

Моделювання переносу домішок при кристалізації сталевго зливка

Т.Ж. НАДРИГАЙЛО, В.О. ПУГОВКІНА

Дніпродзержинський державний технічний університет

В даній роботі виконано чисельні дослідження двовимірної математичної моделі кристалізації, яка врахує перенос домішки у дендритному каркасі металевго зливка, що твердне. Для розв'язку системи рівнянь моделі використано метод розщеплення за фізичними факторами. Побудовано залежності концентрації домішки від значень теплофізичних параметрів в різних областях затверділого сталевго зливка.

В данной работе выполнены численные исследования двумерной математической модели, учитывающей перенос примеси в дендритном каркасе затвердевающего металлического слитка. Для решения системы уравнений использован метод расщепления по физическим факторам. Построены зависимости концентрации примеси от значений теплофизических параметров в разных областях затвердевшего стального слитка.

In this study were done numerical studies of two-dimensional mathematical model that takes into account the transfer of impurities in the dendrite skeleton solidifying a metal ingot. For solve a system of equations was used the method cleavage by physical factors. Have been built the dependencies the impurity concentration from the thermophysical parameters in different areas of the solidified steel ingot.

Вступ. Різноманітність фізичних, хімічних, технологічних та інших властивостей сталі обумовлює широку класифікацію сталей за сферами застосування, призначенням, способам виробництва, хімічним складом, фізичними та технологічними властивостями.

Якість сталі можна визначити як сукупність фізичних, хімічних, технологічних властивостей. Залежно від переважання одних властивостей над іншими, сталі отримують відповідну класифікацію. Сукупність властивостей сталі визначається хімічним складом сплаву і структурою металу.

В якості основоположної закономірності — якість сталі можна визначити залежністю вмісту шкідливих домішок і неметалевих включень в розплаві, чим менша кількість шкідливих домішок і неметалевих включень міститься в сталі, тим вища її якість.

Шкідливими для сталі в першу чергу є домішки сірки, фосфору та газів.

Фосфор проникає в розплав сталі разом з рудою. Присутність фосфору підвищує поріг холодноломкості сталі, тобто підвищує температуру переходу сталі в крихкий стан. Його видаляють в процесі виплавки сталі шляхом наведення шлаків і флюсів.

Сірка в розплаві сталі також з'являється разом з рудою. Взаємодіючи з залізом, утворює сульфід (FeS), що входить до складу евтектики та плавиться при $T = 988$. Ця евтектика утворюється навіть при дуже малому вмісті сірки. Кристалізуючись з рідини при закінченні затвердіння, евтектика переважно розташовується по границях зерна. При нагріванні сталі до температури прокатки або кування $800\text{—}1200\text{ }^\circ\text{C}$ (червоне каління) евтектика розплавляється, внаслідок чого при деформації сталі виникають надриви і тріщини. Це явище називають червоноломкістю. Усувається введенням в сталь марганцю.

Що стосується нешкідливих домішок, то до них відносяться марганець і кремній. Їх вводять в сталь в процесі виплавки для розкислення (видалення кисню з рідких металів для підвищення якості сталі). Марганець збільшує накаливаність сталі і зменшує шкідливий вплив сірки. Кремній ефективно розкислює сталь і сприяє її зміцненню.

Отже, варто відмітити, що зменшення концентрації шкідливих домішок — важливий процес для підвищення рівня якості сталі. Тому, пошук шляхів зменшення концентрації шкідливих домішок в сталі є дуже актуальним питанням в наш час, бо попит на якісний товар зростає з кожним днем і спеціалісти різних галузей постійно працюють над тим, щоб підвищити якість сталевих розплавів.

Основні задачі, які стоять перед чорною металургією в наш час: покращення якості продукції та усіх техніко-економічних показників роботи підприємств галузі. Сама постановка цих задач означає якісно нову ступінь у прогресі чорної металургії.

Науково-технічний прогрес в металургії включає в себе необхідний компонент — розвиток і поглиблення теорії і збільшення її ролі як керівництва до дії та вдосконалення процесів.

Слід відмітити, що особливі вимоги повинні бути пред'явлені до основи сучасної теорії — наукового експерименту. Повинні бути різко завищені вимоги до експериментальних результатів вимірювань: фізичних властивостей досліджуваних фаз, швидкостей процесу або окремих стадій процесу і т. д.

Дана робота досліджує проблеми неметалевих включень в сталі — формуванню їх на стадіях перебування металу в рідкому стані, в процесі кристалізації і при охолодженні вже твердого металу, але який все ще знаходиться в високотемпературних областях процесу охолодження, коли дифузійні процеси ще не повністю заморожені.

Під час кристалізації зливка утворюються кристали, частина з яких може бути рухомою. Крім того, внаслідок неоднорідного хімічного складу сплавів виділяються різноманітні рухомі домішкові фази, розподіл яких значною мірою впливає на якість зливка, що затвердів. Всі ці фактори вимагають подальшого вивчення протікання тепломасопереносних процесів у зливку при його кристалізації.

Актуальність дослідження та оптимізації перебігу тепломасопереносних процесів у багатофазних середовищах при розливці та кристалізації сталі у наш час обумовлена розробкою нових енерго- та ресурсозбері-

гаючих наукоємних технологій виробництва сталі, зростанням вимог до його ефективності.

Метою даної роботи є чисельні дослідження двовимірної математичної моделі розподілення домішок в сталевому зливку, що твердне, та знаходження теплофізичних характеристик, які суттєво впливають на кінцевий розподіл домішок у зливку.

Аналіз існуючих моделей фільтрації домішок.

В результаті вивчення кристалізації зливку доводиться стикатися з достатньо широким комплексом питань [1]. У більшості практичних випадків фронт кристалізації нестійкий, тобто можливий ріст дендритів або хаотичне зародження кристалів. В цьому випадку виникає двохфазна зона кристалізації, в якій матеріал, що кристалізується існує в рідкому та твердому станах.

Вважається, що в рівноважній моделі двохфазної зони дифузійні процеси в рідкій та твердій фазах проходять повністю. Тоді справедливо правило важеля для визначення густини фази домішок через її густину в рідкій та твердій фазах [2].

Механізм переносу дисперсних фаз у поруватій зоні живлення зі змінною і структурованою, завдяки присутності дендритів, поруватістю дуже складний і може бути промодельований лише за умови серйозних припущень, що спрощують, які повинні ґрунтуватись на наявних експериментальних даних. В основу нашого розгляду покладемо механізм масопереносу в зоні живлення, який впливає з досить ґрунтовних та всебічних експериментальних досліджень, проведених в інституті проблем лиття НАН України [3], як на прозорих фізичних моделях, так і безпосередньо на сталі за допомогою спеціально розробленої експериментальної методики. Ці дослідження підтверджують та деталізують гіпотезу про капілярний (в основному) механізм переносу домішок у міждендритному просторі.

Аналіз фільтраційного руху розплаву в дендритному каркасі є важливим, з точки зору практичних задач, так як він впливає на структурну та хімічну неоднорідності у зливку, які утворюються завдяки механізму сегрегації [1, 4].

Завдяки капілярним явищам змочуюча рідина втягується в капіляр, а незмочуюча, навпаки, з нього виштовхується. У процесі усадки основний компонент розплаву через кращу змочуваність поверхні кристалів переміщується по дендритному каналу в напрямку до повністю застиглому металу і виштовхує звідти рідину, збагачену лікватами. Ця рідина буде рухатись у напрямку вершин дендритів з швидкістю, порівнянню зі швидкістю фронту кристалізації.

Вважається, що домішки крізь дендритний каркас рухаються з фільтраційною швидкістю розплаву. На підставі аналізу експериментальних даних [5] слідує висновок, що сегреганти, в яких кут змочування дендритних кристалів більший, ніж в чистому розплаві, капілярними силами виштовхуються з дендритного каналу у напрямку рідкої зони до повністю застиглому металу і виштовхує звідти рідину, збагачену лікватами. Ця рідина буде рухатись у напрямку вершин дендритів з швидкістю, порівнянню зі швидкістю фронту кристалізації, тобто цей рух і є визначаючим при утворенні хімічної неоднорідності зливку.

Постановка задачі та математична модель.

Математична модель процесу, що розглядається, є узагальненням відомих моделей сегрегації домішок [6].

Основні вихідні припущення моделі:

- розрахункова область представляє собою половину осевого перерізу зливка;
- з бічної поверхні та дна зливка відбувається віддача тепла за рахунок конвективного теплообміну з відповідним коефіцієнтом тепловіддачі;
- при кристалізації відбувається перенос домішок.

Розглянемо випадок наявності лише однієї домішкової фази.

В основу моделі покладені наступні рівняння, які відносяться до окремих зон зливка, що твердне:

$$\vec{v} \cdot \vec{v} = -(\delta_f - \varepsilon) \left[\Phi_S - \vec{v} \cdot (\zeta \vec{v}_{S1}^c - D_S \vec{\nabla} \zeta) \right] - (1 - \zeta) \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} + \nu_e \Delta \vec{v} + [\zeta \delta_f + (1 - \zeta) \varepsilon] \vec{g} - \vec{\nabla} \tilde{p}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{v} \cdot [\zeta (\vec{v} + \vec{v}_{S1}^c)] + \vec{v} \cdot (D_S \vec{\nabla} \zeta) + \Phi_S, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \beta_b}{\partial t} = -\vec{v} \cdot (\beta_b \vec{v}_b^c) + \vec{v} \cdot \left[(1 - \zeta) D_b \vec{\nabla} \frac{\beta_b}{(1 - \zeta)} \right] - \frac{k_b \beta_b}{(1 - \zeta)} \Phi_S, \quad (4)$$

$$\vec{v}_{S1}^c = -\frac{d_S^2}{C_{1D} \nu_L} (\varepsilon - \delta_f) \vec{g}, \quad (5)$$

$$\vec{v}_b^c = -\frac{K_b \zeta}{R_b (1 - \zeta) + \nu_L x_b \zeta} \left(\frac{2 - \zeta}{1 - \zeta} \vec{\nabla} \zeta + \zeta \vec{\nabla} \ln \beta_b \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{C_L (1 - \zeta)}{C} \vec{v}_L \cdot \vec{\nabla} T - \frac{C_S \zeta}{C} \vec{v}_S \cdot \vec{\nabla} T + \frac{1}{C} \vec{v} \cdot [\lambda'_L (1 - \zeta) + \lambda'_S \zeta] \vec{\nabla} T + \frac{L_e}{C} \Phi_S, \quad (7)$$

де \vec{v} — середньомасова (барицентрична) швидкість;

\vec{v}_{S1}^c — колективна складова відносної швидкості дрібно-

нокристалічної фази; \vec{v}_b^c — колективна швидкість домі-

шок; \vec{v}_L — швидкість розплаву; \vec{v}_S — швидкість твердої

фази; δ_f — об'ємний коефіцієнт фазової усадки; ε —

температурна усадка; \tilde{p} — тиск, нормований на густину;

T — температура; t — час; C — питома теплоємність;

C_S — питома теплоємність твердої фази; C_L —

питома теплоємність розплаву, причому

$C = C_L (1 - \zeta) + C_S \zeta$; ζ — об'ємна густина кристаліч-

ної фази; C_{1D} — коефіцієнт опору руху кристалів; Φ_S —

джерело твердої фази; D_S — коефіцієнт ефективної тур-

булентної дифузії дрібнокристалічної фази; L_e — ефек-

тивна питома енергія фазового перетворення; λ'_S , λ'_L —

нормовані на густину розплаву коефіцієнти теплопровід-

ності твердої та рідкої фаз відповідно; β_b — об'ємна

густина домішкової фази; D_b — коефіцієнт дифузії до-

мішок; k_b — коефіцієнт рівноважного розподілу домі-

шок; ν_e — ефективний коефіцієнт кінематичної

в'язкості; $\nu_L = \frac{\mu}{\rho_0}$ — в'язкість рідкої компоненти сере-

довища; g — прискорення вільного падіння; R_b та K_b —

феноменологічні параметри, які характеризують зону

дендритного каркасу; $x_b = \frac{\rho_b^0}{\rho_0}$, ρ_0 — істина густина

рідкої фази; ρ_b^0 — істина густина домішкової фази.

Формула (1), (2) та (5) відноситься до плинної зони, а (6) – до зони живлення. Формула (3) формально справедлива в усьому об'ємі зливка, але в твердій зоні – $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0$. В зоні живлення — $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \Phi_S$. В повному обсязі рівняння (3) використовується лише в плинній зоні.

Рівняння сегрегації (4) в повному обсязі справедливе до зони крапленого розплаву. В зоні живлення конвективна швидкість домішок визначається формулою (6), а в плинній зоні у вибраному наближенні — $\vec{v}_b^c = \vec{v}$. В зоні крапленого розплаву, як і в твердій зоні, рівняння (4) не розглядається. Рівняння теплопереносу (7) розв'язується в усіх зонах зливка. В плинній зоні швидкості \vec{v}_L та \vec{v}_S можуть бути знайдені за формулами:

$$\vec{v}_L = \vec{v} - \zeta \vec{v}_{S1}^c, \quad \vec{v}_S = \vec{v} + \vec{v}_{S1}^c.$$

Ці рівняння доповнюються граничними умовами:

1) на твердих поверхнях та осі симетрії на перпендикулярну складову вектора швидкості накладається умова не протікання:

$$\vec{n} \cdot \vec{V}_\perp = 0, \quad (8)$$

на швидкості, які паралельні поверхні — умова вільного ковзання:

$$\left. \frac{\partial V_\parallel}{\partial \vec{n}} \right|_S = 0, \quad (9)$$

2) для тиску на усіх границях задається гранична умова другого роду:

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \tilde{p} = 0, \quad (10)$$

3) для температури на осі симетрії та верхній поверхні форми — умова теплоізоляції:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right|_S = 0, \quad (11)$$

на бічній поверхні та дні форми — умова конвективно-теплообміну

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right|_S = \alpha(T - T_{cp}), \quad (12)$$

де α — коефіцієнт теплопередачі;

4) на осі симетрії і твердих поверхнях форми для домішкової та твердої фази — умова непротікання:

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \beta = 0, \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} \zeta = 0. \quad (13)$$

Застосуємо метод розщеплення за фізичними факторами для розв'язання системи рівнянь (1)–(7) [6]:

$$2 \quad \vec{v}_{S1}^c = \frac{d_S^2}{C_{1D} \nu_L} (\varepsilon - \delta_f) \vec{g}, \quad (14)$$

I

$$1,2 \quad \vec{v} = \vec{v}^n + \tau \left\{ (\vec{v}^n \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}^n + \nu_e \Delta \vec{v}^n + [\zeta^n \delta_f + (1 - \zeta^n) \varepsilon^n] \vec{g} \right\}, \quad (15)$$

$$1-5 \quad \lambda^n = \lambda'_L (1 - \zeta^n) + \lambda'_S \zeta^n, \quad (16)$$

$$1-5 \quad C^n = C_L (1 - \zeta^n) + C_S \zeta^n, \quad (17)$$

$$1-5 \quad \tilde{T} = T^n + \frac{\tau}{C^n} \left[\vec{\nabla} \cdot (\lambda^n \vec{\nabla} T^n) + L_e \Phi_S^n \right], \quad (18)$$

$$1,2 \quad \tilde{\zeta} = \zeta^n + \tau \left[\vec{\nabla} \cdot (D_S \vec{\nabla} \zeta^n) + \Phi_S^n \right], \quad (19)$$

1-3

$$\tilde{\beta} = \beta^n + \tau \left\{ \vec{\nabla} \cdot \left[(1 - \zeta^n) D_b \vec{\nabla} \left(\frac{\beta^n}{(1 - \zeta^n)} \right) \right] - \frac{k_b \beta^n}{(1 - \zeta^n)} \Phi_S^n \right\}, \quad (20)$$

II

$$1,2 \quad T^{n+1} = \tilde{T} - \tau \vec{v}^n \cdot \vec{\nabla} T^n, \quad (21)$$

$$1,2 \quad \zeta^{n+1} = \tilde{\zeta} - \tau \vec{v}^n \cdot \left[\zeta^n (\vec{v}^n + \vec{v}_{S1}^c) \right], \quad (22)$$

$$3 \quad A^{n+1} = - \frac{K_b \zeta^{n+1}}{R_b (1 - \zeta^{n+1}) + \nu_L x_b \zeta^{n+1}}, \quad (23)$$

$$3 \quad B^{n+1} = \frac{2 - \zeta^{n+1}}{1 - \zeta^{n+1}} \vec{\nabla} \zeta^{n+1}, \quad (24)$$

$$1-3 \quad \beta^{n+1,0} = \tilde{\beta}, \quad p^{n+1,0} = p^n, \quad \vec{v}^{n+1,0} = \vec{v}^n, \quad (25)$$

III

$$1,2 \quad \tilde{p}^{n+1,k+1} = \tilde{p}^{n+1,k} + \omega \left[\Delta \tilde{p}^{n+1,k} - (\vec{v}^n \cdot \vec{\nabla}) \tilde{p}^{n+1,k} / \tau \right], \quad (26)$$

IV

$$3 \quad \vec{v}_b^{c,n+1,k} = A^{n+1} \left(B^{n+1} + \zeta^{n+1} \vec{\nabla} \ln \beta_b^{n+1,k} \right), \quad (27)$$

$$1-3 \quad \beta^{n+1,k+1} = \tilde{\beta} - \tau \vec{v}^n \cdot \left(\beta_b^{n+1,k} \vec{v}_b^{c,n+1,k} \right), \quad (28)$$

$$1,2 \quad \vec{v}^{n+1} = \tilde{v} - \tau \Delta \tilde{p}^{n+1}. \quad (29)$$

Тут n — номер часового шару, k — номер ітерації.

Наведені номери зон, в яких ці формули справедливі, відповідають значенням: 1 — рідинна зона; 2 — зона рухомих кристалів; 3 — зона живлення; 4 — зона крапленого розплаву; 5 — тверда зона.

Весь процес розрахунку умовно розбивається на чотири етапи. Нульовий етап — поза циклом за часом, знаходиться швидкість кристалів відносно розплаву в зоні рухомих кристалів (14). Всі наступні етапи виконуються в циклі за часом.

На першому етапі проводяться попередні підрахунки всіх основних теплофізичних величин (15)–(20) і враховується дифузійний компонент всіх процесів. Для швидкості враховується ще конвективна складова і не враховується лише поле тиску, тобто знаходиться допоміжне поле швидкості, що відповідає першому етапу звичайної схеми розщеплення.

На другому етапі враховуються переносні процеси величин T та ζ , для яких прийнята явна схема (21)–(22). Також виконуються попередні ототожнення (25), які необхідні для проведення розрахунків в ітераційному циклі (останні два етапи), та розрахунки (23)–(24), які можна винести за ітераційний цикл.

На третьому етапі знаходиться поле тиску в плинній зоні (26).

І на четвертому етапі знаходяться остаточні значення домішки в зоні живлення (28) і швидкостей середовища в плинній зоні (29), а також густини домішки в усіх цих зонах. Обчислення на третьому і четвертому етапах незалежні і можуть проводитися в будь-якому порядку.

Задачу розв'язуємо у циліндричній системі координат для двовимірного випадку. Розрахункова область представляє собою прямокутник. Розіб'ємо її рівномірно шаховою сіткою на комірки та облямовуємо шаром заграничних комірок, для зручності розстановки початкових та граничних умов. Нумерацію комірок виконаємо у центрі. Скалярні величини будемо розра-

ховувати в центрі комірок, а векторні величини — на гранях.

Апроксимуємо рівняння схеми (1)–(7) та граничні умови (8)–(13) на рівномірній шаховій сітці.

За допомогою даної двовимірної математичної моделі побудована комп'ютерна реалізація процесу фільтрації домішок в дендритному каркасі зливка, що кристалізується, у середовищі Visual Studio 2012 на мові C#.

Дану модель можна буде використовувати для проведення тестових розрахунків з метою з'ясування

значущості тих або інших факторів, їх вплив на процес фільтрації домішок при кристалізації зливка.

Аналіз результатів. При чисельному дослідженні двовимірної математичної моделі переносу домішок в дендритному каркасі під час тверднення зливка, були отримані наступні результати.

На рисунку 1 представлений процес тверднення зливку з урахуванням переносу домішок для різних значень коефіцієнта тепловіддачі α , при температурі навколишнього середовища 65°C і температурі розплаву 1550°C .

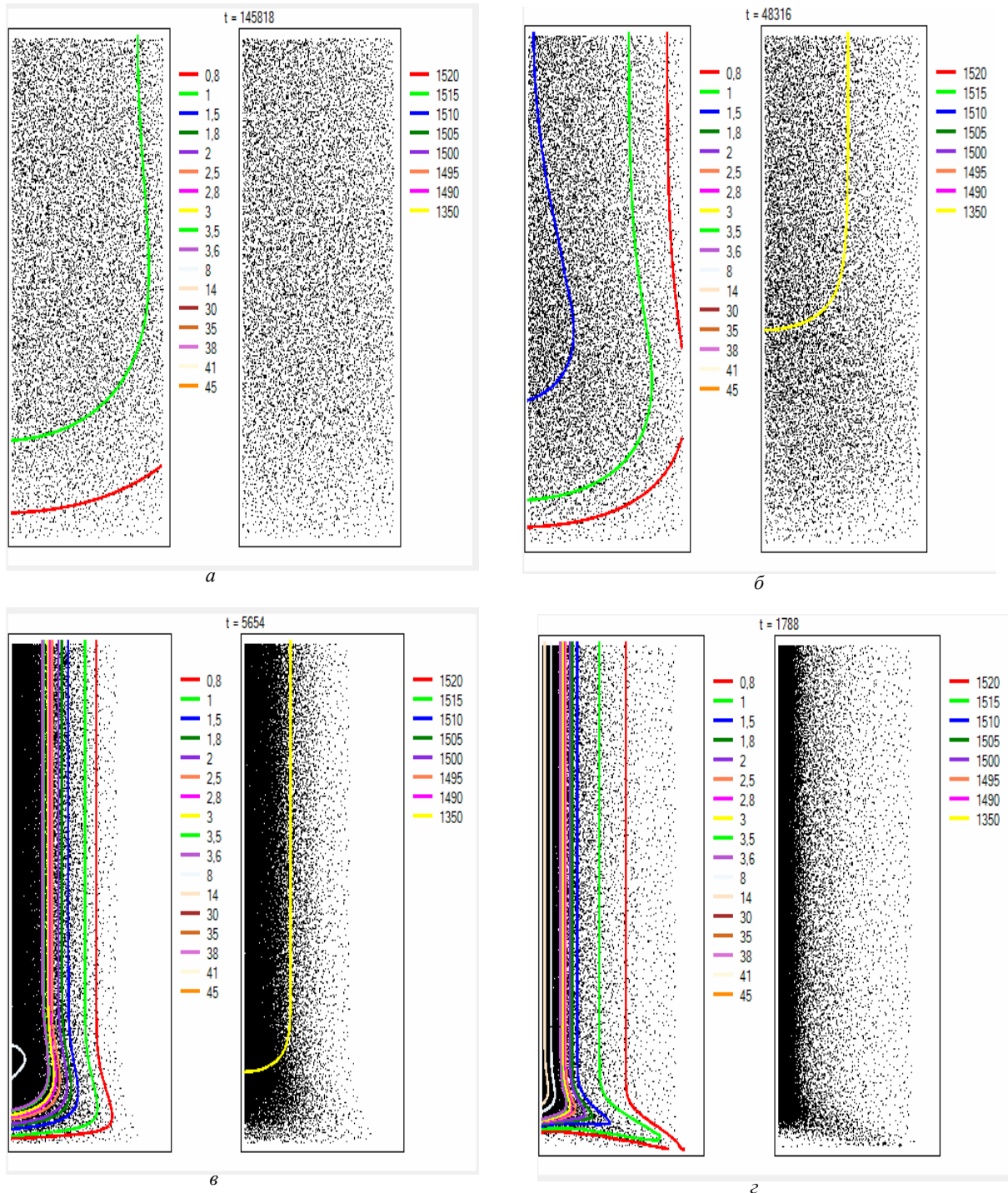
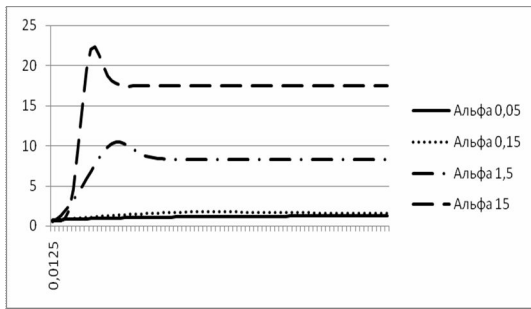


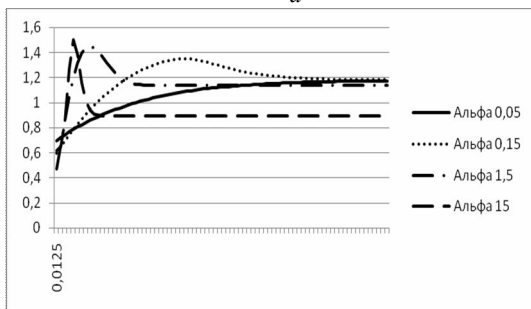
Рис. 1. Розподіл домішок в зливку, що твердне, при різних значеннях коефіцієнту тепловіддачі α : а — 0,05; б — 0,15; в — 1,5; г — 15

Як видно з рисунків (рис. 1, $a-z$), при кристалізації зливка початково рівномірно розподілена домішка виштовхується до осі симетрії зливка. На кінцевий розподіл домішки впливає значення коефіцієнта тепловіддачі. Найбільший показник концентрації домішок при $\alpha = 0,05$ знаходиться біля осі симетрії в верхніх комірках розрахункової області і набуває значення 1,295751. При $\alpha = 0,15$ найбільше значення концентрації домішок розташовується біля осі симетрії в комірках розрахункової області, розташованих приблизно по середині і дорівнює 1,72413. При $\alpha = 1,5$, максимум показника концентрації домішок знаходиться біля осі симетрії в комірках розрахункової області, розташованих нижче середини і набуває значення 10,49164, а при $\alpha = 15$, максимум показника концентрації домішок знаходиться біля осі симетрії в комірках розрахункової області, розташованих над нижніми шаром комірок і набуває значення 22,31951.

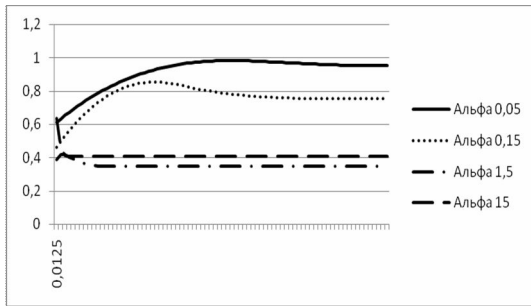
Різні значення коефіцієнту тепловіддачі також впливають на час кристалізації зливка. Так, при $\alpha = 0,05$ зливко твердне за $t = 145818$ с, при $\alpha = 0,15$ повне тверднення проходить за $t = 48316$ с, при $\alpha = 1,5$ — $t = 5654$ с, а при $\alpha = 15$ — $t = 1788$ с. Тобто, збільшення коефіцієнту тепловіддачі скорочує процес тверднення зливку.



a



б



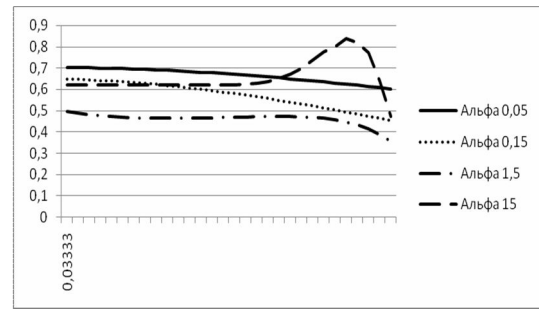
в

Рис. 2. Залежності розподілу домішки від значення коефіцієнта тепловіддачі у вертикальному перерізі: *a* — біля осі симетрії; *б* — в центрі зливка; *в* — права границя зливка.

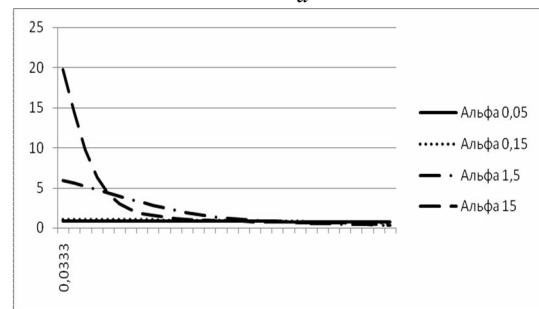
На рисунку 2а наведено графік концентрації домішки в залежності від висоти в першій комірці біля осі симетрії. Графіки представлені для різних значень коефіцієнта тепловіддачі α . Дані графіки демонструють місця максимального розташування домішки, які наведені на рисунку 1, $a-z$. Так можна спостерігати, що при більшому значенні коефіцієнту тепловіддачі максимальна кількість домішки знаходиться у нижній частині зливку. Малим значенням коефіцієнту тепловіддачі відповідає середнє розташування максимуму домішки.

На рисунку 2б наведено аналогічну картину, але для центральної частини зливку. Розглядалися середні комірки по висоті зливка. Тут можна спостерігати, що значення концентрації домішки для різних коефіцієнтів тепловіддачі α не сильно відрізняються між собою і коливаються від 0,5 до 1,6, не дивлячись на те, що їх графіки різні.

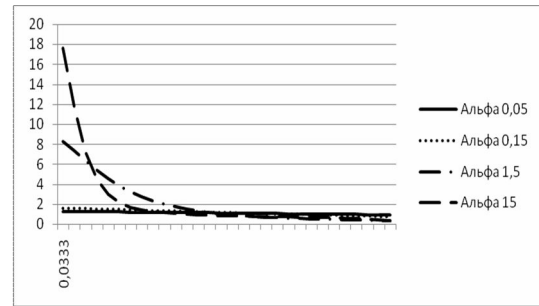
На рисунку 2в представлені графіки концентрації домішки, яка знаходиться біля правої границі зливка. Максимальне значення концентрації домішки (від 0,6 до 1) дає нам мінімальне значення коефіцієнта тепловіддачі. При збільшенні значення коефіцієнта тепловіддачі, біля стінки зливка залишається менша кількість домішки (від 0,3 до 0,5).



a



б



в

Рис. 3. Залежності розподілу домішки від значення коефіцієнта тепловіддачі у горизонтальному перерізі: *a* — нижня частина; *б* — горизонтальна частина зливка, нижча середини; *в* — верхня частина.

На рисунку 3 зображено графіки концентрації домішки, розташованих вдовж радіуса зливка. З представлених графіків видно, що концентрація домішки також зосереджена біля осі симетрії, та чим більше значення коефіцієнту тепловіддачі α , тим більша концентрація домішки. Для найбільшого значення коефіцієнта тепловіддачі, в комірках, розташованих ближче до дна зливка, значення концентрації домішки біля осі менше, ніж біля правої границі. Для менших значень коефіцієнта тепловіддачі спостерігається обернена картина.

Для верхньої частини зливка та частини, де спостерігається найбільша концентрація домішки, графіки мають схожий вигляд, тобто, максимум розташований біля осі симетрії.

Отримані дані свідчать про суттєвий вплив значення коефіцієнту тепловіддачі α на кінцевий розподіл домішки при кристалізації сталевого зливка. Також, необхідно відмітити, що зміна температури навколишнього середовища приводить до зміни характеру розподілу домішки та впливає на час тверднення зливка. Наприклад, чим менше температура навколишнього середовища, тим швидше зливоч твердне і спостерігається картина вморожування домішки в поверхневий шар зливка.

Висновки. В роботі розглянуто та чисельно досліджено двовимірну математичну модель розподілу домішок при кристалізації сталевого зливка,

За даною двовимірною математичною моделлю розроблено програму у середовищі Visual Studio 2012 на мові C#, проведено дослідження впливу теплофізичних параметрів на кінцевий розподіл домішки у зливку.

Отримано залежності концентрації домішки від значення коефіцієнта тепловіддачі α в різних частинах зливка, що твердне.

Із аналізу чисельних досліджень, видно, що різні значення теплофізичних параметрів, таких як коефіцієнт тепловіддачі, температура навколишнього середовища і початкова температура розплаву, суттєво впливають на кінцевий розподіл домішок.

Розроблена модель є тестовою. Подальший її розвиток буде складатися у визначенні факторів, які ма-

ють несуттєвий характер впливу на досліджуваний процес та в адаптації цієї моделі до переносу конкретної домішки у зливку, який кристалізується.

ЛІТЕРАТУРА

1. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации. – Рига: Знание, 1980, – 189 с.
2. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. – М.: Metallurgia, 1987. – 232 с.
3. Вихляев В.Б., Ефимов В.А., Ищук Н.Я. К вопросу о структуре двухфазной зоны и механизме массопереноса в ней // Проблемы сталеного слитка. VI. – М.: Metallurgia, – 1976. – С. 122–129.
4. Вихляев В.Б., Ефимов В.А., Ищук Н.Я. и др. Исследование процессов структурообразования и ликвиции примесей в слитках спокойной стали // Проблемы сталеного слитка. V. – М.: Metallurgia, 1974. – С. 81–96.
5. Недопекин Ф.В. Процессы переноса импульса, энергии и массы в сплошных средах. – Донецк: ДонГУ, 2013, – 422 с.
6. Самохвалов С.С. Теплофизичні процеси в багатфазних середовищах: Теоретичні основи комп'ютерного моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994, – 172 с.
7. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Metallurgia, 1976.– 766 с.
8. Ефимов В.А., Борисов В.Т., Журавлев В.А. Компьютерные модели кристаллизации стали и сплавов. Кристаллизация и компьютерные модели: Тезисы конф. Ижевск: Изд-во Удм. ун-та, 1992, – С. 3–7.
9. Никитенко Н.И., Никитенко Ю.Н. Исследование тепломассопереноса при кристаллизации сплавов с учетом двухфазной зоны // Промышленная тепло-техника. – 1983. – Т.5, №6. – С. 7–13.
10. Огурцов А.П., Недопекин Ф.В., Белоусов В.В. Процессы формирования сталеного слитка. Математическое моделирование заполнения и затвердевания – Днепродзержинск: ДГТУ, 1994. – 180 с.

пост. 22.03.2016