

Єфімова В.Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Смірнов Ю.О.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів

Національної академії наук України

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ПРОДУВАННЯ МЕТАЛУ ІНЕРТНИМ ГАЗОМ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ РОЗЛИВАННІ

В роботі показано, що безперервне розливання сталі є широко використовуваним процесом і важливим етапом у виробництві сталі. При цьому чистота сталі і строгий контроль складу, поряд з якістю поверхні безперервної заготовки є першочерговими завданнями.

З'ясовано, що чистота сталі залежить від кількості, морфології та розподілу за розмірами неметалічних включень. Визначення «чиста сталь» змінюється в залежності від її призначення.

Показано, що проміжний ківш являє собою останню металургійну ємність, в якій можна керувати чистотою готового продукту, застосовуючи продукцію через продувні фурми з різним діаметром газорозподільних каналів.

Визначено, що ступінь рафінування металевих розплаву при використанні продувки інертним газом залежить від діаметра пузиря та діаметру каналу, що виділяє газ.

Визначено, що метою досліджень є теоретичне обґрунтування розміру газового пузиря в виробничому процесі при продуванні сталі інертним газом, а також підтвердження даних аналітичних розрахунків розподілу неметалевих включень після проведення серії промислових експериментів.

У роботі проведено аналіз кінетики переходу частинки неметалевого включення через границю поділу метал – шлак при продуванні металу інертним газом.

Виведено рівняння, що описує процес накопичення частинок неметалевих включень, що було емульговано шлаком.

Показано, що розрахунок швидкості емульгування частинок показує найкращі результати при швидкостях витрати газу 10–12 л·мин⁻¹. При цьому загальний об'єм краплин металу в шлаковій фазі збільшується з часом продування. За таких умов швидкість емульгування краплин збільшується відповідно до швидкості їх утворення, в результаті встановлюється стаціонарний режим і стає сталою.

З'ясовано, що при швидкостях потоку понад 12 л·хв⁻¹ швидкість утворення крапель вища, проте рівноважні умови досягаються довше.

Численними дослідниками встановлено, що найкращі результати рафінування сталі від неметалевих включень досягаються при діаметрі бульбашок у діапазоні 1–5 мм.

Ґрунтуючись на вище наведених теоретичних засадах, нами було проведено промислові випробування на дворучній МНЛЗ при розливанні сталі марки К-60.

Для підтвердження теоретичних розрахунків було проведено експериментальні дослідження у промислових умовах з використанням продувальної фурми великої протяжності з діаметром газовиділювального каналу 1,5–2 мм, яка в результаті продування дозволяла отримувати бульбашки розміром 4,5–5 мм, та продувну балкою, з діаметром газовиділювальних каналів 0,14–0,16 мм, що дозволяло отримувати бульбашки діаметром 3,0–3,25 мм, з витратою газу 10–12 л·мин⁻¹.

В результаті проведених експериментів встановлено, що в дослідному та порівняльному металі зустрічаються переважно тонкі сульфідні включення до 0,5 бали, точкові оксидні включення до 0,5 бали та силікатні включення як глобулярної, так і рядкової форми до 4 бали. У зразках з дослідних слябів кількість оксидів та сульфідів децю менша, ніж у порівняльному. На всіх зразках зустрічаються неметалеві включення у вигляді скупчень (конгломератів) дрібних включень округлої та неправильної геометричної форми. Максимальні розміри великих включень для металу першого струмка досягають 60–80 мкм, а другого – 50–60 мкм.

Кількісні оцінки у зразках зі слябів, відлитих з продуванням аргоном через продувну балку показали, що кількість великих неметалевих включень (розмір більше 50 мкм) зменшується в середньому 40–80%, порівняно з продуванням через продувну фурму. Зменшення кількості включень розміром 20–45 мкм для слябу другого струмка становить 14–26%.

Ключові слова: неметалеві включення, проміжний ківш, продувальні пристрої, безперервне розливання сталі, металографічні дослідження.

Постановка проблеми. Безперервне розливання сталі є широко використовуваним процесом і важливим етапом у виробництві сталі. Близько 90% сталі, що відливається у всьому світі виробляється безперервним методом. У деяких частинах світу, в тому числі Західної Європи, Японії та США, безперервне розливання становить вище 97%. Виникаюча конкуренція у виробничих горизонтах проявляється в строгих вимогах до якості, які стали критичними з позиції прогресивно зростаючого обсягу виробництва. В результаті, чистота сталі і строгий контроль складу, поряд з якістю поверхні безперервної заготовки є першочерговими завданнями.

Неметалічні включення, що утворюються в процесі виробництва сталі значно впливають на властивості сталі та металопродукції. Видалення неметалевих включень у процесах виробництва сталі відіграє чільну роль при отриманні продукції високої якості. Головним завданням металургів є видалення неметалевих включень, а також контроль природи і розподіл включень, що залишилися в сталі.

Більшість досліджень продування металу інертним газом, представлених у літературі, присвячені видаленню неметалевих включень в одно-дворучковому проміжному ковші [5–7].

Відомо, що процес продування сталі інертним газом супроводжується цілою сукупністю фізико-хімічних процесів, які характеризуються утворенням металевої емульсії в шлаку, що призводить до збільшення масопереносу між двома рідинами, що не змішуються, в результаті чого зростає швидкість асиміляції неметалічної фази шлаком [8]. Однак розташування продувних пристроїв у багаторучкових проміжних ківшах повинно бути таким, щоб газогідродинамічні потоки рідкої сталі з прикріпленими до бульбашок газу неметалевими включеннями мали однакову температуру та кількісний склад у кожній точці проміжного пристрою, для забезпечення однакової якості литого продукту на кожному струмку.

Чистота сталі залежить від кількості, морфології та розподілу за розмірами неметалічних включень. Визначення «чиста сталь» змінюється в залежності від її призначення [1].

Проміжний ковш – це остання металургійна ємність, в якій можна керувати чистотою готового продукту, застосовуючи продукцію через продувні фурми з різним діаметром газорозподільних каналів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що ступінь рафінування металевих

розплаву при використанні продувки інертним газом залежить від діаметра пузиря та діаметру каналу, що виділяє газ. Багаточисленними дослідженнями [2–7] встановлено, що використання бульбашок малих розмірів позитивно впливає на процес очищення сталі від неметалічних включень.

Тому метою наших досліджень є теоретичне обґрунтування розміру газового пузиря в виробничому процесі при продуванні сталі інертним газом, а також підтвердження даних аналітичних розрахунків розподілу неметалевих включень після проведення серії промислових експериментів.

Постановка завдання. Метою наших досліджень було:

- 1) аналітичний аналіз кінетичних процесів видалення неметалевих включень в процесі безперервного розливання сталі;
- 2) перевірка аналітичних результатів досліджень у промислових умовах;
- 3) проведення металографічних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Загальна швидкість видалення неметалічних включень у шлаковій фазі з капель металу в проміжному ковше може бути представлена як [2]:

$$V = (k_{ш-м} A_{ш} + A_{HB} k_{ш-HB} + k_{ш-м} (A_k + A'_k)) X_{FeO} \quad (1)$$

де $k_{ш-м}$, $k_{ш-HB}$ константи швидкості реакцій шлак-метал і шлак-неметалева включення відповідно; $A_{ш}$, A_{HB} – площа шлакової та неметалевої фаз, відповідно; A_k , A'_k – площа металевих капелей і зменшення площі металевих капелей за рахунок асиміляції неметалічної фази; X_{FeO} – масова частка FeO в шлаку. Однак при використанні рівняння (1) виникають деякі труднощі з визначенням площі металевих краплин. Тому для визначення швидкості масопереносу неметалевої фази в системі метал-шлак часто визначають різницю між об'ємом утворених краплин металу та емульгованих у шлаку $k_{ш-м} (V_{об.} - V_{эм.})$.

Для визначення кількості капелей, що приймають участь в емульгуванні, застосовується закон збереження маси для межі поділу фаз метал – шлак [3]:

$$V_d(\tau) = V_{об.} \cdot \tau - \int_0^{\tau} V_{эм.}(\tau) d\tau \quad (2)$$

де $V_d(\tau)$ – об'єм краплин, що накопичуються у шлаковій й фазі в момент часу τ , у м³; $V_{об.} \cdot \tau$ – загальний об'єм краплин, що утворилися у момент часу τ , у м³; $V_{об.}$ – об'єм краплини, що залишається сталим у процесі емульгування, м³·с⁻¹; $V_{эм.}$ –

об'єм краплин, що приймають участь в емульгуванні у момент часу τ , $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Диференціювання рівняння (2) призводить до рівняння, що характеризує швидкість переміщення металевих крапель в фазу, що емульгується.

$$\frac{dV_d(\tau)}{d\tau} = V_{об.} - V_{эм.}(\tau) \quad (3)$$

З наступними граничними умовами:

$$1: \tau = 0, V_d = 0$$

$$2: \tau \rightarrow \tau_{\infty}, V_d = V_{\infty};$$

де τ_{∞} – час барботажу, за якого утворюється стійка емульсія, с; V_{∞} – об'єм краплин у стійкій емульсії, об'єм м^3 .

З використанням 1-ї граничної умови та інтегрування рівняння (3) отримаємо об'єм краплин, що переходять у шлакову фазу:

$$V_d(\tau) = V_{об.} \cdot \tau \left(1 - e^{-\tau/\tau_{\infty}}\right). \quad (4)$$

Виходячи з цього швидкість накопичення краплин, що емульгувалися може бути представлена як:

$$\frac{dV_d}{d\tau} = V_{об.} e^{-\tau/\tau_{\infty}} \text{ и } V_{эм.}(\tau) = R_3 \left(1 - e^{-\tau/\tau_{\infty}}\right). \quad (5)$$

Проведені розрахунки з використанням даних рівнянь показали, що при швидкостях потоку 10–12 л·мин⁻¹ загальний об'єм краплин металу в шлаковій фазі збільшується з часом продування. За таких умов швидкість емульгування крапель збільшується відповідно до швидкості їх утворення, в результаті встановлюється стаціонарний режим і стає сталою.

При швидкостях потоку понад 12 л·хв⁻¹ швидкість утворення крапель вища, проте рівноважні умови досягаються довше.

Грунтуючись на експериментальних даних, можна припустити, що об'єм перенесеної металеві фазі пузирями в шлак залежить від наступних параметрів:

$$V_d^0 = f(r_n, \Delta\rho, \rho_{ш}, \eta_{ш}, \eta_m, g) \quad (6)$$

де r_n – діаметр пузиря, м; $\Delta\rho$ – різниця між густинами двох рідких фаз, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; $\rho_{ш}$ – густина шлакової фази, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; $\eta_{ш}$ и η_m – в'язкість шлаку та металу, відповідно, Па·с; g – прискорення сили тяжіння, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$.

Слід зауважити, що як тільки пузир газу пройде міжфазну границю поділу фаз метал – шлак,

поверхневий натяг почне грати значну роль у процесі утворення краплин [4].

Якщо об'єднати змінні та фундаментальні значення у чотири групи, що не мають одиниць виміру, то:

$$Z_1 = f(\rho_{ш}, \eta_m, g, V_d^0); Z_2 = f(\rho_{ш}, \eta_m, g, r_n);$$

$$Z_3 = f(\rho_{ш}, \eta_m, g, \eta_{ш}); Z_4 = f(\rho_{ш}, \eta_m, g, \Delta\rho).$$

Звідси отримаємо наступні залежності:

$$Z_1 = \frac{\rho_{ш}^2 g V_d^0}{\eta_m^2}; Z_2 = \frac{\rho_{ш}^2 g r_n^0}{\eta_m^2}; Z_3 = \frac{\eta_{ш}}{\eta_m}; Z_4 = \frac{\rho_{ш}}{\Delta\rho},$$

що призведе до співвідношення $Z_1 = f(Z_2, Z_3, Z_4)$ чи $Z_1 = K Z_2^a Z_3^b Z_4^c$.

Отже, об'єм металу, що буде потрапляти у шлакову фазу в процесі продування інертним газом буде визначатися:

$$V_d^0 = 1,04 \left(\frac{\eta_m^2}{\rho_{ш}^2 g} \right) \left(\frac{\rho_{ш}^2 g r_n^3}{\eta_m^2} \right)^{0,66} \left(\frac{\eta_{ш}}{\eta_m} \right)^{-0,34} \left(\frac{\rho_{ш}}{\Delta\rho} \right)^{1,66} \quad (7)$$

чи в одиницях СГС

$$V_d^0 \approx 0,11 \eta_m \rho_{ш} \eta_{ш}^{\frac{1}{3}} \Delta\rho^{\frac{5}{3}} r_n^2 \quad (8)$$

При використанні рівняння (4) отримаємо загальний об'єм краплин металу, що утворюються у шлаковій фазі у момент часу τ

$$V_{об.} = \frac{Q}{V_n} V_d^0 \quad (9)$$

де Q – витрати газу при продуванні л·хв⁻¹; $V_n = 1,378 Q^{1,2} g^{0,6}$ – об'єм пузиря, мм:

$$V_{об.} \approx 0,19 \eta_m \rho_{ш} \eta_{ш}^{\frac{1}{3}} \Delta\rho^{\frac{5}{3}} \frac{Q}{r_n} \quad (10)$$

Розрахунки, що проведені з використанням рівняння (10) наведено на рис. 1.

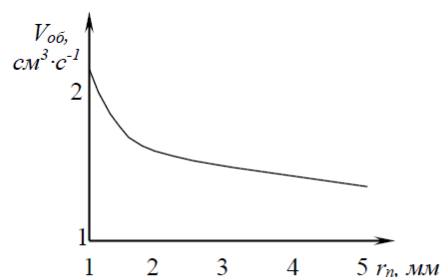


Рис. 1. Залежність швидкості утворення краплин металу у шлаковій фазі від розміру пузиря аргону

Дані рис. 1 свідчать про те, що найбільша кількість крапель спостерігається при діаметрі бульбашок 1 мм. Однак бульбашки менших розмірів мають певні недоліки, які слід враховувати під час реалізації методу продування у промислових умовах. Перший – великий час спливання міхура, а другий – можливість захоплення конвективними потоками затягування їх у зону випускного отвору склянки-дозатора.

Численними дослідниками встановлено, що найкращі результати рафінування сталі від неметалевих включень досягаються при діаметрі бульбашок у діапазоні 1–5 мм [6–8].

Ґрунтуючись на вище наведених теоретичних засадах, нами було проведено промислові випробування на дворучній МНЛЗ при розливанні сталі марки К-60.

На двох рівчаках було встановлено продувні елементи. На першому струмку встановлювалася продувна фурма, з діаметром газовиділювального каналу 1,5–2 мм, яка в результаті продування дозволяла отримувати бульбашки розміром 4,5–5 мм, рис. 2, а. Другий струмок був обладнаний продувною балкою, з діаметром газовиділювальних каналів 0,14–0,16 мм, що дозволяло отримувати бульбашки діаметром 3,0–3,25 мм, рис. 2, б. Витрата газу становила 10–12 л·мин⁻¹.

Встановлено, що в дослідному та порівняльному металі зустрічаються переважно тонкі сульфідні включення до 0,5 бали, точкові оксидні включення до 0,5 бали та силікатні включення як глобулярної, так і рядкової форми до 4 бали. У зразках з дослідних слябів кількість оксидів та сульфідів дещо менша, ніж у порівняльному. На всіх зразках зустрічаються неметалеві включення у вигляді скупчень (конгломератів) дрібних включень округлої та неправильної геометричної форми. Максимальні розміри великих включень для металу першого струмка досягають 60–80 мкм, а другого – 50–60 мкм.

Як показали кількісні оцінки у зразках зі слябів, відлитих з продуванням аргоном через продувну балку, кількість великих неметалевих включень (розмір більше 50 мкм) зменшується в середньому 40–80%, порівняно з продуванням через продувну фурму. Зменшення кількості включень розміром 20–45 мкм для слябу другого струмка становить 14–26%.

Висновки. В результаті проведених теоретичних досліджень та промислових випробувань встановлено, що найкращі результати щодо рафінування металу від неметалевих включень досягаються при продувці металу через балку з діаметром газовиділювальних каналів 0,14–0,16 мм.

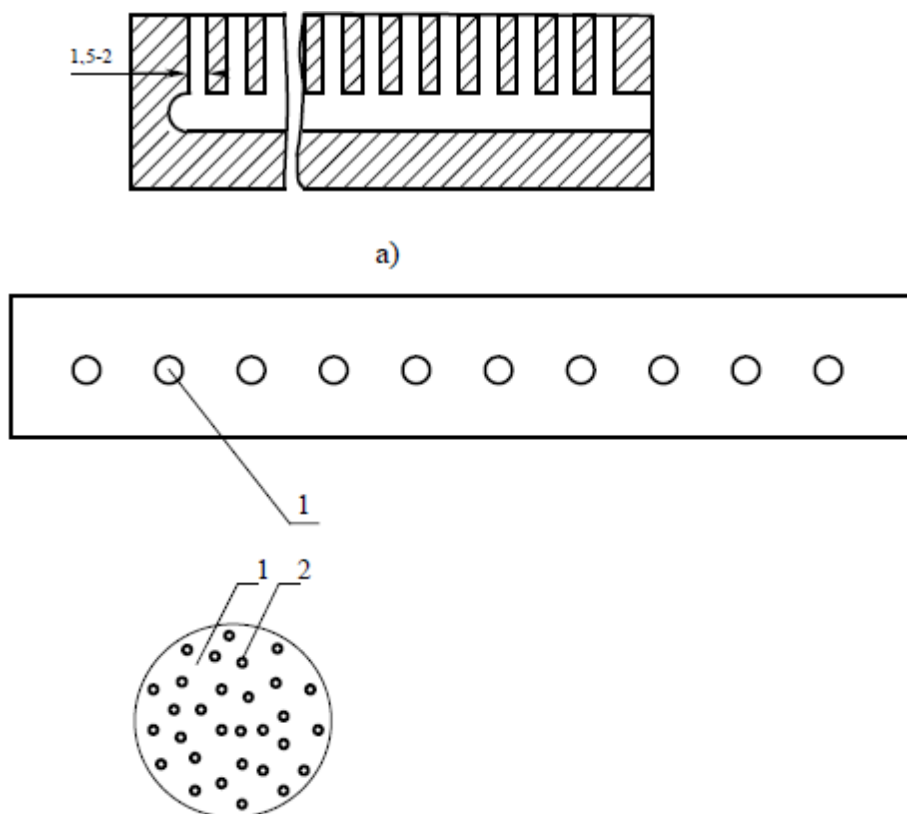


Рис. 2. Конструкція продувальних пристроїв: а – багатоканальна протяжна фурма; б – продувна балка; 1 – продувальний елемент; 2 – канал, що виділяє газ

Список літератури:

1. Huang, J., Yuan, Z., Shi, S., et al., Flow characteristics for two-strand tundish in continuous slab casting using PIV. *Metals*. 2019. № 9. P. 41–52.
2. Gushchin, V.N. and Ul'yanov, V.A. Improved tundish refining of steel in continuous-casting machines. *Steel Transl.* 2017. Vol. 47. № 5. P. 320–324.
3. Dubodelov, V.I., Smirnov, A.N., Efimova, V.G., et al., *Gidrodinamicheskie i fiziko-khimicheskie protsessy v promezhutochnykh kovshakh dlya nepreryvnogo lit'ya stali* (Hydrodynamic and Physicochemical Processes in Tundish for Continuous Steel Casting), Kyiv: Naukova Dumka, 2018.
4. Sahai, Y. and Emi, T., *Tundish Technology for Clean Steel Production*, Singapore: World Scientific, 2008.
5. Smirnov, A.N., Efimova, V.G., Verzilov, A.P., and Maksaev, E.N., Clogging of submersible nozzles in continuous slab-casting machines. *Steel Transl.* 2014. Vol. 44. № 11. P. 833–837.
6. Smirnov, A.N., Efimova, V.G., and Kravchenko, A.V., Flotation of nonmetallic inclusions during argon injection into the tundish of a continuous-casting machine. Part 1. *Steel Transl.* 2013. Vol. 43. № 11. P. 673–677.
7. Smirnov, A.N., Efimova, V.G., and Kravchenko, A.V., Flotation of nonmetallic inclusions during argon injection into the tundish of a continuous-casting machine. Part 2. *Steel Transl.* 2014. Vol. 44, № 1, P. 11–16.
8. Smirnov, A.N., Kuberskii, S.V., Smirnov, E.N., et al., Influence of meniscus fluctuations in the mold on crust formation in slab casting. *Steel Transl.* 2017. Vol. 47. № 7, P. 478–482.

Yefimova V.G., Smirnov Yu.O. DETERMINATION OF OPTIMAL MODES FOR PURGE OF METAL WITH INERT GAS DURING CONTINUOUS CASTING

The paper shows that continuous steel casting is a widely used process and an important stage in steel production. In this case, the purity of the steel and strict control of the composition, along with the surface quality of the continuous billet, are the primary tasks.

It is found that the purity of the steel depends on the amount, morphology and size distribution of non-metallic inclusions. The definition of "pure steel" varies depending on its purpose.

It is shown that the tundish is the last metallurgical container in which the purity of the finished product can be controlled by applying the product through blowdown lances with different diameters of gas distribution channels.

It is determined that the degree of refining of the metal melt when using inert gas blowing depends on the bubble diameter and the diameter of the channel that releases the gas.

It was determined that the purpose of the research is to theoretically substantiate the size of the gas bubble in the production process when blowing steel with an inert gas, as well as to confirm the data of analytical calculations of the distribution of non-metallic inclusions after conducting a series of industrial experiments.

The work analyzes the kinetics of the transition of a non-metallic inclusion particle across the metal-slag boundary when blowing metal with an inert gas.

An equation is derived that describes the process of accumulation of non-metallic inclusion particles that were emulsified by slag.

It is shown that the calculation of the particle emulsification rate shows the best results at gas flow rates of 10–12 l · min⁻¹. At the same time, the total volume of metal droplets in the slag phase increases with the blowing time. Under such conditions, the droplet emulsification rate increases in accordance with the rate of their formation, as a result, a stationary mode is established and becomes constant.

It was found that at flow rates above 12 l · min⁻¹ the droplet formation rate is higher, but equilibrium conditions are reached longer.

Numerous researchers have established that the best results of steel refining from non-metallic inclusions are achieved with bubble diameters in the range of 1–5 mm.

Based on the above theoretical principles, we conducted industrial tests on a two-arm caster when casting K-60 steel.

To confirm the theoretical calculations, experimental studies were conducted in industrial conditions using a long-length blowing lance with a gas discharge channel diameter of 1.5–2 mm, which as a result of blowing allowed to obtain bubbles of 4.5–5 mm in size, and a blowing beam with a gas discharge channel diameter of 0.14–0.16 mm, which allowed to obtain bubbles with a diameter of 3.0–3.25 mm, with a gas flow rate of 10–12 l min⁻¹.

As a result of the experiments, it was established that in the experimental and comparative metal there are mainly thin sulfide inclusions up to 0.5 points, point oxide inclusions up to 0.5 points and silicate inclusions of both globular and linear form up to 4 points. In samples from experimental slabs, the amount of oxides and sulfides is somewhat less than in the comparative one. All samples contain non-metallic inclusions in

the form of clusters (conglomerates) of small inclusions of rounded and irregular geometric shapes. The maximum sizes of large inclusions for the metal of the first stream reach 60–80 microns, and for the second – 50–60 microns.

Quantitative assessments in samples from slabs cast with argon blowing through a blow beam showed that the number of large non-metallic inclusions (size more than 50 microns) decreases by an average of 40–80%, compared with blowing through a blow lance. The reduction in the number of inclusions with a size of 20–45 microns for the slab of the second stream is 14–26%.

Key words: *non-metallic inclusions, tundish, blowing devices, continuous steel casting, metallographic studies.*