

# III ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 669.147

Є. В. Синегін, д-р техн. наук Б. М. Бойченко, канд. техн. наук В. Г. Герасименко,  
Л. С. Молчанов, В. І. Хотюн

Національна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ

## ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОДУВКИ СТАЛІ ГАЗОВОЮ СУСПЕНЗІЄЮ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ МБЛЗ

*Об'єктом дослідження є процес безперервного розливання сталі, що включає вдування газо-порошкової суміші порожнистим стопором-інжектором проміжного ковша. Методами фізичного моделювання досліджено вплив продувки на процес безперервного розливання, включаючи гальмування струменя металу, режим витікання газо-порошкової суміші і розподіл порошку в кристалізаторі МБЛЗ.*

**Ключові слова:** безперервне розливання, моделювання, продувка, інокулятор.

### Вступ

Безперервне розливання сталі є фінішною операцією, у результаті якої отримують товарний продукт – заготовку, розміри та властивості якої відповідають готівій продукції. Тому на сучасному етапі розвитку вітчизняної металургії велику увагу приділяють методам захисту сталі від вторинного окислення та технологіям обробки сталі у передкристалізаційний період (електромагнітне перемішування, «м'яке» обтиснення, обробка інокуляторами та ін.).

З цього погляду перспективною технологією є вдування у рідку сталь інокулятора (залізного порошку або модифікувальних добавок) у струмені інертного газу через порожнистий стопор проміжного ковша, що чинить комплексний ефект на технологію розливання, сприяючи захисту струменя від вторинного окислення та видаленню газів і неметалевих включень у шлакову фазу проміжного ковша та подрібнення макроструктури заготовки при об'ємній кристалізації, що ініційована інокуляторами. Також автори роботи [1] стверджують, що у випадку потрапляння бульбашок аргону у кристалізатор зменшується поглиблення перегрітого струменя металу в рідку фазу заготовки та зменшення заростання заглибного стакану, при розливанні неіржавіючої сталі.

Зручним інструментом для вивчення гідродинамічних аспектів взаємодії газо-порошкового струменя з рідиною є фізичне моделювання на водяних моделях.

### Методика досліджень

Вітчизняні металурги при моделюванні процесу безперервного розливання сталі зазвичай використовують три числа подоби: 1) число Фруда  $Fr$ , що характеризує відношення інерційної сили потоку та гравітацій-

ної сили; 2) число Рейнольдса  $Re$ , що характеризує відношення інерційної сили та сил молекулярного тертя (в'язкості) в рідині або газі; 3) число Вебера  $We$ , що характеризує відношення інерційної та капілярних сил. За даними робіт [2–4], при моделюванні безперервного розливання сталі можна знехтувати числом Вебера. Визначення решти чисел подоби автори цієї роботи здійснювали відповідно до  $\pi$ -теореми за методикою, що вже докладно описана [4]. Визначальними при імітації гальмування струменя рідини є число Фруда, безрозмірний імпульс та лінійний симплекс.

$$Fr = \frac{w^2}{g \cdot h_p} \text{ – число Фруда;}$$

$$I = \frac{i_2}{\rho_m \cdot g \cdot h_p} \text{ – безрозмірний імпульс газового}$$

струменя, який характеризує відношення імпульсу газового струменя до гравітаційних сил, що діють на рідину;

$$H = \frac{h_p}{h_c} \text{ – лінійний симплекс, що характеризує відно-}$$

шення рівня рідини у напірній ємності до висоти сопла над гирлом заглибного стакану;

де  $w$  – середньовитратна швидкість витікання рідини, м/с;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_p$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$h_p$  – рівень рідини в напірній ємності, м;

$i_2$  – секундний імпульс газо-порошкового струменя, Н;

$h_c$  – рівень сопла над гирлом заглибного стакану, м;

Тоді приймаючи лінійний масштаб та масштаб густини 1:2 та 1:7,2 відповідно, можна розрахувати масштаби імпульсу та швидкості:

$$k_w = \sqrt{k_l} = \sqrt{0,5} = 0,25, \quad (1)$$

$$k_i = k_\rho \cdot k_l = \frac{1}{7,2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{14,4} \approx 0,07, \quad (2)$$

де  $k_w, k_i, k_c, k_l$  – відповідно масштаби швидкості, секундного імпульсу газового струменя, густини рідини та лінійний масштаб.

Для імітації взаємодії газо-порошкового струменя з потоком рідини, що витікає з проміжного ковша, було зібрано фізичну модель у масштабі 1:2 (рис. 1), яка складається з напірної ємності 1 з мірною шкалою, з якої вода скляною трубкою 2 витікає в модель кристалізатора 3, поверхня рідини в якому вкрита сумішшю 4 вакуумного масла та керосину в пропорції 1:1 для імітації шлакоутворювальної суміші на дзеркалі металу в кристалізаторі. Рівень води в кристалізаторі підтримується сталим за допомогою гнучкого шланга 5.

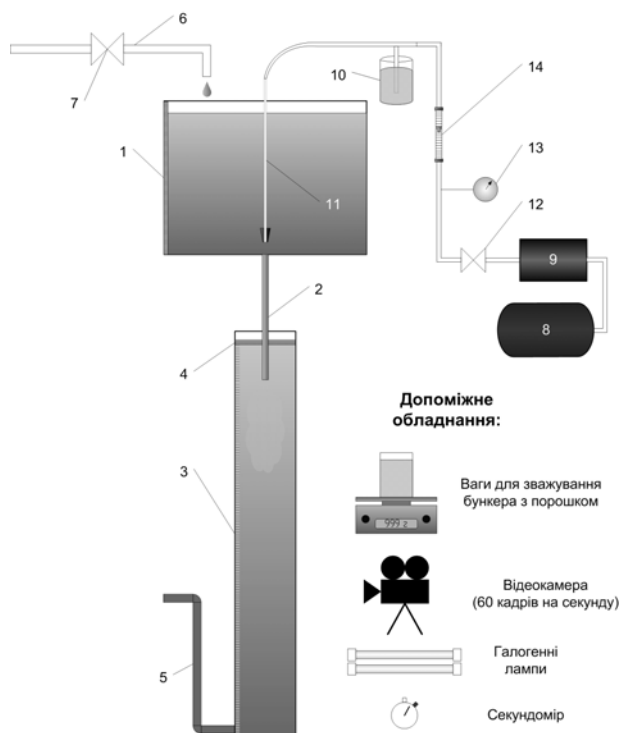


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки:

- 1 – напірна ємність; 2 – скляна трубка; 3 – модель кристалізатора; 4 – суміш вакуумного масла та керосину;  
5 – зливний шланг; 6 – труба для постачання води у напірну ємність; 7 – вентиль; 8 – компресор; 9 – ресивер;  
10 – бункер з піском; 11 – мідна трубка з гумовим наконечником; 12 – вентиль; 13 – манометр; 14 – ротаметр

Воду в напірну ємність постачають через трубу 6 із вентилем 7. Стиснене повітря з компресора 8 потужністю 1,5 кВт гнучкими шлангами подають до ресивера 9 об'ємом 35 л, після чого змішують у бункері 10 з порошком, що імітує інокулятор. Отриману повітряно-порошкова суміш через мідну трубку 11 із гумовим наконечником вдувають у потік рідини, що витікає з напірної ємності. Висоту сопла над рівнем стоку регулюють за допомогою шарнірної передачі з точністю 0,5 мм. Витрату повітря з ресивера регулюють вентилем 12, тиск і витрату повітря перед соплом вимірюють відповідно манометром 13 і ротаметром 14 із поправками на втрату тиску при транспортуванні газо-порошкової суміші. Режими взаємодії газового струменя з рідиною фіксують камерою з частотою 60 кадрів на секунду з підсвічуванням двома галогенними лампами. Отримане HD-відео розкадровують у програмі VirtualDub для подальшої візуальної оцінки режимів витікання газового струменя з сопла. Зображення зони взаємодії газового струменя з рідиною оброблені у програмі Adobe Photoshop для кращої візуалізації (рис. 2).

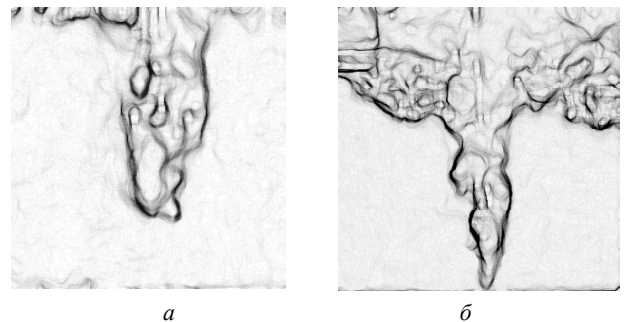


Рис. 2. Зона взаємодії газо-порошкового струменя з рідиною: а – бульбашковий режим:  $H = 1,8$ ,  $I = 1,87 \cdot 10^{-4}$ ,  $Fr = 1,46$ ; б – бульбашково-струминний режим:  $H = 5,6$ ,  $I = 5,63 \cdot 10^{-5}$ ,  $Fr = 0,34$

### Феноменологічний аналіз отриманих результатів

У ході статистичного аналізу експериментальних даних було виявлено, що безрозмірний імпульс має дві автомодельні по відношенню до числа Фруда області.

Перша автомодельна область  $I < 10^{-4}$  відповідає випадку високого рівня води в напірній ємності за низької інтенсивності продувки. У цьому випадку інерційні сили потоку рідини, що витікає з напірної ємності, переважають над імпульсом газового струменя. Число Фруда в цьому випадку залежить лише від висоти стопа  $h_c$ , при збільшенні якої (зменшенні  $H$ ) цей вплив посилюється. Друга автомодельна область  $I > 5 \cdot 10^{-2}$ , навпаки, спостерігається при високій інтенсивності продувки за низького напору рідини, тобто коли імпульс газового струменя переважає над інерційними силами потоку рідини, яка витікає з напірної ємності. У цьому разі положення стопа настільки низьке, що струмінь газу практично повністю блокує витікання рідини.

Гальмування струменя рідини, що може бути описане симплексом швидкості  $W$ , визначається за виразами (3) і (4), що графічно зображено на рис. 3.

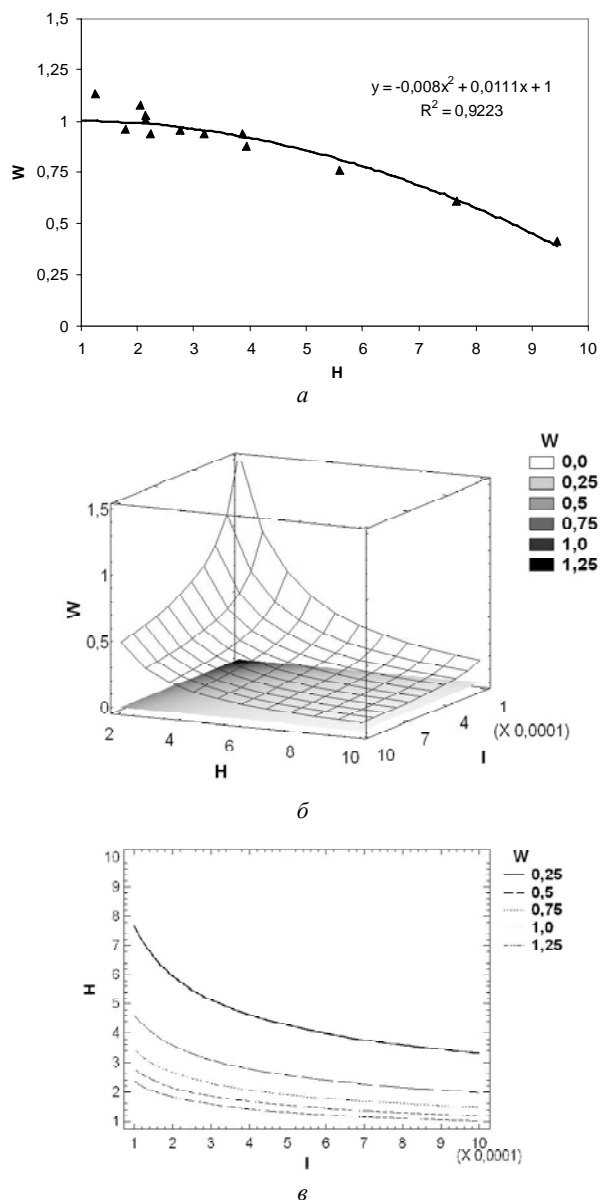


Рис. 3. Графічне зображення моделей: а – модель (3), б – тривимірне зображення моделі (4), в – зображення моделі (4) у вигляді ізоліній

$$W = \frac{w_{\text{факт}}}{w_{\text{ном}}} = 1 - \frac{H^2}{125} + \frac{H}{89,73}, \text{ при } I < 10^{-4}, (R^2 = 0,92), (3)$$

$$W = \frac{w_{\text{факт}}}{w_{\text{ном}}} = \frac{0,04}{\sqrt{I} \cdot H^{1,36}}, \text{ при } I \geq 10^{-4}, (R^2 = 0,7271), (4)$$

де  $w_{\text{факт}}$ ,  $w_{\text{ном}}$  – відповідно фактична середньовитратна швидкість за продувки та номінальна середньовитратна швидкість витікання без продувки.

З рис. 3 видно, що швидкість витікання рідини при продувці може зменшуватися до повної зупинки або збільшуватися щонайменше у 1,5 рази за різних режимів

продувки. У промислових умовах продувка відбувається в режимі  $I \geq 10^{-5}$ ,  $H \geq 8$ , за умов якого симплекс швидкості змінюється в межах  $0,3 \div 0,45$ .

Ефективність обробки сталі мікрохолодильниками значною мірою залежить від характеру взаємодії частинок порошку з рідким металевим розплавом. Погіршення умов контакту призводить до уповільнення нагріву та плавлення порошку, а також підвищення вірогідності його виносу газовими бульбашками у шлакову фазу.

У численних роботах вітчизняних і закордонних дослідників шляхом моделювання на водяних моделях та розплавах легкоплавких металів та їх сплавів було встановлено, що дрібнодисперсні часточки за низької концентрації порошку в газі формують газо-порошковий струмінь, що здатен пройти крізь поверхню бульбашки. При збільшенні концентрації порошку в газі утворюється однорідний газо-порошковий струмінь. Формування бульбашкового та струминного режимів залежить від розмірів частинок порошку, його об'ємної концентрації в суміші, відносної швидкості порошку у струмені газу, густини та в'язкості останнього. У роботі [5] перехід бульбашкового режиму у струминний описано залежністю (5), що була експериментально підтверджена дослідженнями авторів:

$$\theta_n = \frac{\pi}{6 \left( \frac{6}{\sqrt{2\text{Re} + 1}} \right)^3}, (5)$$

де  $\theta_n$  – об'ємна частка порошку; а число Рейнольдса розраховується за формулою:

$$\text{Re} = \frac{d_n (w_z - w_n)}{v_z}, (6)$$

де  $d_n$  – розмір фракції порошку, м;  $w_z$ ,  $w_n$  – відповідно швидкість газу і порошку, м/с;  $v_z$  – кінематична в'язкість газу, м<sup>2</sup>/с.

На рис. 4 наведена умова переходу бульбашкового режиму продувки у струминний, отримана за виразом (5).

Характер розподілу порошку в рідкій фазі заготовки не змінюється за різних режимів продувки і має однаковий циркуляційний контур, який у верхніх шарах рідини збігається з циркуляційним контуром рідини. У нижніх шарах рідини, де швидкості потоків уповільнюються, порошок із густиною, вищою за густину води, починає осаджуватися. Водночас щільність седиментації в поперечному перетині заготовки дещо нерівномірна. Максимум її спостерігається в осьовій частині заготовки, периферійні ділянки перетину заготовки меншою мірою насичуються порошком.

Визначення орієнтовного градієнту концентрації порошку у поперечному перетині заготовки на різній глибині від меніску аналізували шляхом порівняння світлопроникності води. Для цього розкадровані зображення обробляли на ПЕОМ у програмі *Adobe Photoshop* фільтром *Posterize* до отримання зображення областей із різною яскравістю, що відповідає різній концентрації порошку в воді. Характер розподілу по-

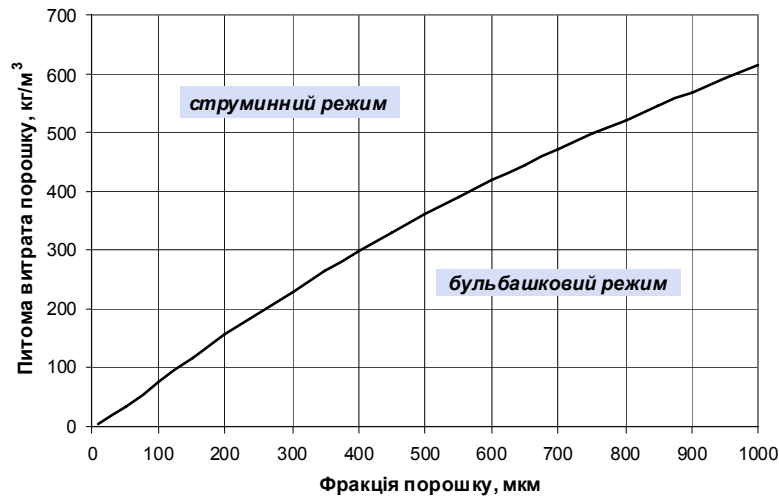


Рис. 4. Умова існування струминного і бульбашкового режиму для порошку різної фракції та його масової витрати

рошку різної густини в об'ємі заготовки зображено на рис. 5.

У разі використання порошку з густиною, нижчою за густину рідини, близько 50÷80 % порошку затягується висхідними струменями газу, що спливають у рідкій фазі заготовки, і асимілюються шлаковою фазою. Решта порошку у нижніх шарах заготовки значною мірою

рівномірно розподіляється по перетину заготовки і поступово спливає.

Криві розподілу концентрації в обох випадках подібні до кривої нормального розподілу Гауса і при віддаленні від меніску наближаються до прямої. Концентраційний градієнт при вдуванні легкого порошку в центрі заготовки майже відсутній і спостерігається лише в периферійній частині заготовки. Важкий порошок утворює значний концентраційний градієнт на всьому перетині заготовки. Концентраційний градієнт майже відсутній на глибині 800 мм для важкого порошку і 600 мм для легкого.

Слід відзначити, що в разі використання плавких мікрохолодильників градієнт концентрації порошку в поперечному перетині заготовки буде меншим. Це зумовлюється швидшим розплавленням порошку в «теплішій» осевій частині заготовки.

### Висновки

За результатами фізичного моделювання досліджено 3 важливі гідродинамічні аспекти взаємодії газо-порошкової суміші з рідиною: гальмування струменя рідини, режим взаємодії газо-порошкового струменя з рідиною та розподіл порошку в рідкій фазі кристалізатора. Інжекція газо-порошкового струменя в рідкий метал проміжного ковша МБЛЗ може відбуватися у бульбашковому або бульбашково-струминному режимах. Останній є більш бажаним, оскільки зменшує вірогідність затікання рідкої сталі в досить велике (4–6 мм) сопло стопора-інжектора.

Додатковим ефектом від вдування газо-порошкової суміші, який позитивно впливає на умови формування коринки заготовки у кристалізаторі, є гальмування майже у 2 рази потоку сталі, що витікає з промковша. Розподіл плавкого мікрохолодильника, який є щільнішим за рідку сталь, у рідкій фазі кристалізатора нагадує криву Гауса, яка згладжується з поглиблення далі від меніска. З урахуванням розплавлення частини інокулятора в рідкій фазі заготовки можна стверджувати про його

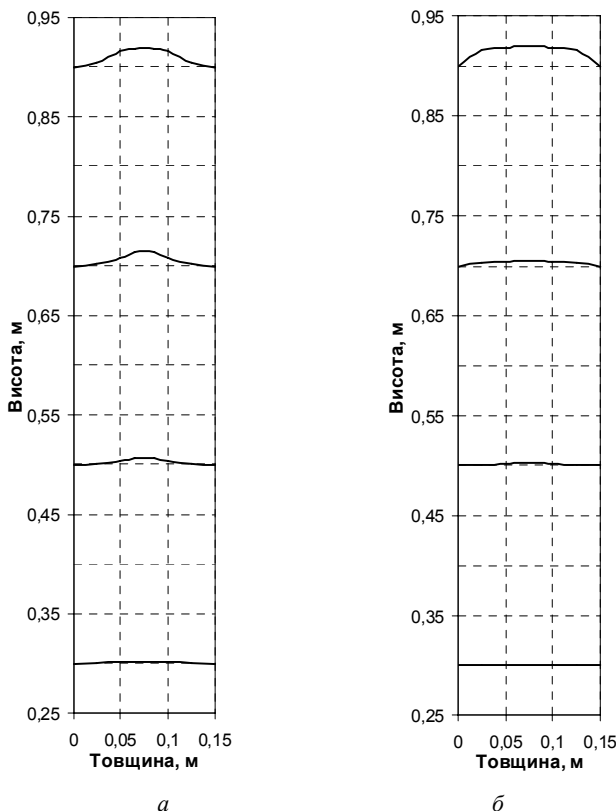


Рис. 5. Елюри концентрації порошку важкого (а) і легшого (б) за рідину по перетину заготовки на різній глибині рідкої фази (меніску відповідає позначка 1 м, крайка трубки занурена на 5 см під меніск рідини)

рівномірний розподіл по всьому об'єму рідкої фази у кристалізаторі.

#### Список літератури

1. Лейтес А. В. Защита стали в процессе непрерывной разливки / А. В. Лейтес. – М. : Металлургия, 1984. – 200 с. :
2. Исследование вынужденных и свободных циркуляционных потоков жидкого металла в непрерывном слитке на водяных моделях / [А. Д. Акименко, А. А. Скворцов, А. И. Гуськов] // Непрерывное литье стали. Тематический отраслевой сборник № 3. – М. : Металлургия, 1976. – С. 48–53.
3. Протопопов Е. В. Исследование гидродинамики металла в промежуточном ковше слябовой МНЛЗ / Е. В. Протопопов, Л. А. Ганзер // Новини науки Придніпров'я. – 2008. – № 3–4. – С. 54–56.
4. Синегин Е. В. Расчет масштаба модели для изучения процесса распределения инокуляторов в жидкой фазе кристаллизующейся заготовки / Е. В. Синегин // Спеціальна металургія : вчора, сьогодні, завтра : матеріали Х Міжнародної науково-практичної конференції. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – С. 308–321.
5. Айронз Г. А. Научный и практический аспекты конструирования фурм для вдувания порошков / Г. А. Айронз // Труды конференции «Инжекционная металлургия». – М. : Металлургия, 1990. – С. 44–62.

Одержано 26.02.2014

#### **Синегин Е.В., Бойченко Б.М., Герасименко В.Г., Молчанов Л.С., Хотюн В.И. Физическое моделирование продувки стали газовой суспензией в промежуточном ковше МНЛЗ**

*Объектом исследования является процесс непрерывной разливки стали, включающий вдувание газопорошковой смеси через полый стопор-инжектор промежуточного ковша. Методами физического моделирования изучено влияние продувки на процесс непрерывной разливки, включая торможение струи металла, режим истечения газопорошковой смеси и распределение порошка в кристаллизаторе МНЛЗ.*

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, моделирование, продувка, инокулятор.

#### **Synegyn E., Boychenko B., Gerasimenko V., Molchanov L., Hotyun V. Physical modeling of purging steel by gas suspension in caster tundish of CCM**

*Object of research is the process of continuous casting of steel which includes injection of gas-powder mixture through a hollow stopper-injector in a tundish. By methods of physical modeling influence of injection on continuous casting process, including metal flow braking, a mode of expiration the gas-powder mix and a powder distribution in crystallizer of CCM, were investigated.*

**Key words:** continuous casting, modeling, injection, inoculator.