

УДК 669.18

<https://doi.org/10.34185/tpm.5.2021.05>

Нізяєв К.Г., Хотюн В.І.

Моделювання процесу плавлення частки феромарганцю при інжекції у рідку сталь

Nizyaev K., Khotyun V.

Modeling of the melting process of ferromanganese particles during injection into liquid steel

Мета роботи. Вивчення впливу інтенсивності руху металевого розплаву на процес нагрівання та плавлення частки феромарганцю, що вводиться в струмені газу-носія при позапічній обробці сталі в ковші.

Методи дослідження. Виконано аналітичний огляд літературних джерел присвячених математичному моделюванню з метою розрахунку швидкості плавлення різних феросплавів. Грунтуючись на відомих математичних моделях, адаптованих до конкретних технологічних умов, було виконано математичне моделювання плавлення часточки феромарганцю інжектуюваної в струмені газу-носія в залежності від її фракційного складу та швидкості руху металевого розплаву.

Отримані результати. За результатами математичного моделювання було встановлено, що введення часток феромарганцю фракцією від 0,5 до 3,0 мм у глиб металу в струмені газу-носія сприяє розплавленню її саме в об'ємі рідкого металевого розплаву, без ризику спливання на його поверхню та контакту її з киснем атмосфери, що зрештою сприяє її повному засвоєнню.

Наукова новизна. За результатами математичного моделювання встановлена тривалість плавлення інжектуюваної у струмені газу твердої частки феросплаву залежно від її фракційного складу та швидкості руху рідкого металевого розплаву.

Практична цінність. Визначення часу нагріву та плавлення часточки феросплаву введеної в потік газу-носія дозволяє більш ефективно керувати технологічними параметрами інжекції (витрата газу-носія, положення фурми) залежно від її розміру та ємності ковша.

Ключові слова: позапічна обробка, сталь, інжекція, розкислення, фракція, плавлення.

The goal of the work. Study of the influence of the intensity of the movement of the metal melt on the process of heating and melting of the ferromanganese fraction introduced into the carrier gas jet during out-of-furnace processing of steel in the ladle.

Research methods. An analytical review of literary sources dedicated to mathematical modeling for the purpose of calculating the melting speed of various ferroalloys was performed. Based on well-known mathematical models adapted to specific technological conditions, a mathematical simulation of the melting of a ferromanganese particle injected into the carrier gas jet was performed, depending on its fractional composition and the speed of movement of the metal melt. The results obtained. According to the results of mathematical modeling, it was established that the introduction of ferromanganese particles in a fraction of 0.5 to 3.0 mm into the depth of the metal in the stream of carrier gas contributes to its melting precisely in the volume of the liquid metal melt, without the risk of floating on its surface and contacting it with the oxygen of the atmosphere, which ultimately contributes to its complete assimilation.

Scientific novelty. Based on the results of mathematical modeling, the duration of melting of a solid ferroalloy particle injected into the gas jet was established, depending on its fractional composition and the speed of movement of the liquid metal melt.

Practical value. Determining the time of heating and melting of a ferroalloy particle injected into the carrier gas flow allows for more effective control of the technological parameters of the injection (carrier gas consumption, nozzle position) depending on its size and bucket capacity.

Key words: post-bake treatment, steel, injection, deoxidation, fraction, melting.

У чорній металургії використовують різні феросплави для розкислення, легування та модифікування сталі. Для отримання сталей із заданим хімічним складом необхідно, щоб ступінь засвоєння елементів з феросплавів був високим та стабільним. Низьке засвоєння елементів феросплавів, зазвичай, пов'язане з технологією їх введення, меншою ніж у сталі густиною та деколи вищою температурою плавлення. Збільшити ступінь їх засвоєння можливо при використанні технологій введення феросплавів вглиб рідкого розплаву. На практиці для цих цілей використовують феросплави фракцією до 3,0 мм, які вводять у вигляді дроту або у струмені газу-носія.

З теорії та практики продувки металу порошками [1] відомо, що частинки, які вдуваються в метал, можна розділити на дві групи. Перші, маючи достатню швидкість, заглиблюються в метал на глибину, що перевищує діаметр частинки. Інші частки флютуються бульбашками газу-носія (аргону) чи знаходяться у їх об'ємі. Подальша поведінка цих часток різна і залежить від швидкості їхнього нагріву.

У процесі руху частка феросплаву нагрівається до температури плавлення, плавиться та розчиняється у навколишньому середовищі. Кожна з цих стадій характеризується певними інтервалами часу та залежить від багатьох факторів, наприклад,

від фракції часточки та від швидкості руху металу.

Для оцінки ефективності процесу інжекції порошкоподібних реагентів тобто, що введений реагент буде розплавлений у об'ємі рідкої ванни без ризику спливання на поверхню металу і контакту його з киснем атмосфери, необхідно дослідити тривалість плавлення часточки від її розміру та швидкості розплаву.

У роботі [2] на основі математичного моделювання було розроблено метод розрахунку швидкості плавлення феросплаву. У роботі [3,4] автори моделювали процес плавлення феросплавів, що містять хром, у залізвуглецевому розплаві. У роботі [5] було розроблено математичну модель процесів плавлення тугоплавких кускових добавок на межі розділу фаз «шлак-метал» та її випробування з метою оцінки тривалості плавлення таких добавок залежно від технологічних чинників. У роботі [6] запропоновано методику математичного моделювання температурного стану теплофізичної системи «частка-розплав» із фазовими переходами типу плавлення-тверднення. У роботі [7] описана математична модель та метод визначення тривалості плавлення феросиліцію різних марок (ФС25, ФС45 та ФС75) у залізвуглецевому розплаві. Але всі розглянуті математичні моделі плавлення феросплаву виконувались без урахування руху розплаву металу. Також слід зазначити, що питання вводу феросплавів інжекцією, особливо феромарганцю, при розкисленні низьковуглецевих сталей є недостатньо дослідженими.

Метою роботи є вивчення впливу інтенсивності руху розплаву на процес нагрівання та плавлення частки феромарганцю, що вводиться в струмені газу-носія.

Для створення математичної моделі прийнято такі припущення:

часточка феромарганцю має сферичну форму;

процесом «намерзання» та розплавлення скоринки можна знехтувати через відносно невеликий час протікання цих процесів;

тепло всередині КТ поширюється лише за рахунок теплопровідності, не враховується вплив вимушеної та вільної конвекції;

теплофізичні властивості твердої і рідкої фази тіла є сталими;

при взаємодії феромарганцю з розплавом не виділяється та не поглинається тепло.

Процес взаємодії КТ феромарганцю з розплавом, що рухається, представлений на рис.1. Приймаємо, що видалення рідкої фази ФМн відбувається в міру його розплавлення.

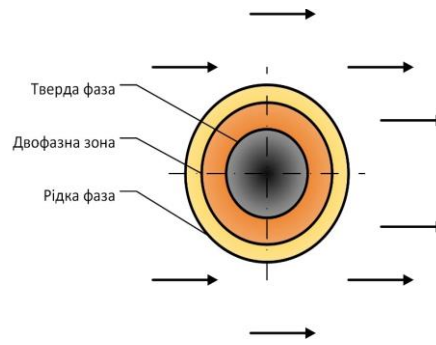


Рис. 1. Нагрів та плавлення КТ феромарганцю при обтіканні рідкою сталлю

Розв'язання задачі плавлення частки феромарганцю за умови безперервного видалення розплавленої рідкої фази з її поверхні умовно поділяється на періоди нагрівання і розплавлення, які може проходити за різних граничних умов.

Теоретичні методи вирішення завдань ґрунтуються на використанні диференціального рівняння теплопровідності [8]. У декартовій системі координат для тривимірного температурного поля диференціальне рівняння теплопровідності має вигляд:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \left(\frac{d^2t}{dx^2} + \frac{d^2t}{dy^2} + \frac{d^2t}{dz^2} \right), \quad (1)$$

де $t = f(x, y, z, \tau)$ – шукане температурне поле тіла, що нагрівається;

$a = \frac{\lambda}{\rho c}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $\text{м}^2/\text{с}$.

При виведенні цього диференціального рівняння теплопровідності прийнято такі припущення:

тіло однорідне та ізотропне;

фізичні параметри (коефіцієнт теплопровідності λ , питома теплоємність c , щільність ρ) є сталими;

внутрішні джерела тепла в тілі відсутні.

При розв'язанні задачі нагрівання частки феромарганцю металевим розплавом, теплопровідність частинки можна прийняти ідеальною ($\lambda_{\text{ФМн}} = \infty$). Відсутність теплового опору усуває різницю температур в об'ємі тіла $\frac{dt}{dx} = 0$, $\frac{dt}{dy} = 0$,

$$\frac{dt}{dz} = 0, \quad t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}} = 0.$$

Таким чином, температура тіла не залежить від просторових координат x, y, z і є функцією лише однієї змінної – часу τ , тобто $t = f(\tau)$. Цим і пояснюється спрощення математичного опису.

Диференціальне рівняння має безліч розв'язків. Щоб з безлічі цих рішень виділити одне і дати йому повний математичний опис, до диференціального рівняння теплопровідності необхідно додати умови однозначності, які містять геометричні, фізичні, початкові і граничні умови.

На практиці для вирішення задачі застосовують граничну умову нагріву третього роду. В цьому випадку задається температурний режим джерела тепла $t_{\text{еф}}$ (температура рідкої сталі) у часі $t_{\text{еф}} = f(\tau)$. Додатково до цього задається умова теплопередачі від джерела тепла до поверхні тіла, що

нагрівається (часточки феросплаву). Також задається закон теплопередачі $q_m = f(t_{\text{еф}}, t)$.

Наприклад, при нагріванні тіла за умови $t_{\text{еф}} = \text{const}$ і теплопередачі конвекцією за законом $q_{\text{пов}} = \alpha(t_{\text{еф}} - t_{\text{пов}})$ можна записати:

$$t_{\text{еф}} = \text{const}; -\lambda \frac{dt}{dx} \Big|_{x=\pm R} = \pm \alpha(t_{\text{еф}} - t_{\text{пов}}).$$

Приймаємо, що теплопровідність часточки феромарганцю ідеальна, а нагрівання відбувається за умови $t_{\text{еф}} = \text{const}$. Для наочного уявлення ходу процесу нагріву використовують дві температурні та одну теплову діаграми введені в практику професором І.Д. Семікінін [9,10], сенс якої полягає в наступному. В початковий момент різниці температур джерела тепла $t_{\text{эф}}$ і тіла t , що нагрівається, має максимальне значення. Це зумовлює максимальну густину теплового потоку до тіла $q_{\text{п.н.}}$, велику швидкість нагрівання C_H і швидке підвищення температури тіла. Далі по ходу процесу різниці температур зменшується і підвищення температури тіла сповільнюється. Тіло нагрівається тепловим потоком, що зменшується. Нагрів тіла відбувається зі швидкістю, що сповільнюється, і за рівні проміжки часу на початку нагрівання температура збільшується на більшу величину, ніж наприкінці. Температура тіла змінюється за опуклою кривою, асимптотично наближаючись до температури $t_{\text{эф}}$.

Розв'язання задачі з нагрівання часточки феромарганцю з урахуванням вище викладених припущень полягає у складанні диференціального рівняння нагріву. За час нагрівання dt частка феромарганцю одержує від металу тепло у кількості $dQ = q_m \cdot F_H \cdot d$, яке витрачається на збільшення ентальпії (тепловмісту) частки $dI = MCdt$. Тому $dQ = dI$. Звідси отримуємо:

$$d\tau = \frac{MC}{q_m F_H} dt, \quad (2)$$

де $q_{\text{пов}}$ – щільність теплового потоку, що проходить через поверхню тіла у Вт/м^2 ;

F_H – площа поверхні нагріву, м^2 ;

M – маса тіла, що нагрівається, кг ;

C – питома теплоємність матеріалу тіла, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

У цьому диференціальному рівнянні три змінні τ , q_m , t . Тому для вирішення цього рівняння одну з них потрібно виразити через дві інші. Для граничного умови третього роду, як було сказано раніше, задається умова теплопередачі від джерела тепла на поверхню тіла, що нагрівається. обов'язково задається закон теплопередачі $q_m = f(t_{\text{еф}}, t)$.

Приймаємо, що передача тепла здійснюється конвекцією за законом $q_{\text{пов}} = \alpha(t_{\text{еф}} - t_{\text{пов}})$, тоді рівняння (1) набуває вигляду:

$$d\tau = \frac{MC}{\alpha F_H} \cdot \frac{dt}{t_{\text{еф}} - t}, \quad (3)$$

В теорії нагрівання коефіцієнт теплопередачі α враховує передачу тепла і випромінюванням, і конвекцією, та приймається сталим ($\alpha = \text{const}$) і тому після інтегрування отримуємо:

$$\tau = \frac{MC}{\alpha F_H} \cdot \ln \frac{t_{\text{еф}} - t_{\text{поч}}}{t_{\text{еф}} - t_{\text{кін}}} = \frac{RC\rho}{\alpha K_3} \cdot \ln \frac{t_{\text{еф}} - t_{\text{поч}}}{t_{\text{еф}} - t_{\text{кін}}}, \quad (4)$$

де K_3 – коефіцієнт масового навантаження, що залежить від форми тіла, і для кулі $K_3 = 3$;

α – коефіцієнт тепловіддачі, у випадку відомої швидкості руху часточки у потоці сталі, розраховується з числа Нуссельта.

Коефіцієнт тепловіддачі для одиночної кулі визначається за емпіричною формулою [11]:

$$Nu_1 = 2 + 0,03Pr^{0,33} \cdot Re^{0,51} + 0,35Pr^{0,35} \cdot Re^{0,58} \quad (5)$$

Числа Нуссельта, Рейнольдса і Прандтля:

$$Nu = \frac{2 \cdot r_q \cdot \alpha}{\lambda_{cm}} \quad Re = \frac{2 \cdot r_q \cdot W_{cm}}{v_{cm}} \quad Pr = \frac{v_{cm} \cdot C_{cm} \cdot \rho_{cm}}{\lambda_{cm}}$$

де λ_{cm} – коефіцієнт теплопровідності рідкої сталі, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$;

ρ_{cm} – густина рідкої сталі, кг/м^3 ;

v_{cm} – коефіцієнт кінематичної в'язкості сталі, $\text{м}^2/\text{с}$;

C_{cm} – питома теплоємність рідкої сталі $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$;

r_q – радіус часточки, м ;

W_{cm} – швидкість руху сталі у зоні введення часточки розраховується за емпіричною формулою [1]:

$$W_{cm} = 3,1 \cdot 10^3 \left(\frac{\rho_{сум} V_M}{\rho_M h_\phi^3} \right)^{0,121} Re^{0,242} Ar^{-0,667}, \quad (6)$$

де $Re = \frac{w_{стр1} d_\phi}{\nu}$ – аналог критерію Рейнольдса;

$$Re_{20} = \frac{80 \cdot 0,02}{8,57 \cdot 10^{-7}} = 1866978,$$

$w_{стр1}$ – середня швидкість газо-порошкового струменя, м/с ;

h_ϕ і d_ϕ – відповідно глибина занурення фурми та діаметр сопла, м ;

m – маса металу, кг ;

$Ar = \frac{g(\rho_M - \rho_{сум})V_M}{\rho_M \nu^2}$ – критерій Архімеда;

$$Ar_{50} = \frac{9,81 \cdot (7000,0 - 11,74) \cdot 7,143}{7000,00 \cdot (8,57 \cdot 10^{-7})^2} = 8162815,$$

V_M – об'єм металу в ковші ємністю 50 т, що дорівнює $V_M = \frac{50000}{7000} = 7,143 \text{ м}^3$.

$\rho_{сум}$ – густина газо-порошкової суміші, яка розраховується за формулою:

$$\rho_{сум} = \frac{\rho_r + C}{1 + \frac{C}{\rho_{п}}};$$

де: ρ_r – густина аргону – $1,754 \text{ кг/м}^3$;

C – концентрація порошку в газо-порошкової суміші – $10\text{-}100 \text{ кг/м}^3$;

$\rho_{п}$ – густина порошку феромарганцю 6970 кг/м^3 .

Використовуючи формулу (6), можна розрахувати середню за об'ємом ванни швидкість руху металу для ковшів різної ємності та різних параметрів обробки.

Для розрахунку швидкості руху металу наводимо такі вихідні дані:

концентрація порошку в газо-порошковій суміші – $10\text{-}100 \text{ кг/м}^3$;

швидкість витікання газо-порошкового струменя – $50\text{-}80 \text{ м/с}$;

глибина занурення фурми – $1\text{-}5 \text{ м}$;

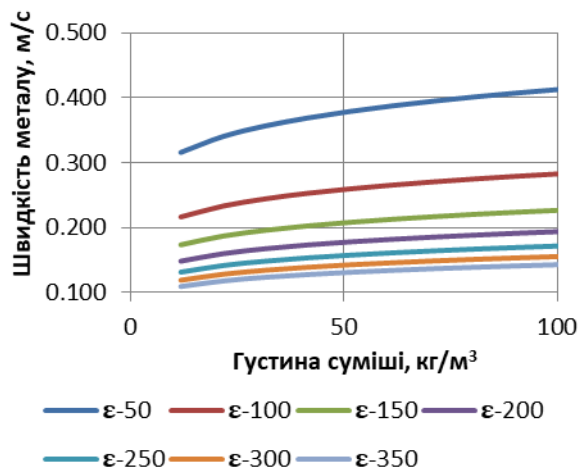
діаметр фурми – $15, 20, 25, 32, 40, 50 \text{ мм}$;

маса сталі в сталерозливному ковші – $50\text{-}350 \text{ т}$.

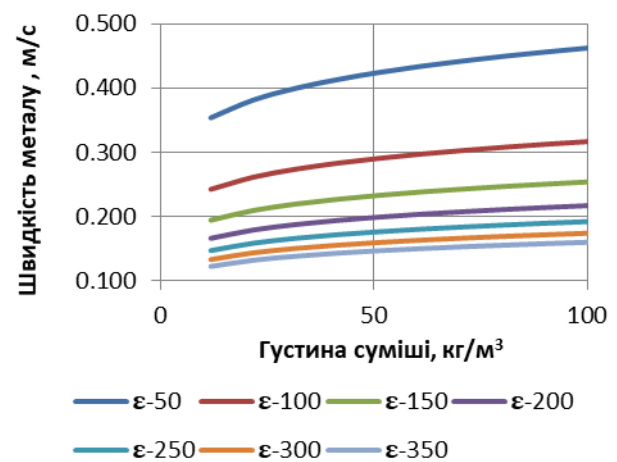
коефіцієнт кінематичної в'язкості рідкої сталі $\nu = 8,57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Швидкість руху металу при продуванні його газо-порошковим струменем залежно від обсягу ме-

талу в ковші та критерію Рейнольдса наведено на рис. 2.



а)



б)

Рисунок 2. Швидкість руху металу при продуванні його газо-порошковим струменем залежно від обсягу металу в ковші та критерію Рейнольдса: а) при $Re=1866978$, $d_{\phi}=20 \text{ мм}$ та $W_{cnp1}=80 \text{ м/с}$; б) при $Re=2987164,527$, $d_{\phi}=32 \text{ мм}$ та $W_{cnp1}=80 \text{ м/с}$.

Аналіз рис. 2 показав, що швидкість руху металу зменшується зі збільшенням його об'єму. Зокрема, при продуванні металу в ковші ємністю 50 т газо-порошковою сумішшю густиною $11,74 \text{ кг/м}^3$ зі швидкістю 80 м/с через фурму діаметром 20 мм , швидкість руху металу складає $0,316 \text{ м/с}$, що на $0,207 \text{ м/с}$ менше швидкості металу в 350 т ковші. Слід також відзначити, що зі збільшенням діаметра сопла фури до 32 мм швидкість руху металу за сталих параметрів газо-порошкової суміші (густина суміші та її швидкість) збільшується на $0,038 \text{ м/с}$ і $0,013 \text{ м/с}$ відповідно при обробці металу в ковшах ємністю 50 т і 350 т . Ця обставина вказує на те, що критерій Рейнольдса, так само як і критерій Архімеда, має значний вплив на динаміку взаємодії газо-порошкового струменя і металу.

Процес розплавлення твердої частки феромарганцю в рідкому металевому розплаві досліджувався методом математичного моделювання з урахуванням його обтікання рідким металом зі швидкістю $W_{ct} = 0,1-0,5 \text{ м/с}$ (дані прийняті з викладених вище розрахунків) і температурою $1600 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Вивчався тепловий стан феромарганцю, процес його нагрівання та плавлення при заданих технологічних параметрах та теплофізичних властивостей феромарганцю [12, 13] та сталі [14].

Вихідні дані під час моделювання процесу взаємодії ФМн75 з рідким розплавом металу.

I Технологічні та геометричні параметри процесу:

еквівалентний діаметр КТ феромарганцю $d=0,5-3 \text{ мм}$;

температура рідкої сталі $t_{cm}=1600 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

початкова температура феромарганцю $t_{FeMn}=20 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

швидкість руху сталі поблизу КТ $W_{cm}=0,1-0,5 \text{ м/с}$.

II Теплофізичні властивості феромарганцю: середній хімічний склад: $7,0\% \text{ С}$, $70,0\% \text{ Мн}$, $6,0\% \text{ Si}$, $0,03\% \text{ S}$, $0,03\% \text{ P}$;

густина рідкого феромарганцю $\rho^{pid}_{FeMn} = 6372 \text{ кг/м}^3$;

густина твердого феромарганцю $\rho^{mb}_{FeMn} = 6970 \text{ кг/м}^3$;

питома теплоємність рідкого феромарганцю $c^{pid}_{FeMn} = 747 \text{ Дж/(кг К)}$;

питома теплоємність твердого феромарганцю $c^{mb}_{FeMn} = 651 \text{ Дж/(кг К)}$;

коефіцієнт теплопровідності рідкого феромарганцю $\lambda^{pid}_{FeMn} = 24 \text{ Вт/(м К)}$;

коефіцієнт теплопровідності затверділого феромарганцю $\lambda^{mb}_{FeMn} = 20 \text{ Вт/(м К)}$;

теплота плавлення феромарганцю $L_{FeMn} = 286 \text{ кДж/кг}$.

III Теплофізичні властивості рідкої сталі:

температура ліквідус ($[C] < 0,1\%$), $t_{cm-l-c} = 1530 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

густина рідкої сталі $\rho^{pid}_{cm} = 7000 \text{ кг/м}^3$;

питома теплоємність рідкої сталі $c^{pid}_{cm} = 653,172 \text{ Дж/(кг К)}$;

коефіцієнт теплопровідності рідкої сталі $\lambda^{pid}_{cm} = 46,5 \text{ Вт/(м К)}$;

коефіцієнт кінематичної в'язкості рідкої сталі $\nu = 8,57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$;

Розв'язання задачі плавлення часточки феромарганцю можна розглядати як аналог плавлення тіла, рівномірно прогрітого до температури плавлення з безперервним видаленням розплаву. Для вирішення цієї задачі був застосований метод температурних та теплових діаграм процесу нагрівання та плавлення тіла з ідеальною теплопровід-

ністю ($\lambda = \infty$) та постійним тепловим потоком ($q_{\text{пов.о}} = \text{const}$) [8].

Для довільного часу, виходячи з фізичного сенсу теплової діаграми, можна записати

$$q_{\text{пов.о}} F dt = L_{\text{пл}} dM. \quad (7)$$

Ліва частина цього рівняння є елементарна площа теплової діаграми за час dt , що представляє прихід тепла від джерела тепла в тіло, що плавиться за dt . Це тепло витрачається на розплавлення елементарного шару тіла масою dM та товщиною ds . Маса елементарного шару для всіх трьох форм тіла дорівнює:

$$dM = F \rho ds, \quad (8)$$

де F – поточна поверхня тіла, що плавиться, яка є змінною для криволінійних тіл, зокрема й кулі.

З рівнянь (7) та (8) отримуємо:

$$ds = \frac{q_{\text{пов.о}}}{L_{\text{пл}} \rho} d\tau. \quad (9)$$

Розв'язання цього рівняння для товщини проплавленого шару буде:

$$S = \frac{q_{\text{пов.о}}}{L_{\text{пл}} \rho} \tau. \quad (10)$$

Наприкінці плавлення при $\tau = \tau_{\text{пл}}$, товщина $s = R$:

$$R = \frac{q_{\text{пов.о}}}{L_{\text{пл}} \rho} \tau_{\text{пл}} \text{ або } \tau_{\text{пл}} = \frac{L_{\text{пл}} \rho R}{q_{\text{пов.о}}}. \quad (11)$$

Рішення (11) для тривалості плавлення $\tau_{\text{пл}}$ нагадує формулу теплової діаграми для часу нагрівання за умови $q_{\text{пов.о}} = \text{const}$, тільки в чисельнику замість збільшення питомої теплоємності Δi стоїть теплота плавлення $L_{\text{пл}}$, і в знаменнику відсутній коефіцієнт форми K_1 що говорить про те, що тривалість плавлення залежить від форми тіла.

Враховуючи, що поточна координата межі плавлення $x = \varepsilon(\tau) = R - s(\tau)$, отримаємо закон руху у часі межі плавлення:

$$\varepsilon(\tau) = R - \frac{q_{\text{пов.о}}}{L_{\text{пл}} \rho} \tau. \quad (12)$$

З урахуванням (11), маємо:

$$\varepsilon(\tau) = R \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{\text{пл}}} \right). \quad (13)$$

Таким чином, координата фронту плавлення у часі змінюється лінійно. З викладеного вище впливає, що розв'язання задачі за тривалістю нагрівання та плавлення частинок феромарганцю, за прийнятих певних умов, у нашому випадку – ідеально теплопровідністю та постійним тепловим потоком, зводиться до визначення:

теплогового потоку від рідкого металу до часточки феромарганцю за формулою: $q_{\text{м}} = \alpha(t_{\text{эф}} - t)$;

коефіцієнта теплопередачі від рідкого металу до частки феромарганцю за формулою (5);

тривалості нагрівання частки феромарганцю за формулою (4);

тривалості плавлення частки феромарганцю за формулою (11);

тривалості сумарного часу нагріву та плавлення частки феромарганцю за формулою: $\tau_{\text{загал}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{пл}}$.

Результати розрахунку тривалості нагріву та плавлення часток феромарганцю наведено на рисунках 3.

З графіків на рисунку 3 можна зробити наступні висновки:

зі збільшенням швидкості руху металу, тривалість нагрівання та плавлення часточок феромарганцю знижується, що пояснюється збільшенням коефіцієнта теплопередачі та щільністю теплового потоку від рідкого металу до часточки феромарганцю;

мінімальна тривалість нагріву та плавлення часточки відзначена фракції 0,5 мм, що так само пов'язано з максимальним значенням коефіцієнта теплопередачі та максимальною щільністю теплового потоку;

зі збільшенням розміру часточки феромарганцю тривалість її нагрівання та плавлення збільшується. Тривалість нагріву та плавлення часточки фракцією 0,5 мм, при швидкості руху металу 0,1 м/с, складає близько 4 мс та 13 мс відповідно, що на 82 мс та 250 мс менше тривалості нагрівання та плавлення частинки діаметром 3,0 мм. Збільшення швидкості руху металу до 0,5 м/с сприяє зниженню тривалості нагріву та плавлення в 1,7 рази для часточки фракцією 0,5 мм та в 2,07 рази для часточки фракцією 3,0 мм;

сумарна максимальна та мінімальна тривалість нагрівання та плавлення часточки феромарганцю в залежності від її фракції складала: 18 та 10 мс для фракції 0,5 мм при швидкості руху металу 0,1 та 0,5 м/с відповідно; 350 та 169 мс для фракції 3,0 мм при швидкості руху металу 0,1 та 0,5 м/с відповідно.

Таким чином з викладеного вище впливає, що на тривалість нагрівання та плавлення часточки феромарганцю істотно впливає її фракція і швидкість руху металу. Більш раціонально вводити в глиб розплаву частинки фракцією 0,5 мм, ніж 3,0 мм оскільки тоді коефіцієнт теплопередачі і тепловий потік від рідкого металу до часточки приблизно втричі вище, що призводить до швидшого нагрівання і плавлення і сприяє швидкому її засвоєнню. Однак, слід зазначити, що максимальна тривалість нагріву і плавлення часточки фракцією 3,0 мм, що вводяться в струмені газу-носія, складала 350 мс, що менше однієї секунди. А якщо врахувати, що швидкість спливання часточки феромарганцю дорівнює швидкості металу в зоні продувки (розрахована швидкість 0,78 м/с при витраті газу 60 м³/год), то час спливання частинки складе 1,28 с для рівня металу 1 м або 6,4 с – для 5 м.

Звідси впливає, що введення часточок феромарганцю фракцією від 0,5 до 3,0 мм у глиб металу в струмені газу-носія сприяє їх розплавленню в об'ємі рідкого металу без ризику спливання на його поверхню та контакту їх з атмосферним киснем, сприяючи їх повному засвоєнню.

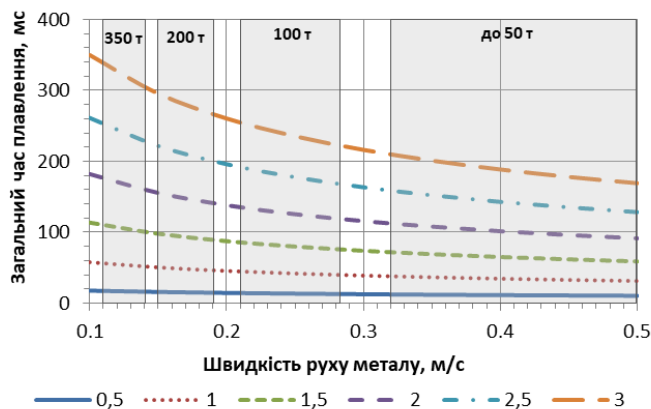
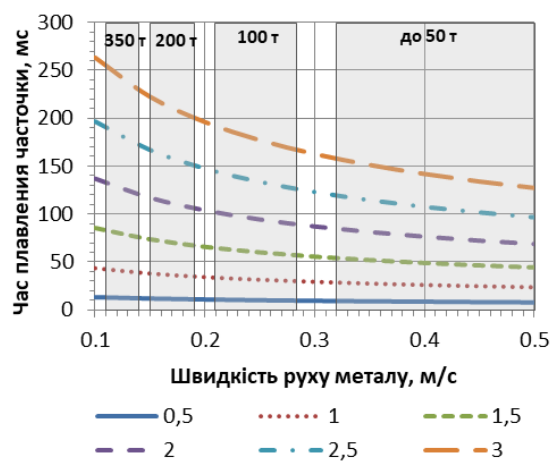
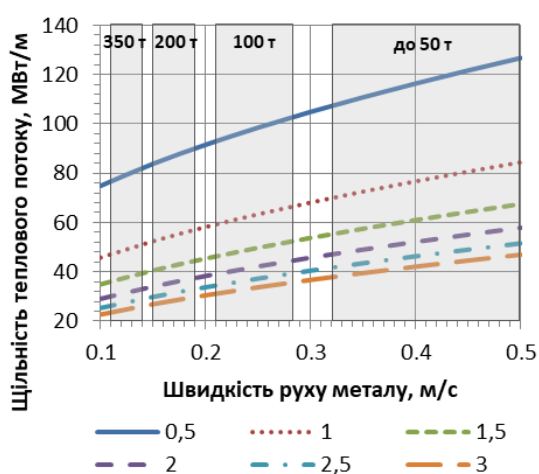
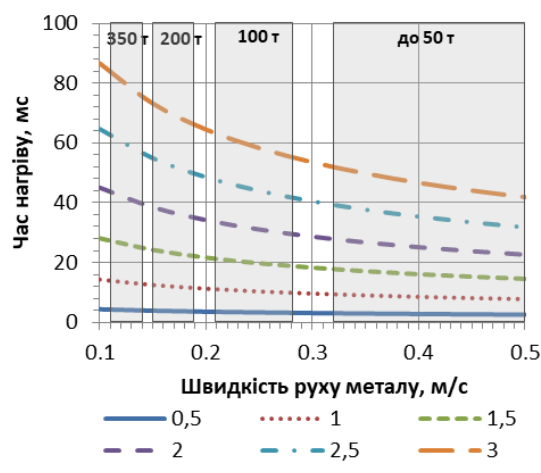
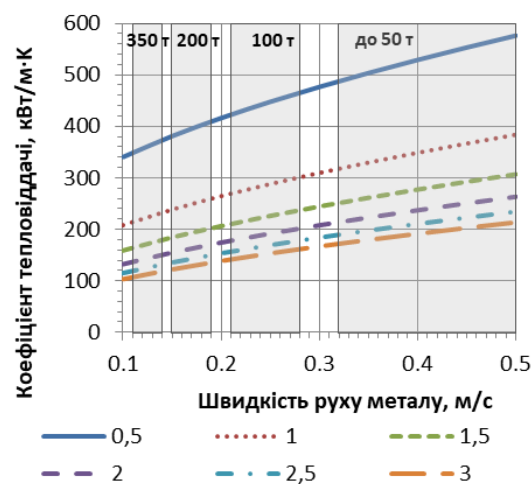


Рисунок №3 Результати розрахунку тривалості плавлення для різної фракції порошку (цифри у легенді під графіками, мм) та швидкості руху металу (сірі поля відповідають ковшам різної ємності): а) коефіцієнт тепловіддачі від металу до частки; б) час нагрівання частки; в) щільність теплового потоку; г) час плавлення частки; д) загальний час нагрівання та плавлення частки

Бібліографічний опис

1. Сидоренко М.Ф. Теория и практика продувки металла порошками. 2-е издание / М.Ф. Сидоренко – М.: «Металлургия», 1978. – 232 с.
2. Болотов Б.В. Математическое моделирование процесса плавления ферросплавов в сталеразливочном ковше / Б.В. Болотов, А.М. Бигеев, Д.Х. Девятов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1983. – №10. – С. 156-157.

3. Лозовая Е.Ю. Математическое моделирование процесса плавления ферросплавов в железоуглеродистом расплаве / Е.Ю. Лозовая, В.И. Жучков, О.Ю. Шешуков // Труды 2-й Всероссийской научно-практической конференции «Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии» / под общ. ред. С.П. Мочалова. Новокузнецк, 2006. – С. 77-85.
4. Жучков В.И. Математическое моделирование процесса плавления хромосодержащих ферросплавов в железоуглеродистом расплаве / В.И. Жучков, Н.А. Андреев, Е.Ю. Лозовая // Расплавы. – 2015. – №3. – С. 19-26.
5. Разработка моделей и исследование процессов плавления тугоплавких добавок на границе раздела фаз / И.А. Павлюченков, В.П. Пиптюк, М.В. Бабенко и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Днепропетровск, 2009. – Вып. 20. – С.100-113.
6. Соколовская Л.А. Использование математического моделирования при исследовании теплофизических процессов взаимодействия расплава с твердыми добавками / Л.А. Соколовская, В.П. Осипов, В.А. Малышев // Процессы литья. – 2000. – №4. – С.72-78.
7. Изучение влияния технологических факторов на время плавления кремнистых ферросплавов в жидком металле / Е.Ю. Лозовая, А.В. Некрасов, В.И. Жучков и др. // Расплавы. – 2001. – №3. – С.10-17.
8. Румянцев В.Д. Теория тепло- и массообмена: Учебное пособие. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 532 с.
9. Металлургические печи. Ч.I / Под ред. М.А. Глинкова – М.: Металлургия, 1964. – 440 с.
10. Свинолобов Н.П. Инженерная модель в теории теплопроводности в трактовке И.Д. Семикина // Металлургическая теплотехника. Сб. науч. трудов ГМетАУ (Энергетика. Металлургия). В 2-х томах. Т.2 – Днепропетровск: ГМетАУ, 1999. – С. 226-235.
11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
12. Физико-химическая оценка свойств промышленных ферросплавов / В.П. Пиптюк, А.Ф. Петров, С.В. Греков и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. трудов. Днепропетровск, 2007. – Вып. 14. – С. 235-243.
13. ДСТУ 3547-97. Феромарганец Загальні технічні умови.
14. Физико-химические основы металлургических процессов / А.А. Жуховицкий, Д.К. Белашенко, Б.С. Бокштейн и др. – М.: Металлургия, 1973. – 392 с.

Reference

1. Sydorenko M.F. Teoriya y praktyka produvky metalla poroshkamy. 2-e yzdanye / M.F. Sydorenko – М.: «Metallurhyya», 1978. – 232 s.
2. Bolotov B.V. Matematycheskoe modelyrovanye protsessa plavleniya ferrosplavov v staleraz-lyvochnom kovshe / B.V. Bolotov, A.M. Byheev, D.Kh. Deviatov // Yzv. vuzov. Chernaia metallurhyya. – 1983. – №10. – S. 156-157.
3. Lozovaia E.Iu. Matematycheskoe modelyrovanye protsessa plavleniya ferrosplavov v zhelezou-hlerodystom rasplave / E.Iu. Lozovaia, V.Y. Zhuchkov, O.Iu. Sheshukov // Труды 2-й Vserossyiskoi nauchno-praktycheskoi konferentsyy «Modelyrovanye, prohrammnoe obespechenye y naukoemkyye tekhnolohyy v metallurhyy» / pod obshch. red. S.P. Mochalova. Novokuznetsk, 2006. – S. 77-85.
4. Zhuchkov V.Y. Matematycheskoe modelyrovanye protsessa plavleniya khromsoderzhashchykh ferrosplavov v zhelezouhlerodystom rasplave / V.Y. Zhuchkov, N.A. Andreev, E.Iu. Lozovaia // Rasplavy. – 2015. – №3. – S. 19-26.
5. Razrabotka modelei yysledovanye protsessov plavleniya tuhoplavkykh dobavok na hranytse razdela faz / Y.A. Paviuchenkov, V.P. Pyptiuk, M.V. Babenko y dr. // Fundamentalnye ypryk-ladnye problemy chernoii metallurhyy. Dnepropetrovsk, 2009. – Вып. 20. – S.100-113.
6. Sokolovskaia L.A. Yspolzovanye matematycheskoho modelyrovanya pry yssledovanny teplo-fyzycheskykh protsessov vzaymodeistviya rasplava s tverdymy dobavkamy / L.A. Sokolovskaia, V.P. Osypov, V.A. Malyshev // Protsessy lytia. – 2000. – №4. – S.72-78.
7. Yzuchenye vliyaniya tekhnolohycheskykh faktorov na vremia plavleniya kremnystykh ferrosplavov v zhydkom metalle / E.Iu. Lozovaia, A.V. Nekrasov, V.Y. Zhuchkov y dr. // Rasplavy. – 2001. – №3. – S.10-17.
8. Rumiantsev V.D. Teoriya teplo- y massoobmena: Uchebnoe posobyе. – Dnepropetrovsk: Porohy, 2006. – 532 s.
9. Metallurhycheskye pechy. Ch.I / Pod red. M.A. Hlynkova – М.: Metallurhyya, 1964. – 440 s.
10. Svinolobov N.P. Ynzhenernaia model v teoryy teploprovodnosti v traktovke Y.D. Semykina // Metallurhycheskaia teplotekhnika. Sb. nauch. trudov HMetAU (Enerhetyka. Metallurhyya). V 2-kh tomakh. T.2 – Dnepropetrovsk: HMetAU, 1999. – S. 226-235.
11. Kutateladze S.S. Osnovy teoryy teploobmena / S.S. Kutateladze. – М.: Atomyzdat, 1979. – 416 s.
12. Fyzyko-khymycheskaia otsenka svoistv promyshlennykh ferrosplavov / V.P. Pyptiuk, A.F. Petrov, S.V. Hrekov y dr. // Fundamentalnye ypryk-ladnye problemy chernoii metallurhyy: sb. nauch. trudov. Dnepropetrovsk, 2007. – Вып. 14. – S. 235-243.
13. DSTU 3547-97. Feromarhanets Zahalni tekhnichni umovy.
14. Fyzyko-khymycheskye osnovy metallurhycheskykh protsessov / A.A. Zhukhovyt'skyi, D.K. Belashchenko, B.S. Bokhshtein y dr. – М.: Metallurhyya, 1973. – 392 s.