

УДК 669.18

Д-р техн. наук Нізяєв К. Г., Хотюн В. І., канд. техн. наук Стоянов О. М.

Національна металургійна академія України, м. Дніпро

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ІНЖЕКЦІЇ РОЗКИСЛЮВАЧІВ В КІВШ

**Мета роботи.** Визначення газодинамічних параметрів інжекції порошкоподібних реагентів для забезпечення високопродуктивної роботи пристроїв для вводу порошкових феросплавів углиб металу у сталерозливному ковші.

**Методи дослідження.** Виконано аналітичний огляд літературних джерел, за результатами якого аргументовано підтверджено перевагу інжекції порошкових реагентів у ківші порівняно з традиційними технологіями розкислення і легування. Грунтуючись на відомих математичних моделях, адаптованих до конкретних технологічних умов, було виконано математичне моделювання, що враховує низку важливих для технології параметрів, зокрема ступінь засвоєння порошку та несучу здатність газу-носія.

**Отримані результати.** За результатами математичного моделювання визначені раціональні режими введення в сталерозливний ківші порошкоподібного феромарганцю та розмір його фракції, який водночас забезпечує високий ступінь засвоєння часточок порошку рідким металевим розплавом та запобігає осадженню часточок порошку на стінках газопроводу.

**Наукова новизна.** За результатами математичного моделювання уточнено особливості взаємодії струменю газової суспензії з рідкими металевими розплавами.

**Практична цінність.** Визначені газодинамічні параметри процесу інжекції порошкоподібних феросплавів, які забезпечать високу продуктивність процесів розкислення і легування сталі в сталерозливному ковші, надійну роботу фурм та сопел для введення порошків углиб металу та необхідну, з точки зору кінетики процесу розкислення, взаємодію часточок з металом.

**Ключові слова:** позапічна обробка, сталь, інжекція, розкислення, легування.

### Вступ

Чорна металургія вважається найбільш енергоємною галуззю промисловості. На її потреби витрачається близько 25 % сумарного енергоспоживання промисловості. Найбільш електроємними є виробництво сталі і прокату (близько 20 % від сумарного електроспоживання галузі), а паливоємним – виробництво чавуну (50 % від загальної витрати палива в галузі).

За рівнем енергоефективності виробництва чорних металів Україна відстає від основних країн-виробників, що пояснюється недостатнім використанням сучасної техніки: на морально і фізично застарілому устаткуванні виробляється майже 50 % сталі, чавуну і прокату. На виробництво сталі в Україні витрачається від 660 до 790 кг.п./т, тоді як у закордонних країнах – 548...690 кг.п./т. Кращий закордонний показник енергоемності становить 380...480 кг.п./т, а теоретичний мінімум – 240 кг.п./т. Таким чином металургійна промисловість потребує технологій, які дозволять зменшити енерго- та ресурсоємність виробництва сталі [1].

### Постановка задачі

За останні кілька десятиріч було проведено величезну кількість науково-дослідних робіт, спрямованих на перетворення металургійних технологій [2]. Високі

вимоги споживачів до якості металу змушують металургів усього світу виготовляти сталь, що має вузькі межі коливань хімічного складу і вмісту неметалевих включень. При вирішенні питань підвищення якості сталі вагоме значення мають ковшові процеси, оскільки сьогодні більшість підприємств переносять процеси рафінування і доведення сталі зі сталеплавильних агрегатів на АКОС [3]. Отже правильно організований комплекс позапічних процесів рафінування та доведення дозволяє істотно знизити концентрацію небажаних включень і їх ліквідацію в готовому розплаві, зменшити коливання складу та температури металу, витрату розкислювачів і легувальних добавок.

Однією з найбільш дорогих операцій є процес розкислення і легування сталі. Їх метою є забезпечення найбільш точного хімічного складу сталі. При легуванні прагнуть досягти найбільшого засвоєння елементів, оскільки серед матеріалів, які застосовуються, найбільшою собівартістю відзначаються саме розкислювачі і легуючі. В результаті зниження їх угару усувається перевитрата зазначених матеріалів і зростає економічна ефективність виробництва сталі.

Зважаючи на їх високу вартість актуальним завданням для світової металургії в цілому і вітчизняної зокрема є збільшення ступеня їх засвоєння при введенні в

розплав. Для досягнення поставленої мети необхідно враховувати певні вимоги до металургійних і технологічних процесів [4]. Найефективнішим методом зниження недоцільних витрат матеріалів із високою спорідненістю до кисню є введення їх глибоко в ванну металу при інтенсивному її перемішуванні. В результаті усувається реакція легувальних елементів з пічним шлаком і киснем атмосфери.

### Стан питання

На більшості металургійних підприємств України розкислення сталі здійснюють у ковші при випуску металу із сталеплавильного агрегату. За типовою технологією кускові (10–50 мм) феромарганець, феросиліцій і силікомарганець вводять під час випуску. Для забезпечення рівномірного розподілу елементів в об'ємі ковша використовують енергію спадного струменя. Проте суттєвими недоліками цієї технології є низький ступінь засвоєння корисного елемента феросплавів та неможливість досягнення хімічного складу сталі у вузьких межах.

Оскільки класичний варіант введення феросплавів у ківш має суттєві недоліки, пов'язані з підвищеними витратами дорогих феросплавів, були зівставлені решта способів введення реагентів у розплав, а саме:

- легування з використанням рудних концентратів (пряме легування);
- застосування екзотермічних феросплавів;
- інжекція порошкоподібних матеріалів;
- введення порошкового дроту.

Ефективність способів оцінювалася за вартістю обробки та величиною коефіцієнта засвоєння елемента.

**Легування з використанням рудних концентратів (пряме легування).** В роботах [5, 6] з використанням оксидних матеріалів, що містять марганець, коефіцієнт засвоєння марганцю становив 82...95%. Гарні результати отримані авторами [7] при прямому легуванні сталі ніобієм. Із застосуванням зазначеного способу його засвоєння склало 90%.

Аналіз показує, що при прямому легуванні сталі підвищується ступінь засвоєння легувальних добавок, також це значною мірою підвищує так званий коефіцієнт наскрізного використання елемента, що знижує енергоємність процесу. Однак, такий спосіб введення реагентів передбачає введення елементів у вигляді оксидних з'єднань, що загалом потребує підвищення його питомих витрат, а це в свою чергу збільшує ресурсоємність процесу.

**Застосування екзотермічних феросплавів.** Практичними дослідженнями [8] встановлено, що такий спосіб введення реагентів значно підвищує коефіцієнт засвоєння добавок, а також сприяє зниженню кількості неметалевих включень, а в окремих випадках і перемішуванню металу за рахунок виділення газоподібних продуктів реакцій. Зокрема угар хрому на заводі ім. Ілліча при використанні брикетів екзотермічного ферохрому склав 2...10% і до кінця випуску хром повністю розпо-

ділився в об'ємі металу так само, як і при легуванні ферохромом [9].

За результатами лабораторних досліджень [10], екзотермічні легувальні брикети, які виготовлені з дешевих сплавів хрому і марганцю, що містять кремній, було отримано засвоєння елементів 95% і 90% відповідно. За даними [11] засвоєння ніобію металом з екзотермічного фероніобію досягає 97%.

Проте отримані данні надто сумнівні і викликають багато питань у зв'язку з тим, що у цьому напрямку за останні два десятиліття не було проведено значних досліджень. Також використання цих феросплавів ускладнюється сучасними тенденціями виробництва сталі, частина яких спрямована на зниження пилових викидів в атмосферу та застосуванням установок позаагрегатної обробки, що забезпечують підігрів розплаву у ковші. У зв'язку з цим відпадає потреба у додатковому підігріві розплаву за рахунок екзотермічних реакцій.

Отже, використання екзотермічних феросплавів має перспективи, але особливості їх використання в умовах сучасного виробництва потребують подальших досліджень.

**Інжекція порошкоподібних матеріалів.** Залежно від поставленого завдання, процес вдування може бути використаний для десульфурзації, науглецювання, розкислення, легування, зв'язування азоту тощо. Введення реагентів здійснюється за допомогою заглибної фурми (рідше через шибєрний отвір) в потоці нейтрального газу.

Вдуванням порошків [12,13] дозволяє отримати більш стабільний вміст легувальних і високий ступінь їх засвоєння: алюмінію – 80...90%, бору – 85...93% (при витраті 0,026...0,043 кг/т FeB), селену – 71...77% (0,28...0,44 кг/т FeSe), вуглецю 90...100% (0,4...1,0 кг/т карбонізатору). Вдувають також FeMn, FeSi, FeV, FeTi, FeN.

За результатами вдування вугілля (93% C), в 3-х кілограмовий тигель з рідкою сталлю [14] та в 125 т ківш з витратою 0,4...1,0 кг/т засвоєння вуглецю склало 90...100% проти 60...70%, у випадку присадки в ківш під час випуску. Введений 75% феросиліцій повністю засвоювався розплавом і коефіцієнт його засвоєння був на рівні використання вакуумних установок. При вмісті титану в феротитані 40,6% і його витраті 0,2 кг/т, загальний ступінь засвоєння склав 45...50%.

В цілому, як було зазначено авторами [15], розкислення і легування шляхом вдування порошкоподібних матеріалів показує значні економічні переваги цього способу обробки сталі. До його недоліків можна віднести значні капітальні витрати на основне та допоміжне обладнання, а також можливість закупорювання сопла, що може створити складнощі під час обробки, однак цей недолік можна усунути в результаті підбору оптимальних параметрів процесу вдування порошків.

**Введення порошкового дроту.** Застосування порошкоподібних реагентів в сталевій оболонці широко застосовується на багатьох металургійних підприєм-

ствах України і світу. Порошковий дріт дозволяє вводити в сталь мікролегувальні елементи і одночасно обробляти розплав утвореним при цьому рафінувальним шлаком [16].

Підтвердження ефективності застосування способу наведено в роботі [17]. Для зниження витрати алюмінію в ківш ємністю 10 т вводили дріт діаметром 10 мм, зі швидкістю 1 м/с, до досягнення в готовій сталі 0,02...0,05 %. На підставі 100 експериментальних плавок було встановлено, що такий спосіб введення алюмінію, в порівнянні з присадками кускового, знижує його витрати з 1,5 до 0,9 кг/т.

Ефективність порошкового дроту підтверджено результатами промислових досліджень з мікролегування сталі титаном на ВАТ «Северсталь». Після випуску з 100-т дугової електропечі його вводили в попередньо розкислену сталь, з вмістом Al не менше 0,025 % та швидкістю 60...80 м/хв. Засвоєння титану становило від 80 до 91 %, залежно від концентрації алюмінію в сталі. Таким чином відмова від використання кускового феросплаву і перехід на дріт, наповнений порошкоподібним реагентом, дозволив знизити витрати, пов'язані з феротитаном на \$ 2,06 за 1 т [16].

Застосування порошкового дроту має високі значення ефективності та техніко-економічні показники процесу розкислення та легування, при цьому його реалізація не вимагає складного та дорогого обладнання. Проте широке застосування порошкового дроту обмежується складністю його отримання, що впливає на його вартість [18].

Вибір способу введення порошкових феросплавів у метал (інжекція порошку або у вигляді дроту) залежить від часу і місця обробки сталі, кількості та виду феросплаву, мети обробки. Складність порівняння економічної ефективності цих варіантів технологій полягає в тому, що ці способи використовуються на різних підприємствах в різних країнах.

Однак, як наголошують автори [19], застосування порошкового дроту має і свої недоліки, а саме:

- складність введення великої кількості добавок, особливо в ківш великої місткості. Для введення силікокальцію марки СК30 в кількості 3 кг/т в 350-т ківш було б потрібно приблизно 5 км дроту діаметром 12 мм, що нерентабельно і технічно складно здійснити в зв'язку з необхідністю подачі дроту з декількох бунтів;

- порошковий дріт не придатний для глибокої дефосфорації сталі;

- витрати на обробку 1 т сталі порошковим дротом менші, ніж при вдуванні порошків тільки у разі введення невеликої кількості легувальних елементів, що пов'язано з високою вартістю дроту. За даними фірми «VELCO» (Німеччина), що займається виготовленням інжекційного обладнання, введення одиниці елемента інжекцією порошку в 1,5–2 рази дешевше, ніж дротом.

Виходячи зі складності отримання порошкового дроту, що відповідно позначається і на його вартості, для подальшого дослідження було обрано інжекційний

спосіб, який за своєю ефективністю лише трохи поступається першому. Подібний висновок був зроблений в роботі [20], який підтверджує актуальність обраного способу обробки розплаву.

Мета цієї роботи полягає в теоретичному дослідженні процесів, які протікають під час інжекції порошкоподібних реагентів у сталерозливний ківш, з використанням методів аналізу науково-технічної інформації; інженерних розрахунків, що базуються на фундаментальних закономірностях фізичної хімії, теорії металургійних процесів та металургії сталі; математичному моделюванні.

В роботі пропонується альтернативне застосування технології розкислення металу в сталерозливному ковші кусковими феросплавами, під час випуску, з застосуванням спеціальних пристроїв для інжекції порошкоподібних матеріалів (феромарганець щільністю порошку 6970 кг/м<sup>3</sup>) углиб металу, з метою їх максимального засвоєння розплавом.

### Матеріали і методи

Стабільність процесу інжекції характеризується багатьма факторами, але саме визначення оптимальної фракції часток визначає ефективність процесу.

Значною мірою стабільність ходу продувки залежить від режиму витікання газо-порошкової суміші в об'єм рідкого металу. В роботах [21, 22] зазначається, що бульбашковий режим сприяє виникненню намерзання металу на зрізі сопла, оскільки рідина в проміжках між виходом бульбашок може затікати в сопло. Це пояснюється тим, що в разі інжекції великих часток, що прилягають до поверхневого шару газу, шар останнього є порівняно тонким, тому значна його частка буде вільною. В результаті газ витрачається на утворення бульбашок. У разі дрібних частинок порошку поверхневий шар газу виявляється відносно товстим, через що газовий потік тісніше пов'язаний з частками, що веде до формування контакту рідини з газо-порошковою сумішшю. Таким чином вдування дрібнодисперсних частинок при високій концентрації порошку забезпечує стаціонарний режим струминного витікання, не створюючи умов для зворотної течії рідини в сопло.

Перехід бульбашкового режиму у струминний описується залежністю [22]:

$$C_{cr} = \frac{\pi}{6 \cdot \left( \frac{6}{\sqrt{2 \operatorname{Re}}} + 1 \right)^3}, \quad (1)$$

де  $C_{cr}$  – коефіцієнт аеродинамічного опору.

Число Рейнольдса для часточок розраховується за формулою:

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho_g \cdot d_p \cdot (w_g - w_p)}{v_g}. \quad (2)$$

де  $\rho_g$  – густина газу-носія,  $\text{кг/м}^3$ ;  $d_p$  – діаметр часточок, м;  $w_g$  – швидкість руху газу, м/с;  $w_p$  – швидкість руху порошку відносно трубопроводу, м/с;  $v_g$  – кінематична в'язкість газу,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Визначивши фракційний склад порошку, необхідно встановити умови, які забезпечать занурення часточок у об'єм розплаву. Швидкість витікання газо-порошкового струменя визначає можливість занурення в метал порошку, частки якого повинні подолати сили поверхневого натягу, лобового опору, феростатичного та атмосферного тиску. Часточка вважається заглибленою у метал, якщо вона знижує початкову швидкість після удару від початкової до нуля на відстані, не меншій від власного діаметра від поверхні металу.

Гранично низьку початкову швидкість часточки до зіткнення з поверхнею рідини визначають за формулою [23]:

$$w_b = w_a \sqrt{\frac{2\rho_p + 0,5\rho_m}{\rho_p}}, \quad (3)$$

де  $w_a$  – гранично низька швидкість часточки після удару, м/с;  $\rho_p$  – густина часточки,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_m$  – густина металу,  $\text{кг/м}^3$ .

Гранично низька швидкість часточки після удару, яка дорівнює:

$$w_a = 2 \sqrt{\frac{2\sigma}{d_p \rho_m} \left( e^{\frac{1,5\rho_m}{\rho_p}} - 1 \right)}, \quad (4)$$

де поверхневий натяг ( $\sigma$ ) рідкого металу може бути визначений за математичними моделями [24].

З теорії пневмотранспорту відомо, що для уникнення осадження часток порошку на стінках трубопроводу фактична швидкість газо-порошкового потоку повинна бути більшою за критичну швидкість, тобто виконуватися співвідношення  $w_{cr} < w_r$ .

Швидкість газо-порошкового потоку, за якого відсутнє осадження часточок на стінках трубопроводу, визначається за виразом [25]:

$$w_{cr} = 5,6 d_{tube}^{0,34} d_p^{0,36} \left( \frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{m_p}{m_g} \right)^{0,55}, \quad (5)$$

де  $d_{tube}$  – діаметр каналу, яким транспортується порошок, м;  $m_p$  – масова витрата порошку,  $\text{кг/год}$ ;  $m_g$  – масова витрата газу,  $\text{кг/год}$ .

Фактична швидкість газо-порошкового потоку на виході з живильника:

$$w_r = \frac{m_g \cdot R \cdot T}{3600 \cdot p \cdot 0,758 \cdot d_{tube}^2}. \quad (6)$$

де  $R$  – універсальна газова стала,  $\text{Дж/моль}\cdot\text{К}$ ;  $T$  – температура газу,  $\text{К}$ ;  $p$  – тиск у камерному живильнику,  $\text{Па}$ .

## Результати

Розраховані за формулами (1) та (2) значення критичної об'ємної частки порошку свідчать, що зі збільшенням розміру фракції зростає і критична об'ємна частка порошку, яка буде забезпечувати струминний режим витікання газо-порошкової суміші (рис. 1).

З рисунку 2 видно, що поверхневий натяг розплаву впливає на умови занурення часточки в розплав. Швидкість часточки після проходження крізь поверхню розплаву зменшується на 36,78 % незалежно від розміру часточки, її швидкості та поверхневого натягу розплаву.

Розраховані за формулами (5) та (6) величини складають  $w_{cr} = 22,9$  м/с, а  $w_r = 52,76$  м/с. Отже, при визначених вище параметрах інжекції, осідання реагенту на стінках відбуватися не буде, що виключає можливість забиття каналу трубопроводу.

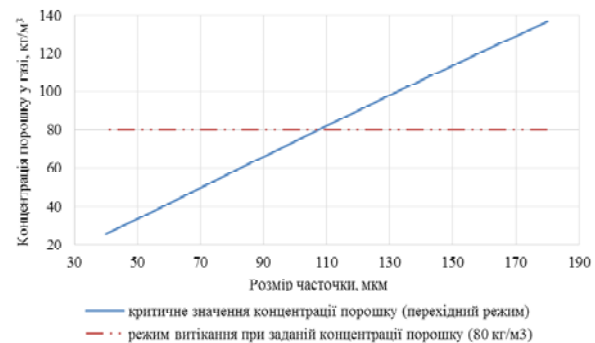


Рис. 1. Зв'язок між критичною об'ємною долею порошку та діаметром фракції на режим витікання суміші

## Обговорення

Межі об'ємної частки порошку, що забезпечують необхідний результат обробки, складають 75–80  $\text{кг/м}^3$  при витраті газу 60  $\text{м}^3/\text{год}$ . Критична об'ємна частка порошку для вказаних умов складає 74  $\text{кг/м}^3$ . Отже, з залежності на рис. 1 витікає, що для інжекції у струминному режимі розмір часточки не повинен перевищувати 100 мкм. Для збільшення максимально допустимої фракції потрібно збільшити об'ємну витрату порошку або застосовувати альтернативний реагент з меншою щільністю.

Відповідно до роботи [23] гранично низька швидкість часточки порошку після занурення, для матеріалу з густиною  $7 \cdot 10^3$   $\text{кг/м}^3$ , діаметром 0,1 мм і поверхневим натягом 1,8 Н/м повинна бути щонайменше 5,6 м/с, розраховане значення складає 8,5 м/с. Отже, при сформованих умовах можна стверджувати, що імпульс часточки достатній для подолання сили поверхневого натягу металу і занурення в метал, не спливши в бульбашці на поверхню металу.

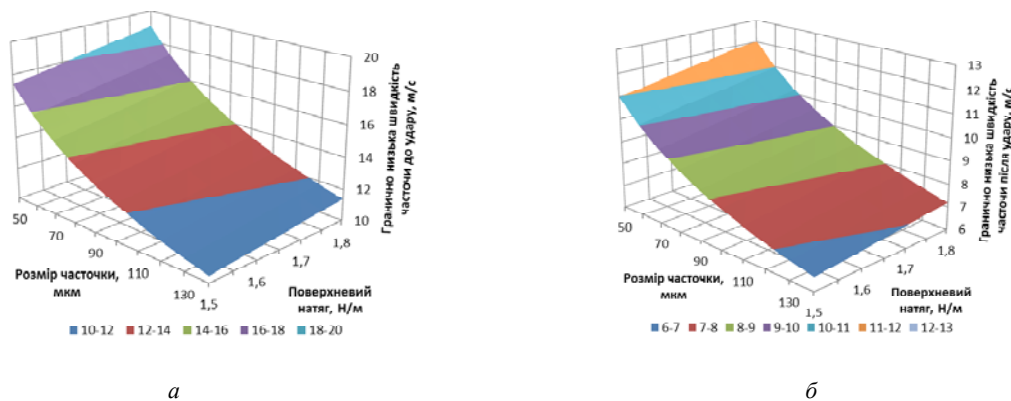


Рис. 2. Гранично низька швидкість часточки порошку до (а) та після (б) занурення у розплав

**Висновки**

Розраховані і уточнені основні газодинамічні параметри процесу інжекції порошкоподібних реагентів, які забезпечать високопродуктивну і надійну роботу пристроїв для введення порошків углиб металу та забезпечать необхідну, з точки зору кінетики процесу розкислення, взаємодію часточок з металом.

Отже, на підставі результатів виконаного теоретичного дослідження та математичного моделювання визначено:

- для інжекції у струминному режимі розмір часточки не повинен перевищувати 100 мкм. Критична об'ємна частка порошку для вказаних умов складає 74 кг/м<sup>3</sup>;
- гранично низька швидкість часточки, яка визначає можливість занурення її у розплав, складає 8,5 м/с проти мінімально необхідної 5,6 м/с;
- критична та фактична швидкості газо-порошкового потоку на виході з живильника складають 22,12 м/с та 52,76 м/с відповідно, що забезпечує умови, за яких на стінках трубопроводу не буде відбуватися осадження часточок порошку.

**Список літератури**

1. Синегін Е. В. Підвищення структурної однорідності безперервно литої заготовки шляхом удосконалення технології використання інокуляторів у кристалізаторі: автореф. дис. на здобуття вченого ступеня канд. техн. наук: 05.16.02 / Синегін Євген Володимирович ; Національна металургійна академія України. – Дніпропетровськ, 2015. – 24 с.
2. Инжекционная металлургия-86. Труды конференции ScanInjectIV. – М. : Металлургия, 1990. –400 с.
3. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали: в 2 ч. Ч.1. Термодинамические и кинетические закономерности / Г. Кнюппель. – М. : Металлургия, 1973. – 312 с.
4. Дуб В. С. Исследование влияние раскисления кремнием и алюминием на свойства высоколегированных сталей аустенитного класса : автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Дуб В.С. – М., 1963. – 31 с.
5. Кологривова Л. Н. Эффективность прямого легирования при производстве кремний марганцовистой стали /

- Л. Н. Кологривова, А. Я. Наконечный, З. П. Трофимова и др. // Металлург. – 1987. – № 5. – С. 18–19.
6. Прямое легирование стали марганцевым агломератом в ковше на выпуске из конвертера / Ю.Н. Носов, В.П. Камшуков, В.В. Соколов и др. // Сталь. – 2004. – № 5. – С. 35–36.
7. А. с. 311977 СССР, МКИ С22С35/00. Экзотермическая смесь для легирования стали и сплавов необием / А. С. Дубровин, Л. В. Слепова, А. П. Бушуев, НИС – металлов Москва. – № 1381915/22 – 2 ; заявл. 03.12.69 ; опубл. 19.08.71
8. Раскисление и легирование стали экзотермическими ферросплавами: Учебник / В.И. Баптизмманский [и др.]. – К. : Техника, 1970. – 180 с.
9. Изготовление экзотермических ферросплавов / Е. И. Исаев и др. // Металлургия и коксохимия. – 1965. – Вып. № 3.
10. Респель К. Н. Экзотермические составы с хромом и марганцем для легирования сталей в ковше / К. Н. Респель, Дубровин А. С. // Сталь. – 1963. – № 4.
11. T. W. Merrall Saving through exothermic, ferrocolumbinm / T.W. Merrall // Jour. of Metals. – 1960. – № 5.
12. Туркдоган Е. Т. Технологические усовершенствования в инъекционной металлургии и в процессах рафинирования металла в ковше в 80-х годах / Е. Т. Туркдоган // Инжекционная металлургия-86. Труды конференции ScanInjectIV. – М. : Металлургия, 1990. – С. 10–44.
13. Хайда О. Достижения ковшевой металлургии в Японии применительно к рафинированию металла вдуванием порошков / О. Хайда, К. Наканиши, Т. Эми // Инжекционная металлургия-80. Труды конференции ScanInjectII. – М. : Металлургия, 1982. – С. 21–38.
14. Абротис Х. Вдувание в металл порошкообразных легирующих / Х. Абротис, Х. – Дж. Лангхаммер // Инжекционная металлургия-80. Труды конференции ScanInjectII. – М. : Металлургия, 1982. –С. 266–276.
15. Эйхингер Ф. Т. Десульфурация стали в ковше при легировании вдуванием легирующих элементов / Ф. Т. Эйхингер, Р. К. Гросс // Инжекционная металлургия-80. Труды конференции ScanInjectII. – М. : Металлургия, 1982. – С. 326–334.
16. Внепечная обработка стали порошковой проволокой : Монография / А. Ф. Каблуковский, С. Д. Зинченк, А. Н. Никулин [и др.]. – М. : Металлургиздат. – 2006. – 288 с.
17. Совершенствование технологии выплавки и раскисления электростали / Е.А. Казачков, А.Д. Чепурной, М. Г.

- Юшкова, М. А. Шумаков // Вісник ПДТУ. – 2006. – Вип. № 16. – С. 1–4.
18. Рябов А. В. Математическое моделирование обработки расплава порошковой проволокой. / А. В. Рябов, Д. В. Неволин, В. И. Потапов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2013. – № 1. – С. 194 – 198
  19. Поволоцкий Д. Я. Внепечная обработка стали : Учебник для вузов. Поволоцкий Д. Я., Кудрин В. А., Вишкарев А. Ф. – М. : МИСИС, 1995. – 256 с.
  20. Харлашин П. С. Разработка рациональной технологии раскисления спокойных марок стали / П. С. Харлашин, О. А. Носенко, А. Н. Яценко // Вісник ПДТУ. – 2011. – Вип. №2. – С. 52–55.
  21. Макналлан М. Гидродинамика затопленных струй / М. Макналлан // Инжекционная металлургия-80. Труды конференции ScanInjectII. – М. : Металлургия, 1982. – С. 114–115.
  22. Айронз Г. А. Научные и практические аспекты конструирования фурм для вдувания порошков / Г. А. Айронз // Инжекционная металлургия-86. Труды конференции ScanInjectIV.– М. : Металлургия, 1990. – С. 44–62.
  23. Сидоренко М. Ф. Теория и практика продувки металла порошками / М. Ф. Сидоренко. – М. : Металлургия, 1978. – 232 с.
  24. Охотский В. Б. Модели металлургических систем В. Б. Охотский. – Днепропетровск : Системные технологии, 2006. – 287 с.
  25. Конструкции и проектирование агрегатов сталеплавильного производства : Учебник / В. П. Григорьев [и др.]. – М. : МИСИС, 1995. – 512 с.

Одержано 25.11.2019

### **Нияев К. Г., Хогюн В. И., Стоянов А. Н. Определение параметров процесса инжекции раскислителей в ковши**

**Цель работы.** *Определение газодинамических параметров инжекции порошкообразных реагентов для обеспечения высокопроизводительной работы устройств ввода порошковых ферросплавов вглубь металла в сталеразливочном ковше.*

**Методы исследования.** *Выполнен аналитический обзор литературных источников, по результатам которого аргументированно подтверждено преимущество инжекции порошковых реагентов в ковши в сравнении с традиционными технологиями раскисления и легирования. Основываясь на известных математических моделях, адаптированных к конкретным технологическим условиям, было выполнено математическое моделирование, которое учитывает ряд важных для технологии параметров, в частности степень усвоения порошка и несущую способность газа-носителя.*

**Полученные результаты.** *По результатам математического моделирования определены рациональные режимы ввода в сталеразливочный ковш порошкообразного ферромарганца и размер его фракции, который одновременно обеспечивает как высокую степень усвоения частичек порошка жидким металлическим расплавом, так и предотвращает осаждение долек порошка на стенках газопровода.*

**Научная новизна.** *По результатам математического моделирования уточнены особенности взаимодействия струи газовой суспензии с жидкими металлическими расплавами.*

**Практическая ценность.** *Определены газодинамические параметры процесса инжекции порошкообразных ферросплавов, которые обеспечивают высокую производительность процессов раскисления и легирования стали в сталеразливочном ковше, надежную работу фурм и сопел для ввода порошков вглубь металла и необходимое, с точки зрения кинетики процесса раскисления, взаимодействие частичек с металлом.*

**Ключевые слова:** *внепечная обработка, сталь, инжекция, раскисление, легирование.*

### **Niziaiev K., Khotiun V., Stoianov O. Determination of process parameters for the injection of deoxidizing agents in a teeming ladle**

**Purpose of work.** *Determination of the gas-dynamic parameters of the injection of powdered reagents to provide high-performance operation of devices for powder ferroalloys injection deep into the metal in a teeming ladle.*

**Research methods.** *An analytical review of literary sources has been carried out, the results of which have arguably confirmed the advantage of the powder reagents injection into the ladle in comparison with traditional deoxidation and alloying technologies. Based on well-known mathematical models adapted to specific technological conditions, mathematical modeling has been carried out, which takes into account a number of parameters important for the technology, in particular, the degree of powder assimilation and the carrying capacity of the carrier gas.*

**Results.** *Based on the results of mathematical modeling, the rational modes of powdered ferromanganese injection into the teeming ladle and the size of its fraction, which provides both a high assimilation degree of powder particles by a liquid metal melt and prevents the deposition of powder particles on the walls of the pipeline have been determined by mathematical modeling.*

**Scientific novelty.** *Based on the results of mathematical modeling, the peculiarities of the interaction of a gas suspension jet with liquid metal melts have been specified.*

**Practical value.** *The gas-dynamic parameters of the process of powdered ferroalloys are determined, which provide high performance of the deoxidation and alloying of steel in the teeming ladle, reliable operation of lances and nozzles for powders injection deep into the metal and interaction of particles with metal, necessary from the point of view of deoxidation kinetics.*

**Key words:** *ladle treatment, steel, injection, deoxidation, alloying.*