

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ



Комп'ютерне моделювання тепло- і масообмінних процесів у кристалізаторі блюмової МБЛЗ

ГРЕСС О.В., ОГУРЦОВ А.П.

Дніпродзержинський державний технічний університет

Методами математического моделирования установлена количественная связь между скоростью роста твердой корки и расходом нейтрального газа, подаваемого в жидкий металл через прямоточный погружной стакан. Определено, что перенаправление потоков металла позволяет уменьшить температуру стали, повысить равномерность толщины корки твердого металла при одновременном увеличении скорости его разливки

Методами математичного моделювання встановлено кількісний зв'язок між швидкістю росту твердої кірки й витратами нейтрального газу, що подається в рідкий метал крізь прямоточний заглибний стакан. Визначено, перенаправлення потоків металу дозволяє зменшити температуру сталі, підвищити рівномірність товщини кірки твердого металу при одночасному збільшенні швидкості його розливання.

Вступ. Більшість дефектів безперервнолітої заготовки зароджуються в кристалізаторі і визначаються, головним чином, характером й інтенсивністю тепломасообмінних процесів. Тому, з погляду одержання якісної заготовки при високій продуктивності МБЛЗ, задача вивчення процесів, що відбуваються у кристалізаторах при безперервному розливанні сталі, є актуальною.

Постановка задачі. Вирішувати задачу вивчення процесів, що відбуваються у кристалізаторах при безперервному розливанні сталі, потрібно із застосуванням комплексу методів фізичного й математичного моделювання з наступною перевіркою їхніх висновків на практиці [1]. У всіх випадках отримані рішення найчастіше мають ексклюзивний характер і можуть застосовуватися лише для досліджених типів МБЛЗ і режимів розливання. Повна реалізація комплексу фізичного, математичного моделювання і практичного експерименту для кожного типу МБЛЗ є досить складним і витратним процесом. Тому останнім часом перевагу надають більш гнучкому і дешевому математичному моделюванню.

До одних з найбільш «свіжих» досліджень в цьому напрямку варто віднести роботу [2], в якій задача вирішувалася стосовно одержання тонких слябів на радіальній МБЛЗ у тривимірній постановці. Були використані професійні пакети програм розрахунку гідродинаміки й теплопереносу Fluent 5.5/Gambit 1.3, основані на RNG-k-ε моделі турбулентності з урахуванням зміни ентальпії рідкого металу. Перевірка адекватності здійснювалася на фізичній моделі.

На цей час на багатьох МБЛЗ застосовують технологію розливання сталі, яка передбачає увід в кристалізатор нейтрального газу. На жаль, всі відомі нам комп'ютерні дослідження поведінки металу в кристалізаторі проводилися стосовно до гомогенного рідкого середовища, тоді як подача газу в кристалізатор приводить до появи гетерофазного середовища, що істотно впливає на гідродинаміку рідини. Спроба урахування

цього факту була зроблена у роботі [3], в якій вирішувалася спряжена двовимірна модель тепломасообмінних процесів у блюмовому кристалізаторі МБЛЗ, у тому числі, з подачею газу в струмінь металу. Перевірка результатів розрахунків здійснювалася на фізичній моделі [4] й у практичних умовах [5]. Розбіжність даних фізичного й математичного експерименту не перевищувала 10% і пов'язана, головним чином, з представленням модельованої області в циліндричній системі координат.

Метою даної роботи є розробка сполученої тривимірної математичної моделі розрахунку полів швидкостей, концентрацій газу й росту твердої фази в об'ємі рідкої лунки безперервнолітої заготовки, що кристалізується, для дослідження тепломасообмінних і гідродинамічних процесів, що протікають в кристалізаторах МБЛЗ.

Результати роботи. Завдання вирішувалося стосовно умов МБЛЗ Дніпровського металургійного комбінату (ДМК). Досліджували тепломасообмінні процеси в кристалізаторі перерізом 335x400 мм довжиною 1 м при загальній висоті розрахункової області 0,6 м. Вибір довжини розрахункової області обумовлений тим, що, відповідно до наших досліджень [3–5], за її межами швидкості потоків металу в горизонтальному перерізі кристалізатора не є значними і не мають істотного впливу на загальну картину тепломасообміну. Крім того, оскільки довжина розрахункової області невелика, базовий радіус МБЛЗ ДМК дорівнює 14 м, а висота досліджуваної області 600 мм, що означає зміщення осі кристалізатора щодо вертикалі до 3,2 мм (0,96%), то кривизною кристалізатора можна знехтувати й використовувати декартову систему координат.

Модель побудована на основі загального підходу до опису багатофазних систем, викладеного в роботі [6]. При розробці моделі припустили:

1. Метал розливають у блюмові або квадратні заготовки крізь прямоточний заглибний стакан, що має один наскрізний вертикальний отвір. Тому в якості

розрахункової області обрана чверть перерізу кристалізатора.

2. Дзеркало металу є рівним, без хвиль, вкрито шлаком. Отже, немає необхідності урахування динаміки вільної поверхні.
3. Газорідинна суміш нестислива, а газові пухирі рухаються практично з тими ж швидкостями, що й шари навколишньої рідини. Таке припущення справедливе при неглибокому проникненні газу в рідину, забезпечує соленоїдальність руху суміші і значно полегшує чисельне рішення рівнянь руху.
4. Газ не поглинається й не виділяється в процесі лиття, повністю видаляється з металу крізь дзеркало металу й шлаку.
5. З боку кристалізатора межа твердого металу й двофазної зони (ДФЗ) визначається умовами тепловідводу до кристалізатору й залежить від швидкостей потоків металу, що омивають тверду кірку.

У нашому випадку динаміка газорідинної системи описується системою рівнянь:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla}p' + \nu\Delta\vec{v} + (1-a)\vec{g}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha \cdot (\vec{v} + \vec{v}_e)) - \vec{\nabla} \cdot (D\vec{\nabla}\alpha), \quad (3)$$

де \vec{v} – барицентрична швидкість середовища газ-розплав; \vec{v}_e – швидкість спливання пухирців газу [7]; t – час процесу; α – коефіцієнт об'ємного газовмісту; $p' = p/\rho_0$, тут p – тиск; ρ_0 – густина рідкої фази; D – ефективний коефіцієнт турбулентної дифузії газової фази; ν – кінематична в'язкість; \vec{g} – прискорення вільного падіння.

Рівняння (1) представлено в наближенні Буссинеска відповідно до припущення, що основним фактором, який викликає рух середовища, є піднімальна сила, що виникає через неоднорідність середовища й обумовлена присутністю заданої кількості газових включень. Рівняння (1)–(3) являють собою повну систему рівнянь для знаходження всіх необхідних параметрів руху газорідинного середовища – \vec{v} , p' і α . Граничними умовами для швидкості на осі симетрії й у твердій поверхні вибрали умови непротікання і вільного ковзання, відповідно:

$$v_{\perp}|_S = 0, \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} v_{\parallel}|_S = 0, \quad (4)$$

а на вільній поверхні й у нижній частині розрахункової області – умови потоку, що рухається вільно:

$$v_{\perp}|_S = v_S, \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} v_{\parallel}|_S = 0, \quad (5)$$

де \vec{n} – вектор нормалі до поверхні.

v_S приймає кінцеве значення швидкості потоку в місці його виходу зі стакана, а на іншій поверхні металу дорівнює 0. Турбулентний характер руху враховується введенням ефективних коефіцієнтів в'язкості й дифузії пухирів газової фази, які включають апроксимаційну і турбулентну складові [8].

Намерзання кірки металу розраховується на основі рішення відомого рівняння теплопровідності Фур'є в наближенні квазірівноважної ДФЗ [9]:

$$c_{эф}(T) \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} - c_{ж} \cdot \rho \vec{\nabla}(T\vec{v}) + \vec{\nabla}(\lambda \vec{\nabla}T), \quad (6)$$

$$\text{де } c_{эф}(T) = \begin{cases} c_m, & T < T_S; \\ c + \frac{L}{T_L - T_S}, & T_S \leq T \leq T_L; \\ c_{ж}, & T > T_L. \end{cases} \quad (7)$$

У рівняннях (6)–(7) T , T_L , T_S – відповідно, температура розрахункової області, температура ліквідус і солідус; $C_{эф}$ – ефективна теплоємність, що залежить від теплоємності металу у твердому (C_m), рідкому ($C_{ж}$) і двофазному стані (C). В останньому випадку ефективна теплоємність дорівнює

$$c = (c_{ж} - c_m) \frac{T}{T_L - T_S} + \frac{c_m T_L - c_{ж} T_S}{T_L - T_S}. \quad (8)$$

Поставлена задача чисельно вирішується в природних змінних методом розщеплення по фізичних факторах, який реалізований у вигляді трьохетапної схеми розщеплення, що є комбінацією методу розщеплення по фізичних факторах для рівняння гідродинаміки [8] і перерахункової різничевої схеми [10]:

$$1. \quad \vec{v}^n = \vec{v} + \tau \left[-(\vec{v}^n \cdot \vec{\nabla})\vec{v}^n + \nu\Delta\vec{v}^n + (1-\alpha^n)\vec{g} \right], \quad (9)$$

$$\alpha^n = \alpha^n - \tau \left[(\vec{v}^n + \vec{v}_e) \cdot \vec{\nabla} \right] \alpha^n, \quad (10)$$

$$T_1^n = T^n - \tau C \rho \vec{\nabla}(T^n \vec{v}^n). \quad (11)$$

$$2. \quad \Delta p^{n+1} = \vec{\nabla} \cdot \vec{v}^n / \tau. \quad (12)$$

$$3. \quad \vec{v}^{n+1} = \vec{v}^n - \tau \vec{\nabla} p^{n+1}, \quad (13)$$

$$\alpha^{n+1} = \alpha^n - \tau \left[(\vec{v}^n \cdot \vec{\nabla})\alpha^n - \vec{\nabla} \cdot (D\vec{\nabla}\alpha^n) \right], \quad (14)$$

$$T^{n+1} = T^n + \tau \vec{\nabla}(\lambda \vec{\nabla}T^n), \quad (15)$$

де n – номер часового шару, τ – крок за часом.

Етап 2 виконується тільки в рідкій фазі.

Крайові умови для тиску в межах розрахункової області одержали за допомогою проектування рівняння (13) на нормаль до поверхні. На коефіцієнт газовмісту (об'ємну частку газової фази) α накладається умова

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \alpha|_S = 0 \quad (16)$$

скрізь, за винятком зони входу газометалевого струменя, де

$$\alpha|_S = \alpha_0. \quad (17)$$

У тепловій частині розрахунку на осі симетрії моделі прийнята умова відсутності теплообміну. Теплообмін на поверхні шлаку заданий умовами променево-конвективного теплообміну. У місці входу струменя металу в кристалізатор прийнята температура, що на 10°C перевищує відповідну температуру ліквідусу заданої марки сталі.

На основі статистичної обробки літературних даних нами була отримана залежність щільності теплового потоку (кВт/м^2), що відбирається від заготовки в межах блюмового кристалізатора при його довжині 0,8–1,0 м, швидкості розливання 0,5–1,5 м/хв, температурі перегріву металу 10–20°C, вмісті в сталі вуглецю $[C]=0,1-0,7\%$:

$$q = 2441,92\sqrt{X} - 1722,04X - 197,69\sqrt{[C]} - 90,27 - 166,11[C], \quad R=0,89, \quad (18)$$

де X – відстань до розрахункової точки від меніска металу по технологічній осі МБЛЗ, м; R – коефіцієнт кореляції.

Деяке охолодження металу внаслідок подачі в нього холодного газу враховувалося шляхом розрахунку ентальпії газорідної суміші, подаваної зі стакана, з урахуванням в ній частки аргону.

Моделювали розливання сталі марки 20 через заглибний (глибина занурення 150 мм) прямокутний стакан із внутрішнім діаметром 60 мм і швидкістю лиття 0,6 м/хв. Аргон у кристалізатор подавали за допомогою порожнього стопора-моноблока й заглибного стакана з витратою 0–0,017 м³/т рідкої сталі.

Адекватність моделі по гідродинамічній картині перевіряли порівнянням результатів розрахунків з даними холодного моделювання [4], по тепловій – з даними промислового експерименту [5, 11]. Визначено, що розбіжність не перевищує 6 %.

Без подачі газу в кристалізатор у верхній частині його порожнини розташований тороподібний вихор, рух металу в якому спрямовано по меніску від стінок кристалізатора до заглибного стакана. Нижня межа вихору знаходиться на глибині 450–600 мм від меніска металу й залежить від витрати рідини. Швидкість потоків металу тут становить 0,11–0,39 м/с. Нижче цієї зони потоки металу по осі струмка спрямовані по ходу руху заготовки (швидкість 0,3–0,4 м/с). Уздовж кірки заготовки потоки металу спрямовані вгору (швидкість 0,1–0,2 м/с).

Інша картина спостерігається при подачі газу з витратою 0,002 м³/т рідкої сталі. Тут незначне уповільнення швидкості росту товщини кірки на широкій грані (≈ 7 %) починається на глибині 350 мм. Надалі товщина кірки по периметрі заготовки нівелюється.

Різновшчинність кірки заготовки є першопричиною виникнення гарячих тріщин, які викликані термічними напруженнями. Якщо у верхніх зонах кристалізатора кірка металу досить пластична і їй можливі тріщини ще можуть заліковуватися розплавом, то на нижніх горизонтах кристалізатора кірка малопластична й виникаючі тут тріщини можуть приводити до браку.

При витраті газу 0,009 м³/т рідкої сталі різновшчинність кірки спостерігається на глибині 70 мм і простягається до рівня 300 мм. Надалі різновшчинність поступово зменшується й практично зникає на глибині 600 мм.

Швидкість наростання товщини кірки при витраті аргону 0,017 м³/т рідкої сталі зменшується (≈ 5 %) вже на 50 мм від меніска металу й різновшчинність на більшій грані заготовки зберігається до рівня 100 мм. Збільшення конвекції біля вузької грані заготовки на глибині 200–300 мм приводить до локального уповільнення росту кірки (≈ 6 %). На широкій грані аналогічні процеси мають місце на глибині 250–300 мм. Після 400 мм швидкості росту оболонки вирівнюються, стабілізуються й різновшчинність практично не спостерігається.

На рис. 1–4 представлені графіки зміни швидкостей потоків металу по осі струменя й поперечному перерізу кристалізатора на різній відстані від меніска металу. На рис. 5 (цифри біля ізоліній на рисунках показують частку газу в розплаві, м³/м³) представлені результати розрахунків гідродинаміки металу в кристалізаторі при подачі в нього аргону з витратою 0,002, 0,009 й 0,017 м³/т рідкої сталі. З цих рисунків видно, що при збільшенні витрати газу глибина проникнення газорідних потоків зменшується при одночасному згасанні осьових швидкостей потоків металу.

При подачі газу з витратою 0,017 м³/т рідкої сталі нижня межа верхньої зони простягається на глибину до 0,3

м, а при витратах газу 0,009 й 0,002 м³/т рідкої сталі, відповідно, на глибину 0,25 й 0,22 м. Середня зона при витраті газу 0,017 м³/т досягає глибини 0,5 м, а при 0,009 м³/т – 0,4 м від меніска металу. Її геометричні розміри залежать від витрати газу: чим більше витрата, тим нижче її верхня й нижня межі. При витраті аргону 0,002 м³/т межі зони практично неможливо визначити й вона зливається з 3-ю зоною.

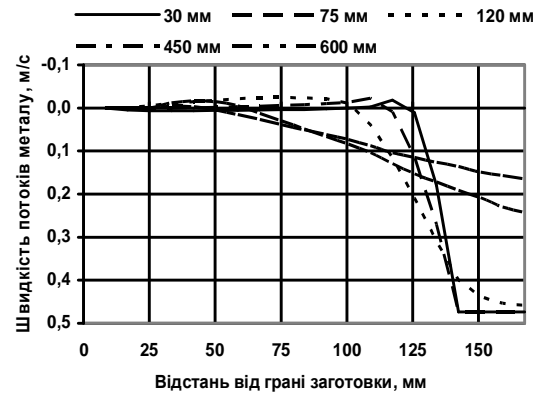


Рис. 1. Зміна швидкості потоків металу по поперечному перерізу заготовки на різній відстані від меніска металу в кристалізаторі без подачі газу

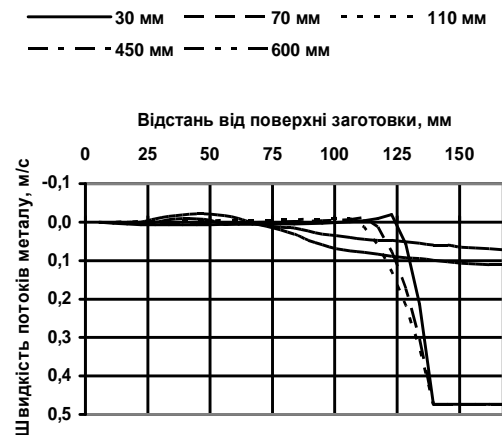


Рис. 2. Зміна швидкості потоків металу по поперечному перерізу заготовки на різній відстані від меніска металу в кристалізаторі з подачею газу з витратою 0,002 м³/т

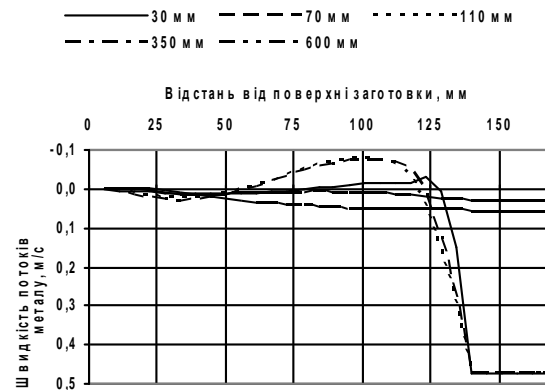


Рис. 3. Зміна швидкості потоків металу по поперечному перерізу заготовки на різній відстані від меніска металу в кристалізаторі з подачею газу з витратою 0,009 м³/т

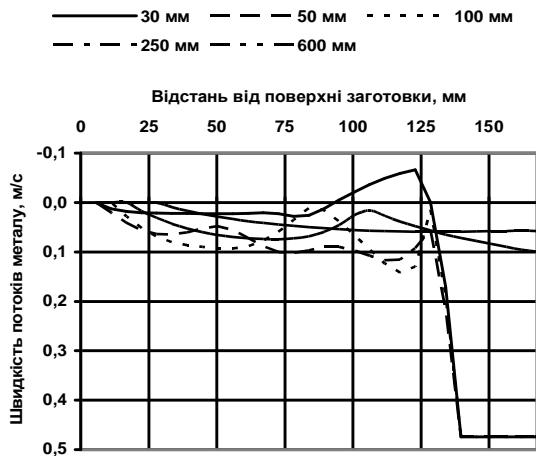


Рис. 4. Зміна швидкості потоків металу по поперечному перерізі заготовки на різній відстані від меніска металу в кристалізаторі з подачею газу з витратою $0,017 \text{ м}^3/\text{т}$

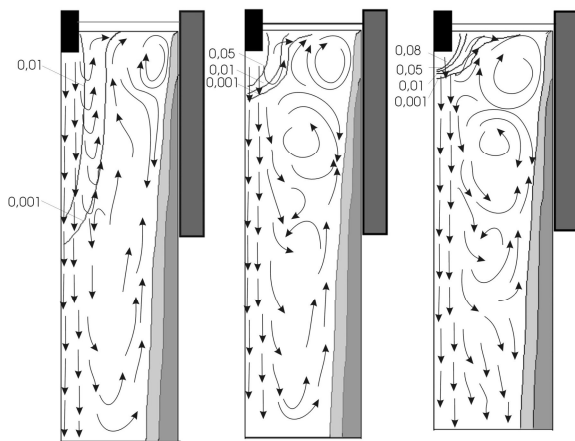


Рис. 5. Гідродинаміка металу в кристалізаторі з подачею газу з витратою $0,002$ (а), $0,009$ (б) і $0,017$ (в) $\text{м}^3/\text{т}$

Третя зона циркуляції є найбільш протяжною. Положення її нижньої границі залежить від інтенсивності подачі газу й може простиратися за межі кристалізатора.

За допомогою створеної тривимірної сполученої математичної моделі гідродинаміки і тепломасопереносу металу у кристалізаторі, встановлено кількісний взаємозв'язок між зростанням швидкості кристалізації кірки заготовки ($\Delta V_{кр}$, м/хв) та інтенсивністю подачі газу (Q_g , $\text{м}^3/\text{т}$):

$$\Delta V_{кр} = 0,162 Q_g, R = 0,96. \quad (19)$$

Розрахунки по рівнянню (19) показують, що при піднятті витрати аргону до його раціонального значення $0,012 \text{ м}^3/\text{т}$ [4], яке не призводить до оголення дзеркала металу, за рахунок збільшення швидкості кристалізації кірки заготовки перетином, наприклад $335 \times 400 \text{ мм}$, та її рівнотовщинності, можливе підняття швидкості розливання на $\approx 8 \%$.

Висновки

Отримано, на основі створеної тривимірної сполученої математичної моделі гідродинаміки і тепломасопереносу металу в кристалізаторі, кількісний зв'язок між швидкістю росту твердої кірки й витратами нейтрального газу, що подається в рідкий метал крізь прямоточний заглибний стакан. Отримані відомості про раціональний фазовий, температурний і концентраційний стан металу в кристалізаторі дозволяють, за рахунок перенаправлення потоків металу, зменшення температури сталі внаслідок збільшення тепловіддачі кристалізатору й газу, підвищити рівномірність товщини кірки твердого металу при одночасному збільшенні швидкості його розливання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тепломассообменные процессы финишных операций обработки стали. В 2-х кн.. Кн. 2 – Тепломассообменные процессы при разливке стали на МНЛЗ. – Днепродзержинск: Издательство ДГТУ, 2007. – 301 с.
2. Цифровое моделирование процессов течения и затвердевания металла в МНЛЗ для литья тонких слябов / К.Олер, Х.-Ю.Оденталь, Г.Пфайфер, И.Леманович // Черные металлы. – 2002. – №3. – С.22–30.
3. Гресс А.В., Огурцов А.П. Математическое моделирование тепломассообменных процессов в кристаллизаторе блюмовой МНЛЗ // Системные технологии. – 2002. – № 6(23). – С.81–91.
4. Гресс А.В., Огурцов А.П., Титова Т.М. Особенности гидродинамики расплавов в радиальных кристаллизаторах блюмовой МНЛЗ при непрерывной разливке стали через прямоточные погружные стаканы // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр. – К.: Наукова думка. – 2002. – Вып. 5 – С.155–162.
5. Исследование особенностей затвердевания блюмовой заготовки сечением $335 \times 400 \text{ мм}$, обрабатываемой аргон в криволинейном кристаллизаторе МНЛЗ / А.В.Гресс, А.П.Огурцов, Л.С.Рудой и др. // Теория и практика металлургии. – 2002. – №3. – С.18–20.
6. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах. – К.: Наукова думка, 2001. – 409 с.
7. Теория непрерывной разливки / В.С.Рутес, В.И.Аскольдов, Д.П.Евтеев и др. – М.: Металлургия, 1971. – 296 с.
8. Самохвалов С.Е. Теплофізичні процеси в багатофазних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. – 172 с.
9. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. – М.: Металлургия, 1987. – 224 с.
10. Никитенко Н.И. Теория тепломасопереносу. – К.: Наукова думка, 1983. – 352 с.
11. Особенности формирования фронта затвердевания блюмов сечением $335 \times 400 \text{ мм}$ в криволинейном кристаллизаторе УНРС / С.С.Бродский, Л.М.Учитель, М.И.Пикус и др. // Тр. IV конгр. сталеплавильщиков. – М.: Черметинформация, 1997. – С. 355–366.