

УДК 669.147:536.243

Є.В. Синегін, Б.М. Бойченко, В.Г. Герасименко, Л.С. Молчанов

ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАВКОГО ІНОКУЛЯТОРА ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ РОЗЛИВАННІ СТАЛІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ МАРОК

Анотація. Розглянуто процес застосування інокуляторів при безперервному розливанні сталі. Розроблено алгоритм рішення задачі плавлення залізного порошку змішаного гранулометричного складу в рідкому металі в передкристалізаційний період. Визначені гранулометричний склад і витрата інокулятора, що забезпечують утворення в металі стійких зародків твердої фази.

Ключові слова: математичне моделювання, інокулятор, гранулометричний склад, безперервне розливання сталі.

Рассмотрен процесс применения инокуляторов при непрерывной разливке стали. Разработан алгоритм решения задачи плавления железного порошка смешанного гранулометричного состава в жидком металле в передкристаллизационный период. Определены гранулометрический состав и расход инокулятора, обеспечивающий образование в металле устойчивых зародышей твердой фазы.

Process of application inoculators at continuous casting of steel is considered. The algorithm for solve a problem of fusion an granulometric heterogeneous iron powder in liquid metal right before crystallization was developed. Particle-size distribution and consumption of inoculators that provide creation in metal the steady nucleus of crystal are determined.

Постановка задачі дослідження

Безперервне розливання сталі, як невід’ємна ланка сучасного сталеплавильного виробництва, за головними показниками: продуктивності і якості готової продукції – набагато опереджає технології розливання у зливки [1]. Проте безперервнолитій заготовці, як і будь-якому великому зливку, властиве утворення хімічної і структурної неоднорідності, що виникає в процесі кристалізації рідкого металевого розплаву. Швидкість тверднення заготовки, що визначає продуктивність машини безперервного лиття, також досягла своїх меж і визначається тепер внутрішнім тепловим опором заготовки [2].

Об’ємна кристалізація металевого розплаву, ініційована присутністю в об’ємі металу зародків нової фази, дозволяє не лише вирішити обидві задачі, пригнічуючи процеси ліквідації розчинених у металі домішок та істотно збільшуючи поверхню теплопередачі, але й істотно знизити енергоємність процесу безперервного розливання сталі, за рахунок підвищення продуктивності МБЛЗ і зниження частки бракованої продукції.

Аналіз основних досліджень

В умовах безперервного розливання сталі найбільш технологічно виправдане застосування у якості інокулятора порошкового мікрохолодильника у формі залізного порошку, що відповідно до ДСТУ 9849-86 “Порошок залізний” [3] поставляється з різним гранулометричним складом. Введення його в рідку сталь призводить до нерівномірної зміни теплофізичних параметрів останньої внаслідок поступового плавлення різних фракцій порошку, що, відповідно, впливає і на імовірність росту центрів кристалізації.

Для моделювання плавлення порошку змішаного гранулометричного складу був розроблений циклічний алгоритм, що включає рішення задачі нагрівання і плавлення сферичних часток різної фракції (рис. 1).

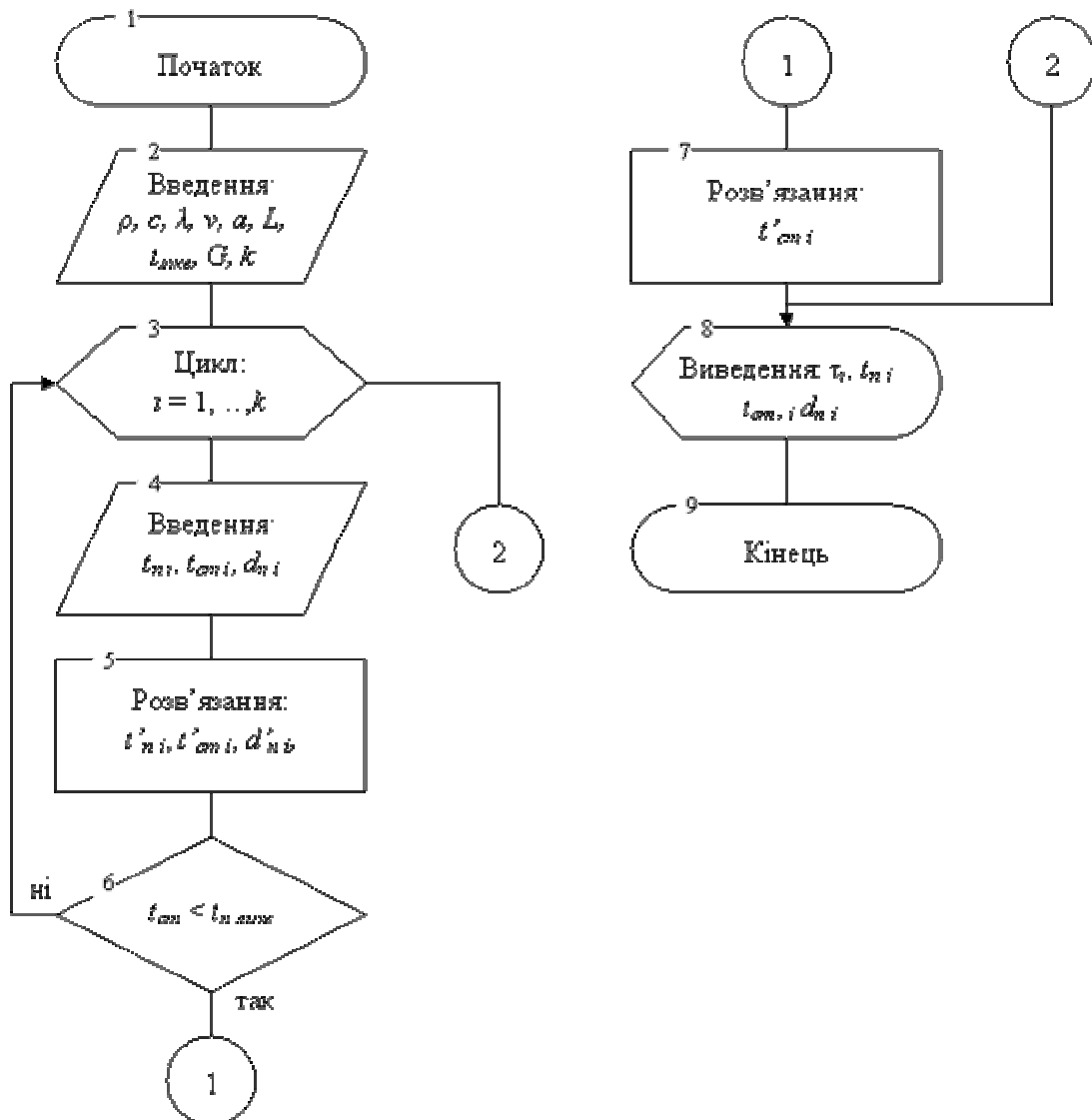


Рисунок 1. – Алгоритм вирішення задачі плавлення залізного порошку змішаного гранулометричного складу в металевому розплаві

Після початку розрахунку (блок №1) здійснюється введення фізико-хімічних сталей металевого розплаву і твердих часток порошку (блок вводу №2): щільності ρ , питомої теплоємності c , теплопровідності λ , в'язкості розплаву ν , коефіцієнта температуропровідності a , теплоти плавлення L , температури ліквідус порошку і розплаву $t_{лікв}$, питомої масової витрати порошку G .

Для наступного вирішення задачі процес плавлення порошку умовно поділяємо на k етапів, закінчення кожного з яких відповідає часу ϕ_i повного розплавлення часточок найменшої фракції порошку, що лишилися в розплаві. По завершенні кожного етапу відбувається зниження температура рідкої сталі до t'_{sti} , нагрів великих фракцій порошку до температури t'_{pi} та часткове оплавлення дрібних до діаметра d'_{pi} . Зміна цих параметрів враховується на наступному етапі, реалізованому блоком циклу №3.

Блок циклу включає операції по введенню (блок №4) початкових умов (початкової температури кожної фракції t_{ni} та її діаметра d_{ni} , і початкової температури сталі t_{cm}) і розрахунок (блок №5) цих же величин для кожної фракції порошку наприкінці i -ого етапу. У випадку зниженні температури рідкої сталі нижче температури ліквідус порошку (блок умови №6) його плавлення повністю зупиняється, цикл обривається достроково, а розрахунок охолодження сталі за рахунок нагрівання нерозплавлених фракцій порошку виконується блоком №7. Якщо ж температура сталі більша за температуру ліквідус порошку, виконується наступний етап циклу. За будь-якого варіанту завершення циклу результат розрахунку виводиться на екран (блок №8).

Окрім цього блоком №5 виконується розрахунок питомої поверхні $S_{\Sigma i}$ часток порошку, віднесеної до одиниця об'єму металу і числа центрів (ЧЦ) кристалізації в одиниці об'єму рідкого металу, що розраховуються за наступними формулами:

$$S_{\Sigma i} = 3 \cdot 10^{-7} \cdot G_i \cdot \frac{\rho_{Me}}{\rho_n} \sum_{j=1}^m \frac{P_j}{R_j}, \text{ м}^2/\text{м}^3 \text{ (1/м)}, \quad (1)$$

де G_i – питома маса порошку на i -ому етапі циклу, що розраховується за формулою

$$G_i = \frac{1 - p_{i-1}}{10 \left(\frac{10}{G_{i-1}} + p_{i-1} \right)}, \text{ кг/т}, \quad (2)$$

де G_{i-1} – питома маса порошку на попередньому ($i-1$)-ому етапі циклу, кг/т; p_{i-1} – масова частка порошку, що розплавився на попередньому етапі

циклу; ρ_{Me} , ρ_p – відповідно густина рідкого металу і порошку, кг/м³; p_j – масова частка j -ої фракції порошку в суміші; R_j – радіус j -ої фракції порошку в суміші, мкм.

Число центрів кристалізації в 1 см³ металу на першому етапі циклу

$$\text{ЧЦ}_1 = 7,5 \cdot 10^{-14} \frac{G_1}{\pi} \cdot \frac{\rho_{Me}}{\rho_n} \sum_{j=1}^m \frac{p_j}{R_j^3}, \text{ см}^{-3}, \quad (3)$$

а для наступних етапів

$$\text{ЧЦ}_i = \frac{\text{ЧЦ}_{i-1} - \frac{3p_{j-1}G_{i-1}}{4\pi R_{j-1}^3} \cdot \frac{\rho_{Me}}{\rho_n}}{1 + p_{j-1} \cdot G_{i-1}}, \text{ см}^{-3}. \quad (4)$$

У блоці №5 закладене вирішення задачі нагріву сферичного тіла обмеженої теплопровідності $\lambda \neq \infty$ за умови сталості температури навколишнього середовища $t_{\text{сф}} = \text{const}$ [4], а також задача плавлення рівномірно прогрітої сфери з безперервним видаленням рідкої фази з її поверхні (за рахунок конвекційних потоків металевого розплаву, що омивають часточку) [5]. Вибір методики вирішення задачі нагрівання часточок обумовлений виконанням за умов природної конвекції умови $Bi > 0,25$ [4]. Можливо також застосування в блоці №5 математичних моделей, запропонованих у роботах [6-8], які, однак, несуттєво ускладнюють рішення задачі і знижують точність результату.

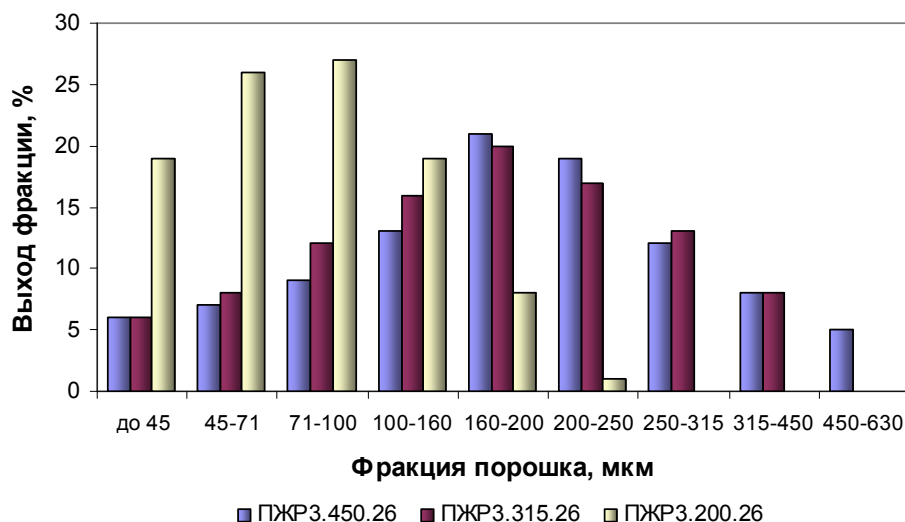


Рисунок 2. – Гранулометричний склад залізного порошку, отриманого методом розпилення металевого розплаву водою високого тиску чи стиснутим повітрям

Моделювання здійснювали для умов розливання низьковуглецевої сталі марки 09Г2С з уведенням інокулятора у формі залізного порошку марок ПЖР3.200.26, ПЖР3.315.26, ПЖР3.450.26, гранулометричний

склад якого представлено на рис. 2 [3]. Витрату порошку змінювали в межах 2ч6 кг/т сталі. Температура ліквідус сталі і залізного порошку, що розрахована за методикою [9], склала відповідно 1510°C и 1525°C. Перегрів сталі даної марки перед розливанням звичайно складає 25°C [9]. Інші фізико-хімічні параметри рідкої сталі і порошку прийняті з довідкової літератури [8-10].

Постановка завдання дослідження

Основною задачею застосування інокулятора (мікрохолодильника) є зняття перегріву рідкої сталі і створення в її об'ємі достатньої для ініціювання об'ємної кристалізації кількості зародків твердої фази. Для цього витрату і гранулометричний склад інокулятора слід підбирати таким чином, щоб після зниження температури сталі до температури плавлення порошку в його об'ємі зберігалася висока концентрація порошку, а діаметр часточок перевищував критичний, за якого вони розплавляються в рідкому металі.

Основні матеріали дослідження

На рисунку 3 представлено результати математичного моделювання процесу плавлення порошку змішаного гранулометричного складу, які надані для зручності на логарифмічній шкалі. З графіків видно, що тривалість процесу плавлення порошку майже у всіх випадках не перевищує 1 секунди, за яку число часточок порошку в 1-ому см³ рідкого металу встигає зменшитися на 5 порядків. Тривалість плавлення порошку збільшується зі збільшенням частки великої фракції в його складі. Порівнявши рис. 3 (б, г, д) можна з упевненістю стверджувати про неприйнятність використання порошку марки ПЖРЗ.200.26 унаслідок його повного плавлення в металі. Усунення цього недоліку вимагає збільшення витрати порошку понад 6 кг/т, що неминуче призведе до підвищення енергоємності процесу безперервного розливання.

Різниця між залишковим числом центрів кристалізації при використанні порошку марок ПЖРЗ.450.26 і ПЖРЗ.315.26 практично не відчутна і посилюється лише при збільшенні витрати порошку. Так при витраті 4 кг/т сталі порошку марок ПЖРЗ.450.26 і ПЖРЗ.315.26 залишкове число центрів кристалізації відрізняється лише в 1,06 рази і складає відповідно 421 і 397 см⁻³. При витраті 6 кг/т порошку цих же марок різниця збільшується до 2,16 разів, причому цього разу число залишкових центрів кристалізації більше при використанні порошку марки ПЖРЗ.315.26 – 1365 проти 631 см⁻³.

Цей, парадоксальний, на перший погляд, результат можна пояснити, проаналізувавши гранулометричний склад порошку розглянутих марок (див. рис. 2). Наявність у порошку марки ПЖРЗ.450.26 близько 5%

фракції більше 450 мкм нівелюється більшою часткою дрібних фракцій, що знижують температуру сталі на початкових етапах плавлення а, отже, тепловий потік від сталі до порошку. Виходячи зі сказаного, можна рекомендувати використання при безперервному розливанні сталі марки 09Г2С залізний порошок марок ПЖРЗ.315.26 та ПЖРЗ.450.26 з витратою щонайменше 4-6 кг/т рідкої сталі.

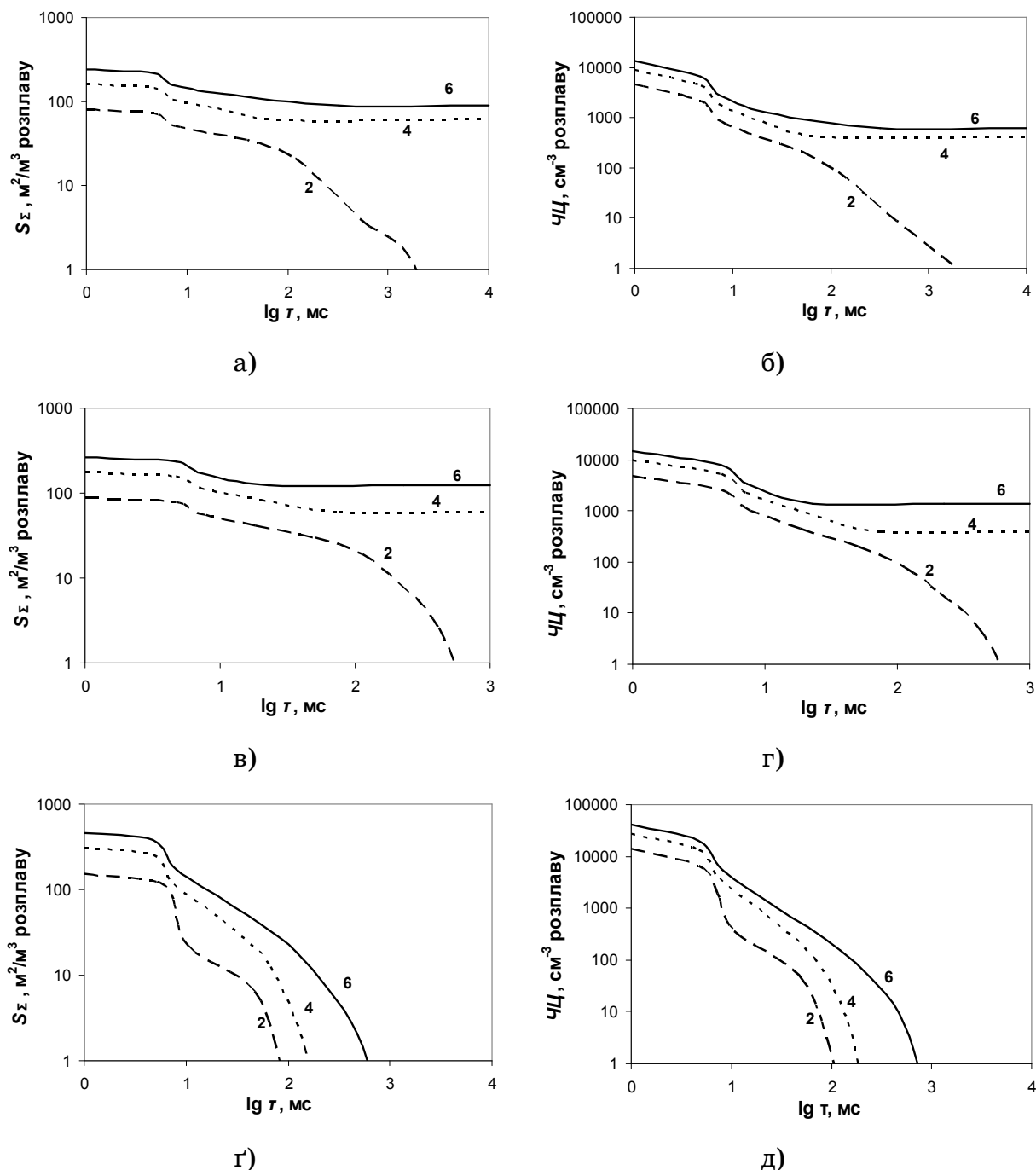


Рисунок 3. – Динаміка зміни питомої площі поверхні часточок порошку (а, в, г) та їх кількості (б, г, д) в об’ємі рідкої сталі при використанні залізного порошку марок ПЖРЗ.450.26 (а, б), ПЖРЗ.315.26 (в, г), ПЖРЗ.200.26 (г, д):

цифри біля кривих – витрата порошку, кг/т сталі

Висновки

За результатами моделювання можна запропонувати застосування для умов безперервного розливання сталі залізного порошку марок ПЖРЗ.315.26 та ПЖРЗ.450.26, частка дрібних фракцій у якому не перевищує 20 % по масі, з витратою щонайменше 4ч6 кг/т сталі. Дотримання цієї умови дозволить швидко знизити перегрів і створити в об'ємі рідкої сталі додаткові центри кристалізації, кількість яких по приблизній оцінці складе від 421 до 1365 на 1 см³ металевого розплаву.

ЛІТЕРАТУРА

1. Steel Statistical Yearbook 2012 / Worldsteel Association. Economics Committee. – Brussels, 2012. – 112 p.
2. Затуловский С.С. Суспензионная разливка / С.С. Затуловский. – К. : «Наукова думка», 1981.– 260 с.
3. ГОСТ 9849-86. Порошок железный. Технические условия – Введ. 1987-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 10 с.
4. Румянцев В.Д. Теория тепло- и массообмена: Учебное пособие / В.Д. Румянцев. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 532 с.
5. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов / Э.М. Гольдфарб. – М. : Металлургия, 1987. – 440 с.
6. Математическая модель физических процессов кристаллизации слитков и сварных швов при наличии микрохолодильников / А.А. Мочалов, А.А. Гайша, Н.А. Шаповал // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – 2008.– №6(423).– С. 76-80.
7. Мочалов А.А. Математическая модель намораживания металла на микрохолодильник / А.А. Мочалов, Н.А. Шаповал // Математичне моделювання – 2009. – №1(20). – С. 78-80.
8. Журавлёв В.А. Теплофизика формирования непрерывного слитка / В.А. Журавлёв, Е.М. Китаев. – М. : Металлургия, 1974. – 216 с.
9. Процессы непрерывной разливки / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев [и др.]. – Донецк : ДонНТУ, 2002. – 536 с.
10. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – Ленинград, М. : Государственное энергетическое издательство, 1958. – 416 с.