

В нижній частині печі витрата тепла дорівнює 64,039 кДж/кг чавуну, а у верхній частині — 38,83 кДж/кг чавуну. Допустима похибка визначення показника теплового стану печі T_n , є такий його приріст, при якому рекомендації на зміну регулюючих дій не перевищують зону нечутливості. По температурі дуття (Δt_0) її можна допустити ± 20 °С, а по масі коксу в подачі ± 25 кг. Виходячи з цього отримали допустиму похибку показника T_n : $\Delta T_n = 37$ кДж/кг чавуну (3). Це значить, що зміна приходу тепла на 37 кДж/кг чавуну і більше, як верхній так і в нижній зоні печі буде спричиняти коливання теплового стану плавки і якості чавуну.

Висновки

З таблиці 2 слідує, що навіть зміна температури охолоджуючої води на 1 °С значно перевищує 37 кДж/кг чавуну. Якщо ж перепад температури води Δt в середньому прийняти 6—8 °С, а для фурм 12—14 °С (5), то вплив таких втрат тепла на тепловий стан плавки буде надто суттєвим і викличе значну зміну параметрів якості чавуну та продуктивності печі. Отже, автоматизований контроль втрат тепла з охолоджуючою водою необхідний, особливо підчас використання ПВП.

ЛІТЕРАТУРА

1. Технология и эффективность замены природного газа и части кокса пылеугольным топливом на ПАО «ММК им. Ильича» / В.В. Климчук, Н.В. Косолап, И.А. Лукьяненко и др. // *Металл и литье Украины* – 2013. – № 10. – С. 28–35.
2. Товаровский И.Г., Лялюк В.П. Эволюция доменной плавки. Днепропетровськ, Пороги. 2001. – 425 с.
3. Довгалюк Б.П. Автоматизована система керування технологічними процесами доменної плавки. Дніпродзержинськ: – ДДТУ, 2009. – 245 с.
4. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий. // *Металл и литье Украины*. – 2013. – № 10. – С. 5–10.
5. Довгалюк Б.П. Вплив втрат тепла з охолоджувальною водою і колошниковим газом на тепловий режим плавки. / Б.П. Довгалюк, Р.В. Волошин // *Математичне моделювання*. – 2013. – № 1 (28). – С. 6–67.

пост. 30.03.2016

А.М. СОКОЛ, к.т.н., доцент

Дніпродзержинський державний технічний університет, м. Кам'янське

Двовимірна математична модель теплофізичних процесів, які протікають при отриманні листової заготовки за допомогою валків-кристалізаторів

Метою роботи є дослідження процесів, що протікають під час обертання валків-кристалізаторів на установці неперервного лиття. Запропоновано відповідну двовимірну математичну модель теплофізичних процесів без врахування процесів деформації. Створено програмне забезпечення, яке дозволяє проводити обчислювальні експерименти з різними значеннями визначальних параметрів процесу, що моделюється (температура розливу, інтенсивність охолодження, швидкість витягування).

Постановка проблеми

В умовах зростання цін на енергоносії і поступового наближення їх до рівня середньоєвропейських, пріоритетним напрямом розвитку металургії України є впровадження сучасних енергозбережних технологій, які дозволяють понизити відповідну долю витрат в собівартості прокату і підвищать конкурентоспроможність вітчизняної металопродукції на зовнішніх ринках. Однією з найбільш перспективних технологій виробництва металевих листів з точки зору економії енергії і екологічності є процес валкового розливання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

З публікацій [1-3] витікає, що детальне вивчення потребують, зокрема, такі питання:

- шляхи забезпечення рівномірного теплового розподілу в потоці розплаву вздовж валків-кристалізаторів;
- забезпечення необхідної якості металевих листів (вигоди до структури металу та його температури на виході з установок);
- підвищення бездефектної продуктивності литійно-прокатних агрегатів з двошвалковими кристалізаторами;
- пошук раціональних та оптимальних режимів роботи обладнання, створення на їх основі допоміжних ме-

тодичних матеріалів для операторів та автоматизація процесу виробництва.

Розв'язання цих питань залежить від ступеня вивченості гідродинамічних особливостей руху металу в загальному потоці та в міжвалковому зазорі та пов'язаних процесів тепломасообміну. Результатів експериментальних досліджень процесу валкового отримання листового прокату відомо небагато, тому дослідники широко використовують методи комп'ютерного моделювання [4-9]. З робіт, присвячених теоретичному опису процесів, що протікають між валками-кристалізаторами, що обертаються, можна виділити праці В. Клосса [10], К. А. Сантоса [11], Д. М. Жанга [12], а також колективу російських учених [13] та їхніх українських колег [14]. Однією з основних робіт присвячених моделюванню процесу перебігу металу у валковому кристалізаторі є робота Р. Гутрі і Р. Тавареса [15]. Також відомі роботи бразильських учених із створення моделі течії металу [11], в якій методом кінцевих різниць вирішується лише температурне завдання. Співробітниками Шанхайського університету і дослідницького інституту фірми "Baoshan Iron & Steel", Шанхай, Китай [4] було розроблено модель температурно-гідродинамічного режиму, яка дозволила проаналізува-

ти течію і теплопередачу в двофазній зоні; реалізацію створено з використанням методу кінцевих різниць. Було також проаналізовано вплив коефіцієнта теплопередачі в контакті метал/валок на течію і кристалізацію розплаву. Робота [14] включає опис і верифікацію математичної моделі в частині опису теплового стану розплаву, а також результати моделювання еволюції температурних полів валків, що обертаються, в часі. В якості математичного інструменту для чисельного вирішення завдань теплопереносу і руху металу вибрано метод кінцевих елементів.

Формулювання мети дослідження

Нас безпосередньо в даній роботі цікавлять лише процеси, що протікають під час обертання валків. Процес кристалізації починається під час взаємодії з валками, де має місце інтенсивний тепловідвід. Тривалість перебування металу в рідкому стані грає важну роль. Отже, за рахунок зміни температурних режимів розливки, режиму охолодження (кількість води, що підводиться до водоохолоджуваних валків) та швидкості витягування заготовки надається змога керувати процесом утворення кірки та температурою на виході з установки, яка може досить істотно впливати на якість продукції.

З метою оптимізації параметрів технологічного процесу отримання листової заготовки пропонується створити відповідну математична модель. Вона має описувати теплофізичні процеси, які протікають при отриманні листової заготовки за допомогою валків-кристалізаторів, та враховувати процеси твердіння та плавлення металу заготовки. Завдяки зміні теплофізичних параметрів відповідних частин установки для лиття та параметрів самого металу або сплаву, які фігурують у математичній моделі, її можна буде налаштувати на різні модифікації процесу лиття листової заготовки.

Виклад основного матеріалу

При побудові математичної моделі прийняті наступні спрощуючі припущення:

- тепловий потік в напрямку вздовж валків дуже малий, отже ним можна знехтувати. Так роблять у випадках, коли в злитках прямокутного перерізу широка грань хоча б удвічі більше вузької;
- перемішування в рідкій фазі не враховується;
- ширина злитку на будь-якій висоті установки — постійна величина;
- валки — недеформуєме тіло;
- не враховуються можлива наявність повітряного зазору та тертя між поверхнями злитку і валків-кристалізаторів.

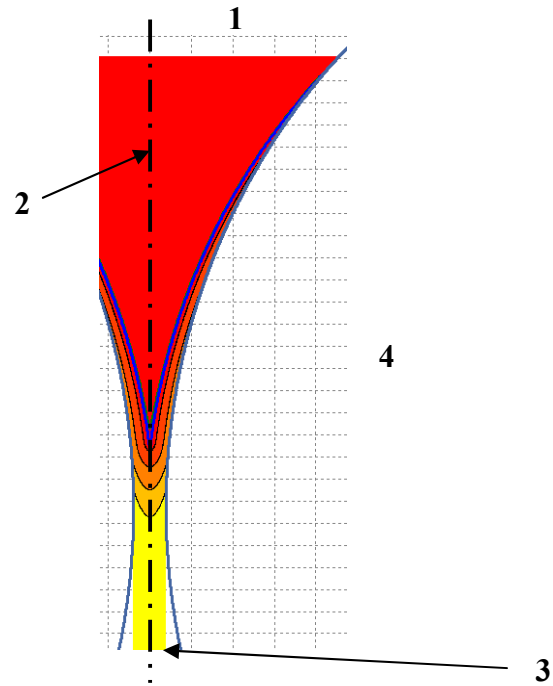
Для опису зазначених вище процесів можна використовувати стандартне рівняння теплопровідності, де враховується дифузійний та конвективний механізми передачі тепла:

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{\nabla}(T\vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T),$$

де C — теплоємність; ρ — щільність; T — температура; t — час; λ — коефіцієнт теплопровідності.

В силу наявності площини симетрії обмежимося двома вимірами декартових координат. У якості розрахункової області вибираємо половину перерізу вздовж площини симетрії, та ділимо її на 3 окремі зони:

- зона розплаву;
- зона валків;
- зона навколишнього середовища.



1 — поверхня розплаву; 2 — вісь симетрії; 3 — нижня поверхня заготовки; 4 — зона контакту з валками та повітрям

Рис. 1. Нумерація границь розрахункової області

Теплофізика описується рівнянням теплопровідності з урахуванням процесів кристалізації та плавлення металу:

$$C_e(T)\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla}(T\vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T),$$

$$\text{де } C_e(T) = \begin{cases} C & T < T_S, \\ C + \frac{Q}{T_L - T_S} & T_S \leq T \leq T_L, \\ C & T_L < T, \end{cases}$$

причому теплоємність C також залежить від температури наступним чином: при $T < T_S$ $C = C_S$, при $T > T_L$ $C = C_L$, а у двофазній зоні $C = C_L(1 - \psi) + C_S\psi$, де C_L і C_S — теплоємність рідкого та твердого металу відповідно; T_L і T_S — температура ліквідусу та температура солідусу металу відповідно.

Апроксимуємо доданки, які входять в диференціальне рівняння теплопередачі, за допомогою центральних кінцевих різниць в декартових координатах на рівномірній сітці для двовимірного випадку (xOz). Матимемо наступний різницевий аналог:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\tau}{C_{i,j}\rho_{i,j}} \left[\frac{\lambda_{i,j}(T_{i+1,j} - T_{i,j}) - \lambda_{i-1,j}(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\Delta z^2} + \frac{\lambda_{i,j}(T_{i,j+1} - T_{i,j}) - \lambda_{i,j-1}(T_{i,j} - T_{i,j-1})}{\Delta z^2} \right].$$

$$i = \overline{2, M-1}, \quad j = \overline{2, N-1},$$

де n — номер часового шару; i, j — індекси за простором (в напрямку x та z відповідно); $\Delta x, \Delta z$ — кроки за простором (в напрямку x та z відповідно); M, N — кількість комірок в розбитті розрахункової області (з врахуванням граничних).

Цей запис не містить явно конвективного доданку. Конвекція враховується специфічно — за допомогою макропереносу з періодом, який необхідний заготівці на подолання одного шару по висоті (Δz). При цьому весь метал, який встигнув затверднути, разом з полем температур переноситься в напрямку руху валків-кристалізаторів та заготовки.

Записане рівняння теплопровідності слід доповнити граничними умовами.

Границя 1. Задана температура розплаву: $T = T_0$.

Границя 2. Умова симетрії: $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$.

Границя 3. Умова вільного потоку: $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$.

Границя 4. Умова теплообміну з валками та середовищем: $-\lambda^c \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(h)(T^c - T^{cp})$.

На рівномірній шаховій сітці запропоновані граничні умови набудуть наступного вигляду.

Границя 1. $T_{i, N+1} = T_0, \quad i = \overline{2, M-1}$.

Границя 2. $T_{1, j} = T_{2, j}, \quad j = \overline{2, N}$.

Границя 3. $T_{i, 1} = T_{i, 2}, \quad i = \overline{2, M-1}$.

Границя 4. $T_{M, j} = T_{M-1, j} - \frac{\alpha_j \Delta x}{\lambda_{i, j}^c} (T_{M-1, j} - T^{cp}),$

$j = \overline{2, N}$.

Математичну модель реалізовано у прикладному програмному забезпеченні, яке надає змогу виконувати обчислювальні експерименти з різними значеннями визначальних для досліджуваного процесу технологічних параметрів. Мовою програмування для створеного проекту обрано Object Pascal. Значення основних теплофізичних та геометричних характеристик установки, прийнятих для проведення обчислювальних експериментів, наведено в таблиці 1 та 2 відповідно.

Таблиця 1. Теплофізичні характеристики

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Температура міді, що розливається	$^{\circ}\text{C}$	1100
Початкова температура міді в кристалізаторі	$^{\circ}\text{C}$	1100
Температура плавлення міді	$^{\circ}\text{C}$	1083
Температура солідусу міді	$^{\circ}\text{C}$	1082,5
Температура ліквідусу міді	$^{\circ}\text{C}$	1083,5
Щільність рідкої міді	$\text{кг}/\text{м}^3$	8200

Щільність твердої міді	$\text{кг}/\text{м}^3$	8900
Теплопровідність рідкої міді	$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$	245
Теплоємність рідкої міді	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	450
Теплопровідність твердої міді	$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$	295
Теплоємність твердої міді	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	380
Теплота фазового переходу	$\text{КДж}/\text{кг}$	214

Таблиця 2. Геометричні характеристики

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Радіус валків-кристалізаторів	мм	185
Відстань між валками-кристалізаторами	мм	380
Товщина заготовки на виході	мм	10
Швидкість витягування	об/хв	5
Комірок в розбитті розрахункової області	од.	100x200 200x400 500x1000 1000x3000

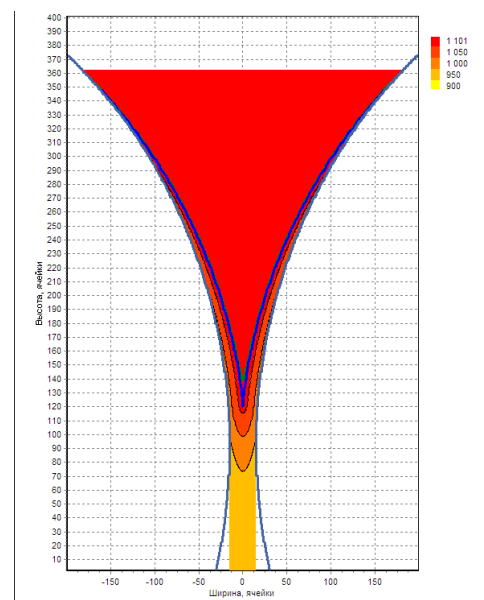


Рис. 2. Поле температур у розрахунковій області для розбиття 200x400

На рис. 2 подано поле температур у розрахунковій області (для розбиття 200x400). Результати обчислювального експерименту на якісному рівні добре узгоджуються з результатами, отриманими іншими авторами [7, 15].

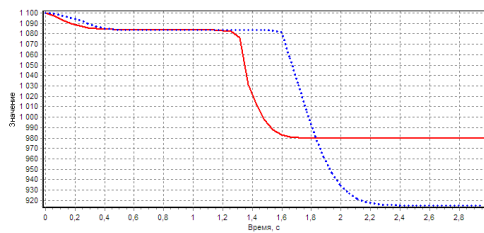


Рис. 3. Залежність температури від часу для розбиття 200×400

На рис. 3 подано графіки залежності температури у двох вибраних точках від часу (для розбиття 200×400).

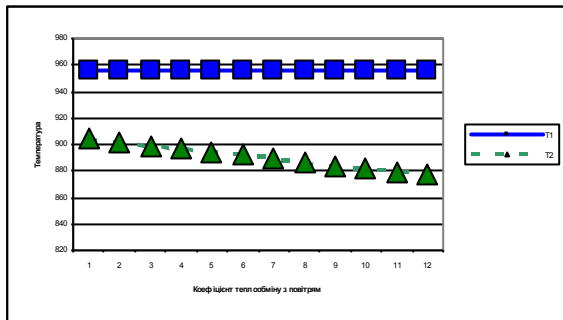


Рис. 4. Залежність температури у вибраних точках від коефіцієнту теплообміну з повітрям

На рис. 4 подано графіки залежності температури у двох вибраних точках від коефіцієнту теплообміну з повітрям. Як бачимо, зміна інтенсивності теплообміну з повітрям суттєво впливає на температуру заготовки на поверхні (пунктирна лінія) та несуттєво впливає на температуру всередині (суцільна лінія).

Висновки та перспективи подальших досліджень

Метою роботи було дослідження процесів, що протікають під час обертання валків-кристалізаторів на установці неперервного лиття. Запропоновано відповідну двовимірну математичну модель теплофізичних процесів без врахування процесів деформації. Створено програмне забезпечення, яке дозволяє проводити обчислювальні експерименти з різними значеннями визначальних параметрів процесу, що моделюється (температура розливи, інтенсивність охолодження, швидкість витягування).

Використання розробленого програмного забезпечення шляхом вибору температурних режимів розливи, режиму охолодження (кількість води, що підводиться до водоохолоджуваних валків) та швидкості витягування заготовки надає змогу раціонально керувати процесом утворення кірки та температурою в зоні обжимання та на виході з установки, яка може досить істотно впливати на якість продукції.

В подальшому можливий розвиток запропонованої математичної моделі. Розв'язування теплової задачі в тривимірній постановці дозволить враховувати скінченну ширину заготовки та відповідну відмінність теплового стану в центрі полоси та в приграничній зоні. Побудова спряженої теплової та гідродинамічної математичної моделі також вбачається складним та суттєвим кроком на шляху врахування важливих для процесу валкової розливи-прокатки факторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Matsushita T. Development and commercialization of twin roll strip caster / T. Matsushita, K. Nakayama, H. Fukase, S. Osada // IHI Engineering Review. – 2009. – Vol. 42. – № 1. – P. 1–9.
2. Barekar N. S. Twin Roll Casting of Aluminum Alloys – An Overview / N. S. Barekar, B. K. Dhindaw // Materials and Manufacturing Processes. – Published online: 28 Apr 2014. – <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426914.2014.912307#.U3IBU6K4rmU>.
3. Cook R. Development of the twin-roll casting process / R. Cook, P. G. Grocock, P. M. Thomas, D. V. Edmonds, J. D. Hunt // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 55, Is. 2 – P. 76–84.
4. Haga T. Development of a twin roll caster for light metals / T. Haga // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2010. – Vol. 43, Is. 1. – P. 393–402.
5. Wang B. Modelling of melt flow and solidification in the twin-roll strip casting process / B. Wang, J. Y. Zhang, J. F. Fan, S. L. Zhao, S. B. Ren, K. C. Chou // Steel Research International. – 2009. – Vol. 80, Is. 3. – P. 218–222.
6. Santos C. A. Modeling of solidification on twin-roll strip casting / C. A. Santos, J. A. Spim, A. Garcia // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – Vol 102. – P. 33–39.
7. Гридин А. Ю. Математическое моделирование температурного поля металла и валков в процессе валковой разливки-прокатки / А. Ю. Гридин // Обработка материалов давлением. – 2009. – №1 (20). – С. 75–83.
8. Zeng J. Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip / J. Zeng, R. Koitzsch, H. Preifer, B. Friedrich // Journal of Materials processing Technology. – 2009. – Vol. 209. – P. 2321–2328.
9. Saxena A. Modeling of fluid flow and heat transfer in twin-roll casting of aluminum alloys / A. Saxena, Y. Sahai // Material Transactions. – The Japan Institute of Metals. – 2002. – Vol. 43, № 2. – P. 206–213.
10. Miede A. Modelling of heat transfer and solidification processes in horizontal twin-roll casting of magnesium AZ31 / A. Miede, U. Gross // OP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2012. – Vol. 33, Is. 1. – P. 12–17.
11. Kloss W. Duenbandgiessen mit variable Giasspalt. Umformtechnische Schriften / W. Kloss. – Aachern: Shaker Verlag, 2005. Band 144. – 180p.
12. Santos C. A. Modelling of solidification in twin-roll strip casting / C. A. Santos, J. A. Spim, A. Garcia // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – №102(1–3). – P. 33–39.
13. Zgang X. M. Modelling of the micro-segregation of twin-roll thin strip casting / X. M. Zgang, Z. Y. Jiang, X. H. Liu, G. D. Wang // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. №162–163. – P. 591–595.
14. Зиновьев А. В. Моделирование процесса непрерывного литья тонких полос в валковом кристаллизаторе / А. В. Зиновьев, В. С. Савченко, А. А. Бондаренко. – Дніпропетровськ: «Системні технології», 2005. – Т.8: Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Пластична деформація металів. – С. 32–36.

15. Ноговицын А. В. Численное моделирование гидродинамических и тепловых процессов при непрерывной двухвалковой разливке стали / А. В. Ноговицын, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая // *Металл и литьё Украины* – 2015. – № 3 (262) – Киев : Издательство ФТИМС НАН Украины. – С. 15–20.
16. Guthrie R.I.L. Mathematical and physical modeling of steel flow and solidification in twin roll (horizontal belt thin strip casting machines) / R.I.L. Guthrie, R.P. Tavares // *Inter Conf on CFD in Mineral & Metal Processing and Power Generation*. CSIRO. – 1997. – P. 41–54.

пост. 28.04.2016