

К. Г. Нізяєв /д. т. н./, А. Н. Стоянов /к. т. н./,  
Є. В. Синегін /к. т. н./, В. С. Цибулько

Національна металургійна академія України,  
м. Дніпро, Україна

## Визначення параметрів процесу інжекції розкислювачів в ківш

К. G. Niseyev /Dr. Sci. (Tech.)/,  
A. N. Stoyanov /Cand. Sci. (Tech.)/,  
E. V. Sinegin /Cand. Sci. (Tech.)/, V. C. Tsybulko

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro,  
Ukraine

## Determination of the parameters of the process of inhibitors of fluid extractors in ladle

**Мета.** Визначення режимів вдування порошків феросплавів у струмені інертного газу в ківш, які забезпечать максимальний ступінь їх засвоєння металом.

**Методика.** Дослідження базуються на математичних розрахунках несучої здатності газового потоку для випадку пневмотранспорту порошків феросплавів магістральним газопроводом та умов їх засвоєння розплавом після фізичного проникнення.

**Результати.** Встановлено граничні швидкості та витрати газу-носія, необхідні для транспортування порошку феросплавів із заданою витратою. Для часточок різного розміру визначено гранично низькі швидкості перед та після проникнення в метал, які забезпечують їх повне засвоєння.

**Наукова новизна.** Вперше визначено умови засвоєння металевим розплавом порошків феросплавів різної фракції з урахування поверхневого натягу металевого розплаву.

**Практична значущість.** Запропоновані режими вводу порошкових феросплавів дозволять ефективно утилізувати дрібну фракцію феросплавів та підвищити ступінь засвоєння феросплавів, що загалом приведе до здешевлення процесу розкислення і легування сталі в ковші. (Іл. 2. Бібліогр.: 5 назв.)

**Ключові слова:** розкислення, інжекція, порошки феросплавів, сталь.

**Постановка проблеми.** Суттєвою особливістю багатьох пірометалургійних процесів є вдування легуючих присадок у ванну розплавленого металу. Легування металу вдуванням порошків дозволяє отримати більш стабільний вміст легуючих і високий ступінь їх засвоєння: засвоєння алюмінію складає  $80 \div 90$  %, бору –  $85 \div 93$  % (при витраті  $0,026 \div 0,043$  кг/т FeB), селену –  $71 \div 77$  % ( $0,28 \div 0,44$  кг/т FeSe), вуглецю –  $90 \div 100$  % ( $0,4 \div 1,0$  кг/т карбонізатора) [1].

Таким чином, застосування інжекційних способів обробки для розкислення і легування сталі дозволить регулювати її хімічний склад у більш широкому діапазоні, це надасть можливість без труднощів проводити мікролегування дорогими елементами, забезпечуючи при цьому високий ступінь їх засвоєння, а потоки газу-носія забезпечать більш кращі показники розкислення сталі. Усі ці особливості в поєднанні один з одним дозволять підвищити ефективність процесу та знизити витрати дорогих феросплавів.

**Формулювання мети дослідження.** Стабільність технології інжекції характеризується багатьма факторами, але саме визначення оптимально-

го фракційного складу часток, що інжектуються, визначає ефективність процесу.

Значною мірою стабільність ходу продувки залежить від режиму витікання газо-порошкової суміші в обсяг рідкого металу. У працях [2; 3] зазначається, що бульбашковий режим сприяє виникненню намерзання металу на зрізі каналу витікання газо-порошкової суміші, оскільки рідина в проміжках між виходом бульбашок може затікати в продувну трубку. Це пояснюється тим, що в разі великих часток, що прилягають до поверхневого шару газу, шар останнього порівняно тонкий, тому значна його частка буде вільною. У результаті газ витрачається на утворення бульбашок. У разі дрібних частинок порошку приповерхневий шар газу виявляється відносно товстим, в результаті газовий потік більш тісно пов'язаний з частками, що приводить 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 продувний пристрій.

Методика проведення дослідження. Перехід бульбашкового режиму в струминний описується залежністю [2]:

$$C_{кр} = \frac{\pi}{6 \cdot \left( \frac{6}{\sqrt{2Re_u}} + 1 \right)^3} \quad (1)$$

Число Рейнольдса для часточок, розраховується за формулою:

$$Re_u = \frac{\rho_g \cdot d_u \cdot (u_g - u_u)}{\nu_u} \quad (2)$$

де  $d_u$  – діаметр часточок, м;  $u_g$  – швидкість руху газу, м/с;  $u_u$  – швидкість руху порошку відносно трубопроводу, м/с;  $\nu_u$  – динамічна в’язкість газу Вт/(м·К);

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).

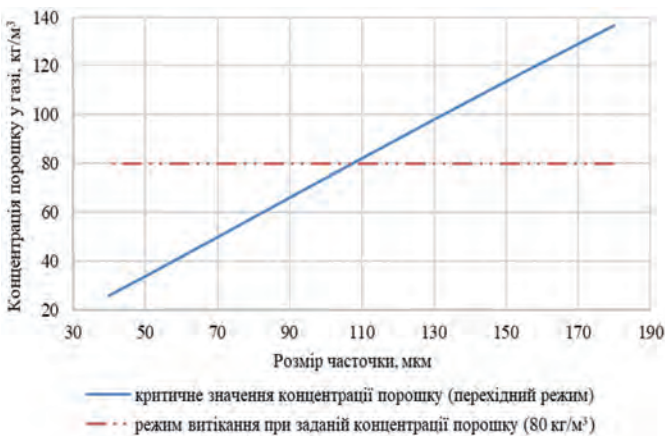


Рис. 1. Зв’язок між критичною об’ємною часткою порошку та діаметром фракції на режим витікання суміші

Межі об’ємної частки порошку, які будуть забезпечувати необхідний результат обробки, складають 75–80 кг/м³, при витраті газу 60 м³/год. Об’ємна критична частка порошку для вказаних умов складає 74 кг/м³. Таким чином, виходячи з даних, зображених на рис. 1, було визначено: для того щоб інжекція відбувалася у струминному режимі, розмір часточки не повинен перевищувати 100 мкм. Щоб підвищити максимально допустиму фракцію, потрібно збільшити об’ємну витрату порошку або застосувати альтернативний реагент з меншою щільністю.

Визначивши фракційний склад порошку, необхідно встановити умови, які забезпечать занурення часточок в об’єм розплаву. Швидкість витікання газо-порошкового струменя визначає можливість занурення в метал порошку, частки якого повинні подолати, у першу чергу, сили

поверхневого натягу, лобового опору, феростатичного та атмосферного тиску. Часточка вважається заглибленою у метал, якщо вона знижує початкову швидкість після удару від початкової  $w_0$  до нуля на відстані не менше свого діаметра від поверхні металу.

Гранично низьку початкову швидкість частки до зіткнення з поверхнею рідини визначають за формулою [3]:

$$w_u = w_1 \sqrt{\frac{2\rho_u + 0,5\rho_M}{\rho_u}}, \text{ м/с} \quad (3)$$

де  $\rho_u, \rho_M$  – щільність часточки і рідкого металу відповідно, кг/м³;  $w_1$  – гранично низька швидкість частки після удару, яка дорівнює:

$$w_1 = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{r_u \rho_M} \left( e^{\frac{1,5\rho_M}{\rho_u}} - 1 \right)}, \text{ м/с}, \quad (4)$$

де  $\sigma$  – поверхневий натяг рідкого металу, що для сталі може бути визначений за математичними моделями [4], Н/м;  $r_u$  – радіус часточки, м.

На рис. 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.

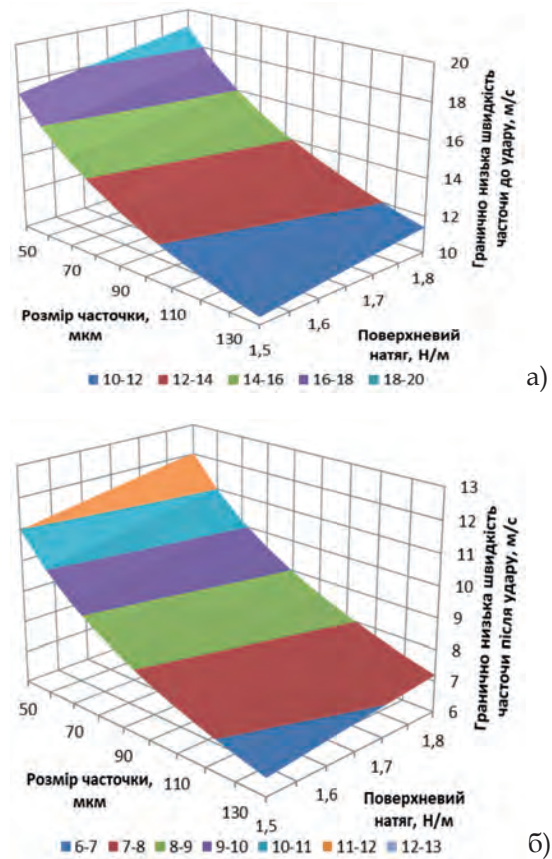


Рис. 2. Гранично низька швидкість часточки порошку до (а) та після (б) занурення у розплав

Відповідно до даних, наведених у [3], гранично низька швидкість часточки порошку після занурення для матеріалу зі щільністю  $7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, діаметром 0,1 мм і поверхневим натягом 1,8 Н/м має бути не менше 5,6 м/с, розраховане значення складає 8,5 м/с. Отже, при сформованих умовах можна стверджувати, що імпульс часточки достатній для того, щоб пробити сили поверхневого натягу металу і зануритися в метал, не спливши в бульбашці на поверхню металу.

З теорії пневмотранспорту відомо: для того щоб не відбувалося осадження часток порошку на стінках трубопроводу, фактична швидкість газо-порошкового потоку має бути більше критичної швидкості, тобто має виконуватися співвідношення  $u_{кр} < u_{ф}$ .

Швидкість газо-порошкового потоку, за якого відсутнє осадження часточок на стінках трубопроводу, визначається за виразом [5]:

$$u_{кр} = 5,6 d_{mp}^{0,34} d_c^{0,36} \left( \frac{\rho_c}{\rho_g} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{m_n}{m_g} \right)^{0,55}, \text{ м/с} \quad (5)$$

де  $d_{mp}$  – діаметр каналу, яким транспортується порошок, м;  $d_c$  – середньомасовий діаметр часточок, м;  $\rho_c$  – густина газу-носія, кг/м<sup>3</sup>;  $m_n$ ,  $m_g$  – масові витрати відповідно порошку і газу, кг/год.

Фактична швидкість газо-порошкового потоку на виході з живильника:

$$u_{ф} = \frac{m_g \cdot R \cdot T}{3600 \cdot p \cdot 0,758 \cdot d_{mp}^2}, \text{ м/с}, \quad (6)$$

де  $R$  – газова стала, для аргону 208 Дж/(кг·К);  $T$  – температура газу, К;  $p$  – тиск у камерному живильнику, Па;  $d_{mp}$  – діаметр каналу, м.

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

**Висновки.** Визначено, що для забезпечення інжекції у струминному режимі при витратах розкислювача 75–80 кг/м<sup>3</sup> та газу-носія 60 м<sup>3</sup>/год розмір часточки не повинен перевищувати 100 мкм.

### Бібліографічний список / References

1. Абрatis X. Вдувание в металлы порошкообразных легирующих / X. Абрatis, X.-Дж. Лангхаммер // Инжекционная металлургия-80. Труды конференции ScanInjectII. – М.: Металлургия, 1982. – С. 266–276.

Abratis Kh., Kh. Dzh. Langkhammer. Vduvanie v metall poroshkoobraznykh legiruyushchikh. Inzhektsonnaya metallurgiya-80. Trudy konferentsii ScanInjectII. Moscow, Metallurgiya, 1982, pp. 266-276.

2. Макналлан М. Гидродинамика затопленных струй / М. Макналлан // Инжекционная мета-

лургия-80. Труды конференции ScanInjectII. – М.: Металлургия, 1982. – С. 114–115.

Maknallan M. *Gidrodinamika zatoplenykh struy*. Inzhektsonnaya metallurgiya-80. Trudy konferentsii ScanInjectII. Moscow, Metallurgiya, 1982, pp. 114-115.

3. 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.

Ayronz G. A. *Nauchnye i prakticheskie aspekty konstruirovaniya furm dlya vduvaniya poroshkov*. Inzhektsonnaya metallurgiya-86. Trudy konferentsii ScanInjectIV. Moscow, Metallurgiya, 1990, pp. 44-62.

4. Охотский В. Б. Модели металлургических систем / В. Б. Охотский. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 287 с.

Okhotskiy V. B. *Modeli metallurgicheskikh sistem*. Dnepropetrovsk, Sistemnye tekhnologii, 2006, 287 p.

5. Конструкции и проектирование агрегатов сталеплавильного производства: учебник / В. П. Григорьев [и др]. – М.: МИСИС, 1995. – 512 с.

Grigor'ev V. P. *Konstruktsii i proektirovaniye agregatov staleplavil'nogo proizvodstva*. Moscow, MISIS, 1995, 512 p.

**Цель.** Определение режимов вдувания порошков ферросплавов в струе инертного газа в ковш, которые обеспечат максимальную степень их усвоения металлом.

**Методика.** Исследования базируются на математических расчетах несущей способности газового потока для случая пневмотранспорта порошков ферросплавов магистральным газопроводом и условий их усвоения расплавом после физического проникновения.

**Результаты.** Установлены предельные скорости и расходы газа-носителя, необходимые для транспортировки порошка ферросплавов с заданным расходом. Для частиц разного размера определены предельно низкие скорости до и после проникновения в металл, которые обеспечивают их полное усвоение.

**Научная новизна.** Впервые определены условия усвоения металлическим расплавом порошков ферросплавов различной фракции с учетом поверхностного натяжения металлического расплава.

**Практическая значимость.** Предложенные режимы ввода порошковых ферросплавов позволят эффективно утилизировать мелкую фракцию ферросплавов и повысить степень усвоения ферросплавов, что в целом приведет к удешевлению процесса раскисления и легирования стали в ковше.

**Ключевые слова:** раскисление, инжекция, порошки ферросплавов, стали.

**Purpose.** Determination of the modes of injecting ferroalloy powder in a stream of inert gas into the bucket, which will provide the maximum degree of their assimilation by the metal.

**Methodology.** The research is based on the mathematical calculations of the bearing capacity of the gas flow for the case of pneumatic transport of ferroalloy powders by the main gas pipeline and the conditions for their melting after physical penetration.

**Findings.** The boundary speeds and flow rates of the gas carrier are required to transport the powder of ferroalloys with a given flow rate. For particles of different sizes, extremely low speeds are defined before and after penetration into the metal, which ensure their complete assimilation.

**Originality.** For the first time, the conditions for the absorption of metal powders of ferroalloys of different fractions by taking into account the surface tension of a metal melt have been determined.

**Practical value.** The proposed modes of the introduction of powdered ferroalloys will allow to efficiently dispose of the fine fraction of ferroalloys and increase the degree of assimilation of ferroalloys, which in general will reduce the cost of deoxidation and steel doping in the ladle.

**Key words:** deoxidation, injection, ferroalloy powders, steel.

**Рекомендована к публикации**  
**д. т. н. Б. М. Бойченко**

**Поступила 10.06.2018**



УДК 669.184.244.66:658.011.56

Наука

**Р. В. Синяков /к. т. н./**

Технологическая компания «Мин Цинь»,  
г. Пекин, КНР  
e-mail: rvsr@ukr.net

**А. В. Харченко /к. т. н./**

Запорожская государственная инженерная  
академия, г. Запорожье, Украина  
e-mail: odds@i.ua

## Автоматизированное проектирование и управление кислородно-конвертерной плавкой

**R. V. Sinyakov /Cand. Sci. (Tech.)/**

Ming Xing Technology Company, Beijing, PRC  
e-mail: rvsr@mail.ru

**A. V. Kharchenko /Cand. Sci. (Tech.)/**

Zaporizhzhya State Engineering Academy,  
Zaporizhzhya Ukraine  
e-mail: odds@i.ua

## Automated projecting and process control for bof

**Цель.** Разработка системы автоматизированного проектирования и управления кислородно-конвертерной плавкой стали.

**Методика.** Применение комплекса методов многопараметрической оптимизации (линейное и динамическое программирование) процесса плавки стали на основе термодинамического моделирования системы «металл – шлак – газ» с использованием метода химических потенциалов Гиббса.

**Результаты.** На примере проектирования технологического процесса в кислородном конвертере показаны основные функции системы автоматизированного проектирования и ее работа в системе управления от начала плавки до получения полупродукта с заданными параметрами.

**Научная новизна.** В работе приведены критерии управления фурмой и вводом материалов. На этой основе достигается оптимальное управление, позволяющее получить металл и шлак с заданными химическим составом и температурой.

**Практическая значимость.** Представленная система автоматизированного проектирования внедрена в составе системы управления кислородно-конвертерной плавкой стали на заводе XuanSteel (КНР). (Ил. 10. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.)

**Ключевые слова:** кислородный конвертер, технология, автоматизированное управление, проектирование процесса, метод Гиббса.