДТУ, канд. техн. наук, доц.

$$Q_I^X(T, i, j, k, t) = \frac{2T_{i+1, j, k, t} - 2T_{i, j, k, t}}{\Delta x} \Delta y \Delta z. \quad (2)$$

Внутрішній теплообмін вздовж осі OX для чарунок, що визначені як «граничні», розраховується за допомогою формули:

$$Q_I^X(T, i, j, k, t) = \frac{T_{i-1, j, k, t} - T_{i, j, k, t}}{\Delta x} \Delta y \Delta z, \quad (3)$$

Таким же чином моделюється внутрішній теплообмін для відповідних чарунок вздовж осей OY та OZ

Загальна кількість тепла, що передається шляхом внутрішнього теплообміну, розраховується за формулою:

$$Q_I(T, i, j, k, t) = \lambda(T_{i, j, k, t}) \cdot (Q_I^X(T, i, j, k, t) + Q_I^Y(T, i, j, k, t) + Q_I^Z(T, i, j, k, t)), \quad (4)$$

де $\lambda(T_{i, j, k, t})$ – коефіцієнт теплопровідності;

Кількість тепла, що віддає метал до охолоджуючого середовища шляхом зовнішнього теплообміну вздовж осі OX, розраховується для граничних чарунок як:

$$Q_E^X(T, i, j, k, t) = \Delta y \cdot \Delta z \cdot (T_{bord} - T_{i, j, k, t}), \quad (5)$$

де T_{bord} – температура охолоджуючого середовища.

Вздовж осей OY та OZ зовнішній теплообмін розраховується за формулами, аналогічними (5).

Кількість тепла, що передано шляхом зовнішнього теплообміну в об'ємі листа, становить:

$$Q_E(T, i, j, k, t) = \alpha(T_{i, j, k, t}) \cdot (Q_E^X(T, i, j, k, t) + Q_E^Y(T, i, j, k, t) + Q_E^Z(T, i, j, k, t)), \quad (6)$$

де $\alpha(T_{i, j, k, t})$ – коефіцієнт тепловіддачі;

Загальна кількість тепла визначається за формулою [3]:

$$Q_{OV}(T, i, j, k, t) = Q_I(T, i, j, k, t) + Q_E(T, i, j, k, t). \quad (7)$$

Кількість тепла, що виділяється під час реакцій структурних перетворень, розраховували як:

$$Q_{st}(Tr, T, i, j, k, t) = (Tr_{i, j, k, t+1} - Tr_{i, j, k, t}) \cdot \frac{\chi}{M} \Delta V \cdot \rho(T_{i, j, k, t}), \quad (8)$$

де $Tr_{i, j, k, t}$ – масив значень об'ємної доли аустеніту, що зазнав перетворень;

$\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ – об'єм чарунки;

χ – питома теплота перетворення аустеніту;

M – молярна маса заліза, кг/моль.

Швидкість структурних перетворень визначається за допомогою виразу (9), що враховує особливості діаграм ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту сталей різного хімічного складу:

$$V_{st}(\eta, T) = \sqrt{-\ln(1-\eta)} \cdot (1-\eta) \cdot \exp\left[\frac{1}{e} \cdot \left(a - \frac{Q}{8.31 \cdot T}\right)^b \cdot \left[(c-T) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{T_p - T}{f}\right)\right) - d\right]\right], \quad (9)$$

де η – об'ємна доля конкретної структурної складової;

a, b, c, d, e, f, Q – параметри апроксимації реальної діаграми ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту сталі, які визначаються, наприклад, методом багатофакторної оптимізації;

T_p – температура початку реакції на ізотермічній діаграмі для даного структурного перетворення [4].

При розрахунках поточної температури в чарунці, з метою отримання стабільного розв'язку рівняння теплопровідності, використовували обмеження – максимальна відносна зміна параметра (температури або кількості аустеніту) в чарунці за кожен крок по часу має не перевищувати 0,001. Ця межа стійкості була встановлена на підставі багаторазового повторення розрахунків. Звідси, оптимальне значення кроку по часу встановлювали як:

$$\Delta t = \frac{a}{b + \max}, \quad (10)$$

де \max – максимальна відносна зміна параметра;

$a = 0,01$; $b = 0,0001$ – параметри, що забезпечують стійкість розв'язку рівняння теплопровідності.

Графік зміни кроку по часу протягом охолодження листового прокату показано на рис. 1. З застосуванням отриманих значень Δt розраховували ступінь перетворення аустеніту [4]:

$$Tr_{i,j,k,t+1} = Tr_{i,j,k,t} + V_{st}(Tr_{i,j,k,t}, T_{i,j,k,t}) \cdot \Delta t. \quad (11)$$

а також температуру в чарунці:

$$T_{i,j,k,t+1} = T_{i,j,k,t} + \frac{Q_{OV}(T_{i,j,k,t}, i, j, k, t) \cdot \Delta t + Q_{st}(Tr_{i,j,k,t}, T_{i,j,k,t}, i, j, k, t) \cdot \Delta t}{C(T_{i,j,k,t}) \cdot \rho(T_{i,j,k,t}) \Delta V} \quad (12)$$

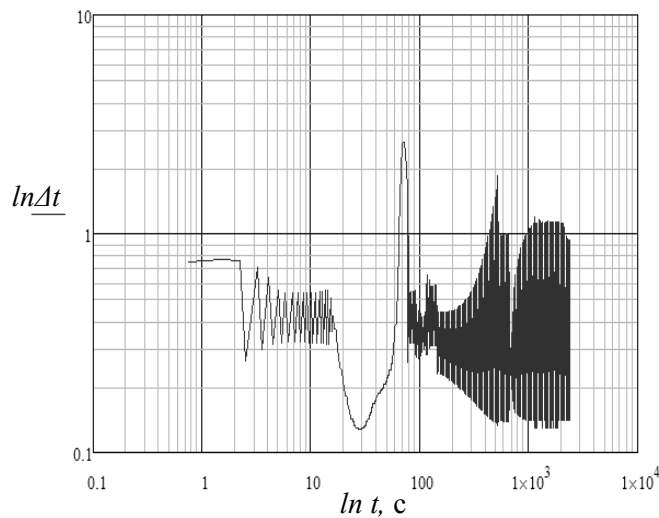


Рис. 1 – Графік зміни кроку по часу впродовж процесу охолодження

Отримані розподілення температур по об'єму листового прокату в залежності від часу утворюють криві охолодження, за допомогою яких на термодинамічних діаграмах визначаються мікроструктури, що формуються в наданих умовах термічної обробки сталей.

Розроблена модель була застосована для з'ясування можливості охолодження листового прокату, марка сталі 15X2H2, розміри $0,04 \times 3 \times 10$ м, згідно із заданим режимом, що включає до себе ізотермічну витримку при 450°C . Як можна бачити з рис. 2а, отримані результати свідчать про достатньо високу ступінь відповідності фактичного та заданого режимів охолодження. З метою порівняння можливостей запропонованої моделі з існуючими алгоритмами розрахунків процесу теплообміну, на рис. 2б наведені криві охолодження різних об'ємів листа вказаних розмірів, що побудовані шляхом числового розв'язку рівняння теплопровідності за стандартною методикою. Звертає на себе увагу суттєва невідповідність наданої та розрахованої кривих на ділянці ізотермічної витримки, що є наслідком ігнорування теплового ефекту структурного перетворення вказаної сталі при охолодженні.

Запропонована модель може бути застосована для детальних розрахунків процесу охолодження листового прокату зі сталей, в яких відбуваються структурні перетворення в досліджуваних інтервалах температур, зокрема у складі автоматизованих систем водоповітряного охолодження прокату з високоміцних сталей.

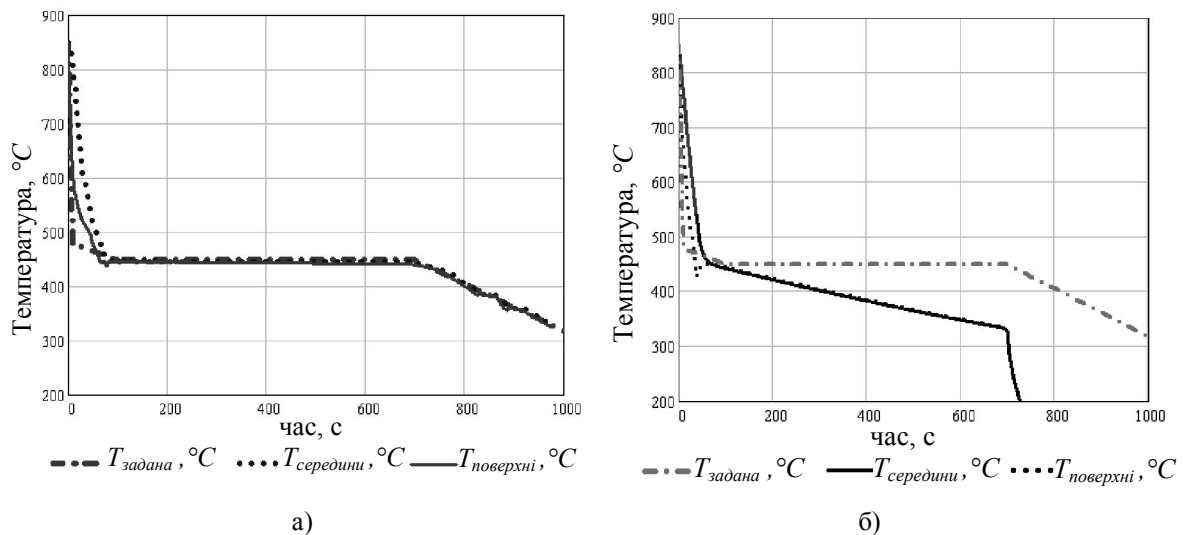


Рис. 2 – Криві охолодження листового прокату із сталі марки 15X2H2, (0,04×3×10 м) розраховані за допомогою: а) розробленої моделі; б) стандартних методик

Висновки

1. Для забезпечення необхідних механічних властивостей листового прокату потрібно керувати швидкістю охолодження по ходу процесу за допомогою автоматизованої системи керування таким чином, щоб забезпечити відповідний до термокінетичної діаграми сталі вид лінії охолодження.
2. Розроблено та реалізовано алгоритм керування процесом охолодження прокату. Крива охолодження листового прокату, що розрахована за допомогою моделі, відповідає заданому режиму з необхідною точністю.
3. Отримані результати свідчать про те, що тепло, яке виділяється в результаті реакцій структурних перетворень суттєво впливає на процес охолодження металовиробів.

Перелік посилань

1. Технология термической обработки стали: Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1981. – 608 с
2. Ткаченко В.І. Розробка концепції АСУ ТП водоповітряного охолодження листового прокату / В.І. Ткаченко, О.І. Сімкін // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих: зб. наук. праць VIII міжнар. наук.-техн. конф. аспірантів та студентів. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – С. 245 – 247.
3. Арманович И.Г. Уравнения математической физики / И.Г. Арманович, В.И. Левин– М.: Наука, 1969. – 286 с.
4. Ткаченко К.И. Компьютерное моделирование режимов противфлокеной обработки / К.И. Ткаченко // Тезисы докладов междунар. наук.-техн. конф. молодых специалистов «Азовсталь-2006». – С. 67 – 69.

Рецензент: В.О. Маслов
д-р техн. наук, проф., ПДТУ

Стаття надійшла 02.03.2009