

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ СТАЛЕВОГО ЗЛИВКА, ЩО ТВЕРДНЕ

В даній роботі розглянуто існуючі моделі та методи, що описують кристалізацію розплавів. Вивчено математичну модель кристалізації зливку з врахуванням усадкових явищ та формування конуса осадження дрібнодисперсних кристалів. Наведено двовимірну математичну модель кристалізації зливку з використанням методу розщеплення за фізичними факторами.

Ключові слова: сталевий зливок, дрібнодисперсні кристали, тверднення, рух кристалів, усадочна раковина, дендритний каркас.

В данной работе рассмотрены существующие модели и методы, описывающие кристаллизацию расплавов. Изучена математическая модель кристаллизации слитка с учетом усадочных явлений и формирования конуса осаждения мелкодисперсных кристаллов. Представлена двумерная математическая модель кристаллизации слитка с использованием метода расщепления по физическим факторам.

Ключевые слова: стальной слиток, мелкодисперсные кристаллы, затвердевание, движение кристаллов, усадочная раковина, дендритный каркас.

In this paper was considered existing models and methods that describe the crystallization of melts. A mathematical model for the crystallization of an ingot has been studied, taking into account shrinkage phenomena and the formation of a cone for deposition of finely dispersed crystals. A two-dimensional mathematical model of ingot crystallization is proposed using the method of splitting by physical factors.

Key words: steel ingot, small divided crystals, solidification, motion of crystals, shrinkage shell, dendritic skeleton.

Вступ

Актуальність проблеми затвердіння металу обумовлено тим, що на основі її вирішення стає можливим побудова раціональних технологічних процесів отримання злиwkів та відливок високої якості з мінімальними витратами праці і матеріалів. Вивчення і рішення цієї проблеми сприятимуть підвищенню якісних показників продукції металургії та машинобудування, скорочення витрат металу у виробництві.

Литво є одним із способів отримання металевих виробів і заготовок в машино- і приладобудуванні, будівництві і інших галузях народного господарства.

Суть отримання відливок полягає у тому, що розплавлений і перегрітий сплав заданого складу заливається в ливарну форму, внутрішня порожнина якої максимально наближена до конфігурації і розмірів майбутнього виробу. При охолодженні метал твердне і в твердому стані зберігає контури тієї порожнини, в яку він був залитий. Велика частина існуючих технологій обробки металів включає стадію отримання литої заготовки (зливка). З цього виходить, що найефективнішою є ливарна технологія, що дозволяє одержувати вироби необхідної конфігурації,

розмірів і властивостей безпосередньо з розплаву при мінімальних витратах енергії, матеріалів і праці.

Виявлення основних закономірностей формування кристалічної структури, фізичної і хімічної неоднорідностей, які суттєво впливають на механічні і фізичні властивості литого металу, має важливе значення для знаходження оптимальних умов формування якісних зливок і відливок [1]. З відомих експериментальних і теоретичних досліджень [2] виходить, найважливішими факторами, сприяючими фізичній неоднорідності типу мікропор, є розчинені гази і перебіг розплаву через перехідну зону, обумовлений усадковими явищами при фазовому переході.

Для виробництва відливок потрібний сплав заданого складу в рідкому стані. Густина металів і сплавів зумовлює масу заготовки і виробу. Зміна густини металів і сплавів зі зміною температури має дуже велике значення для технології отримання литих заготовок. Збільшення густини при охолодженні розплаву і його кристалізації, що виражається в зменшенні об'єму, зумовлює так звану об'ємну усадку, яка виявляється в пониженні рівня розплаву в ливарній формі і утворення у відливки пустот — усадкових раковин і пористості. Зростання густини металу або сплаву в твердому стані при охолодженні приводить до скорочення лінійних розмірів, тобто до лінійної усадки. На кінцеві розміри відливки впливає зміна об'єму твердого металу в результаті різних фазових перетворень. Правильно розроблена технологія отримання відливки повинна забезпечувати відсутність в ній пустот і задані лінійні розміри.

На підставі вивчених робіт Ю. А. Самойловича, В.И. Тимошпольского, В. А. Єфимова та інших відомих вчених-металургів можна вказати основні вимоги до якості зливка:

- 1) однорідна дендритна будова зливка;
- 2) однаковий хімічний склад з мінімальною міждендритною і зональною ліквідацією;
- 3) відсутність сторонніх металевих і неметалевих включень;
- 4) виникаючі в процесі кристалізації неметалеві включення повинні бути дрібно-дисперсними і рівномірно розподілені за обсягом;
- 5) зливок не повинен мати поверхневих дефектів;
- 6) зона підкоркової пористості та інших дефектів повинна бути мінімальною;
- 7) лите зерно повинно бути дрібним і рівноосним.

Математична модель тепломасопереносних процесів в зливку, що твердне, з урахуванням усадкових явищ

Охолодження розплаву, його кристалізація і подальше охолодження в твердому стані супроводжуються зменшенням об'єму або його усадкою. З усадкою пов'язане виникнення у відливках пустот у вигляді раковин і пір, внутрішніх напружень і тріщин, зазору між

відливкою і поверхнею форми. На кінцеві розміри відливки впливає зміна об'єму твердого металу в результаті різних фазових перетворень [3].

Якби під час формування відливки в ливарній формі зменшення об'єму відбувалося у всіх частинах одночасно, то слідством усадки було б зменшення розмірів. У реальних умовах тверднення різних частин відливки відбувається нерівномірно. Коли зовнішні прошарки затвердіють і змінять об'єм і розміри, у внутрішніх зонах ще знаходиться рідкий розплав, який повинен зазнати ще більшу усадку в порівнянні із затверділими прошарками. Після закінчення охолодження виявиться, що

об'єм внутрішньої частини відливки зменшився більше, ніж об'єм, обмежений зовнішніми контурами всієї відливки. Усередині відливки виявляються усадкові порожнини, не заповнені металом. В ході тверднення відливки об'ємна усадка виявляється у вигляді крупних пустот — усадкових раковин і численних дрібних пір — усадкової пористості [4]. У простій циліндричній відливці утворюється зосереджена усадкова раковина конічної форми (рис. 1).

Відливки з усадковими раковинами в перетині в більшості випадків непридатні для використання, тому при їх виготовленні прагнуть вивести усадкову раковину в додатковий об'єм, званий *прибутком*. Щільна будова відливки може бути забезпечене лише при здійсненні притоки рідини з прибутку. Тому розплав в ній повинен тверднути в останню чергу.

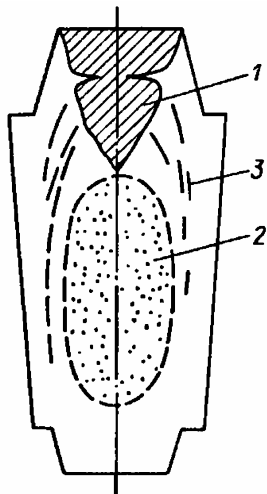


Рисунок 1 — Схема розташування усадочних дефектів в поздовжньому перетині зливка: 1 – усадочна раковина; 2 – зона мікропористості; 3 – «вуса» (позацентрова сегрегація домішки)

Метою даної роботи є дослідження математичної моделі кінетики формування усадкової раковини, а також формування конуса осадження дрібнодисперсних кристалів для сталевого зливка та подальша її комп'ютерна реалізація.

У основу моделі закладаються наступні початкові припущення:

— розглядаємо циліндрично-симетричну ливарну форму, яка має геометричні розміри, представлені на рисунку 2;

— внутрішня поверхня форми покрита тонким шаром (порядку 1мм) окислу алюмінію; — з боку форми границя рідкого металу рухома і форма її визначається товщиною і формою металу, що намерзнув;

— метал в об'ємі форми певною мірою турбулізований;

— з бічної поверхні форми і через дзеркало металу відбувається віддача тепла за рахунок конвективного теплообміну з певним коефіцієнтом тепловіддачі і за рахунок випромінювання за законом Стефана-Больцмана з певним коефіцієнтом ступеня чорноти;

— при кристалізації розплаву відбувається усадка.

Розрахункова область є половиною осьового перерізу форми.

Після наповнення зливка припиняється гідродинамічна дія струменя, і на перший план виступають процеси тверднення. При твердненні розплаву відбувається усадка. Це приводить до виникнення гравітаційної конвекції, яка породжується окремими рухомими кристалами, що виникають в розплаві і вільно осідають у напрямі дна виливниці, утворюючи неоднорідність фізичної структури зливка — конус осадження. З другого боку, усадка приводить до формування усадкової раковини. Теплофізичні характеристики прибуткової надставки визначають її глибину і форму.

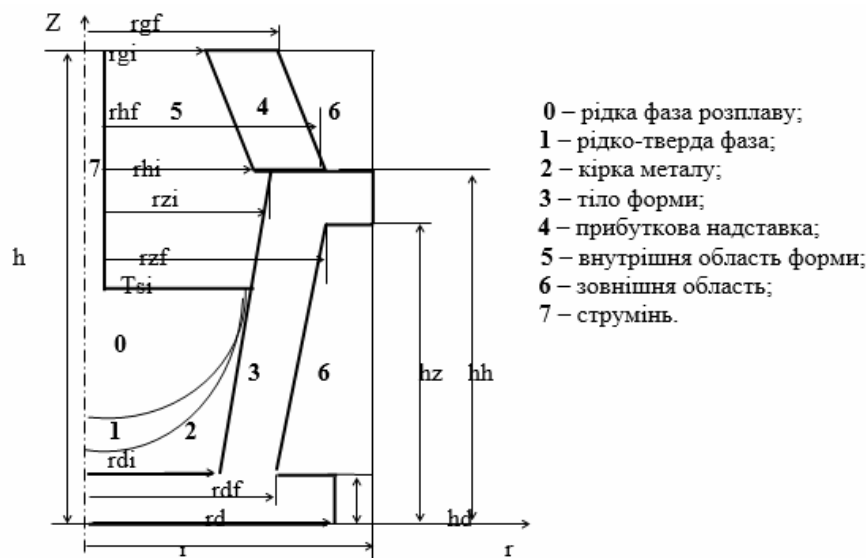


Рисунок 2 — Розрахункова область

Для опису цих явищ розглянуто математична модель кристалізації зливка або відливки, яка описує гідродинамічні і теплофізичні процеси в рідкій і двофазній зонах зливка, що твердне [5, 6]. Дана математична модель враховує явища усадки розплаву при твердненні і рух дрібнодисперсних кристалів відносно розплаву. Також врахована теплова конвекція, яка при твердненні має той же порядок, що і гравітаційна.

Вказані вище фактори — це джерела несоленоїдальності руху середовища, які потребують застосування спеціальних математичних методів для їх дослідження.

У даної моделі вважається, що об’ємна частка дрібнодисперсних рухомих кристалів ζ мала, а також нехтували внеском температурної усадки в несоленоїдальность руху середовища.

Густина розплаву ρ_L^0 лінійно залежить від температури $\rho_L^0 = \rho_0(1 + \delta_t(T_L - T))$ з коефіцієнтом температурної усадки δ_t , де T_L — температура ліквідусу. Залежністю густини затверділого металу ρ_S^0 від температури нехтували. За час кристалізації усадка має стрибок, який описується співвідношенням:

$$\rho_S^0 = \rho_0(1 + \delta_f), \quad (1)$$

де δ_f — об’ємний коефіцієнт фазової усадки порядку $5 \cdot 10^{-2}$. Густина середовища розплав-кристали можна знайти по формулі:

$$\rho = \rho_0(1 + \delta_t(T_L - T)\gamma + \delta_f\zeta), \quad (2)$$

де ζ — частка кристалічної частини; $\gamma = 1 - \zeta$.

Математичну модель складають наступні рівняння:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} \vec{v} = -\vec{\nabla} p' + \nu_e \Delta \vec{v} + [\gamma \delta_t (T_L - T) + \zeta \delta_f] \vec{g}, \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \vec{v} = -\vec{\nabla}(\zeta \vec{w}) - \delta_f \Phi_S \quad (4)$$

рівняння руху рідко-твердого середовища, де \vec{v} — швидкість середовища, p' — тиск, нормований на густина, ν_e — ефективний коефіцієнт кінематичної в’язкості, \vec{g} — прискорення вільного падіння, T — температура розплаву, Φ_S — джерело твердої фази залежить від температури лінійно: $\Phi_S = k(T_L - T)$, k — емпіричний коефіцієнт, а дифузійна швидкість кристалів направлена вертикально вниз $\vec{w} = -\frac{w_\zeta \vec{g}}{g}$ із значенням w_ζ , яке є параметром моделі. Перенесення дрібнокристалічної фази визначається рівнянням:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \vec{\nabla}[\zeta(\vec{v} + \vec{w})] = \Phi_S. \quad (5)$$

Рівняння (3) — (5) доповнюються рівнянням теплопереносу в середовищі:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} + \chi \zeta \vec{w}) \vec{\nabla} T = \frac{[\vec{\nabla}(\lambda' \vec{\nabla} T) + Le \Phi_S]}{C}, \quad (6)$$

де $\chi = \frac{C_S}{C_L} - 1$, $\lambda' = \frac{\lambda_L \gamma + \lambda_S \zeta}{\rho_0}$ і Le — питома теплопровідність і тепло кристалізації, $C = C_L \gamma + C_S \zeta$ — теплоємність середовища. Індеси L і S відносяться до рідкого і твердого металу відповідно. Рівняння (6) справедливе у всіх зонах зливка, що твердне.

Граничними умовами для швидкостей на вільній поверхні прийняті умовами вільного протікання

$$v_{\perp}|_s = v, \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} v_{\parallel}|_s = 0,$$

швидкість якого визначається швидкістю затвердіння і швидкістю усадки. Ця швидкість (при позитивному δ_f) направлена вниз і сприяє опусканню вільної поверхні розплаву у міру його тверднення, що приводить до утворення усадкової раковини. Граничними умовами для частки твердої фази ζ усюди вибрані умови непротікання

$$v_{\perp}|_s = 0, \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} v_{\parallel}|_s = 0.$$

Граничні умови для температури на внутрішніх поверхнях задані умовами спряження

$$q_{s-0} = q_{s+0},$$

на зовнішніх – умовами тепловіддачі конвекцією та випромінюванням

$$q_s = \pm a_T (T_S - T_{cp}) \pm \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_{cp}^4).$$

Рівняння (3)–(6) розв'язувалися чисельно за допомогою методу розщеплення для несоленоїдального руху [5]. Таким чином, розрахункова схема для даної задачі прийнята наступною:

I

$$\tilde{v} = \bar{v}^n + \tau \left[-(\bar{v}^n \vec{\nabla}) \bar{v}^n + v_e \Delta \bar{v}^n + (\gamma^n \delta_t (T_L - T^n) + \zeta^n \delta_f) \vec{g} \right], \quad (7)$$

$$\bar{v}^{n+1,0} = \bar{v}^n, \quad p'^{n+1,0} = p'^n, \quad \zeta^{n+1,0} = \zeta^n, \quad T^{n+1,0} = T^n, \quad (8)$$

II

$$\Phi_S^{n+1,k} = k(T_L - T^{n+1,k}), \quad (9)$$

$$C^{n+1,k} = (1 + \chi \zeta^{n+1,k}) C_L, \quad \lambda^{n+1,k} = \frac{(1 + \eta \zeta^{n+1,k}) \lambda_L}{\rho_0}, \quad (10)$$

$$p'^{n+1,k+1} = p'^{n,k} + \omega \left(\Delta p'^{n+1,k} - \frac{\vec{\nabla} \tilde{v} + \delta_f \Phi_S^{n+1,k} + \vec{\nabla} (\zeta^{n+1,k} \vec{w})}{\tau} \right), \quad (11)$$

$$\zeta^{n+1,k+1} = \zeta^n + \tau \left\{ \Phi_S^{n+1,k} - \vec{\nabla} \left[\zeta^{n+1,k} (\bar{v}^{n+1,k} + \vec{w}) \right] \right\}, \quad (12)$$

$$T^{n+1,k+1} = T^n + \tau \left(-(\bar{v}^{n+1,k} + \chi \zeta^{n+1,k} \vec{w}) \vec{\nabla} T^{n+1,k} + \frac{\vec{\nabla} (\lambda'^{n+1,k} \vec{\nabla} T^{n+1,k}) + Le \Phi_S^{n+1,k}}{C^{n+1,k}} \right), \quad (13)$$

III

$$\bar{v}^{n+1,k+1} = \tilde{v} - \tau \vec{\nabla} p'^{n+1,k+1}, \quad (14)$$

де $\eta = \frac{\lambda_S}{\lambda_L} - 1$, n — номер часового шару, k — номер ітерації.

При різницевій апроксимації просторових похідних в переносних рівняннях були введені доданки апроксимацій, що забезпечують стійкість різницевої схеми.

Висновки

У даній роботі досліджено математичну модель теплофізичних процесів в металі, що твердне, яка враховує його усадку, а також, для сталі, зародження і динаміку дрібнодисперсних кристалів, що утворюються в двофазній зоні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 766с.
2. Самойлович Ю.А. Формирование слитка. М.: Металлургия, 1977, 159 с.
3. Самойлович Ю.А. Системный анализ кристаллизации слитка. Киев: Наукова думка, 1983, 243 с.
4. Самойлович Ю.А. и др. Стальной слиток, Т.1. Управление кристаллической структурой / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. Мн.: Беларуская навука, 2000, 583 с.
5. Самохвалов С.Є. Теплофізичні процеси в багатофазних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. – 172 с.
6. Самохвалов С.Є., Надригайло Т.Ж. Комп'ютерне моделювання багатофазних середовищ у зливку. – Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2009, 144 с.