

УДК 669.23

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/26>**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

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РАФІНУВАННЯ СТАЛІ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕАКЦІЙНОЇ КАМЕРИ

В роботі показано, що в процесі розливання сталі через проміжні ковші МБРЗ необхідно зменшувати вміст неметалевих включень. Показано, що конструкція проміжного ковша суттєво впливає на якість готової продукції, а саме на вміст і розподіл неметалевих включень у готовому продукті.

Аналіз літературних джерел довів, що вміст неметалевих включень необхідно контролювати перед розливанням готового продукту.

Показано зміну вільної енергії системи при видаленні неметалевої частинки. Встановлено, що хімічні потенціали та поверхневий натяг металу практично не змінюються при виході неметалевих включень на поверхню розплаву.

Встановлено, що металургійні суспензії та емульсії без хімічних процесів, розчинення та зміни умов адсорбції у процесі спливання на межі розділу фаз метал – газ є нестійкими дисперсними системами, т.к. зміна енергії Гіббса завжди негативна.

Показано, що для неметалевих включень у сталі основним механізмом укрупнення є ортокінетична коагуляція, що протікає за наявності градієнта швидкості у напрямку поперек потоку.

Визначено, що швидкість руху неметалевих частинок залежить від структури адсорбційного шару. Наявність дифузійної будови адсорбційного прикордонного шару призводить до ковзання, що проявляється у порушенні законів гідродинаміки.

Встановлено рівняння для визначення резидентного часу перебування частинки неметалевого включення у ванні проміжного ковша. Показано, що для збільшення резидентного часу необхідно збільшувати об'єм проміжного ковша і збільшувати розміри вихорів, де потоки можуть мати незначні швидкості, достатні для здійснення необхідної тривалості контакту з шлаком включення.

Проведено фізичне моделювання на холодній моделі процесів рафінування металу у проміжному ковші, що обладнаний перегородками та продувкою інертним газом через фурму великої довжини.

Дослідження на фізичній моделі показало, що, ванна проміжного ковша з гідродинамічної точки зору повинна бути гасителем швидкості потоків, що створюється вимушеною конвекцією.

Визначено, що довжина проміжного ковша визначається довжиною роздавальної камери. Вона залежить від конструкції перегородок, а також кутів нахилу переточних каналів.

У процесі моделювання найкращі результати показали конструкції реакційних камер, що складаються з двох суцільних перегородок із щільними каналами у днища ковша. Така конструкція забезпечувала створення спрямованого потоку рідини, що утворює дві вихрові гідродинамічні циркуляційні структури. Одна з них утворювалася у реакційній камері, а інша – у роздавальній.

Моделі експерименти показали, що така конструкція проміжного ковша забезпечує збільшення часу перебування імітаторів неметалевих включень у 4–6 разів більше, ніж це має місце за існуючої конструкції проміжного ковша.

Доведено ефективність застосування реакційних камер у ванні проміжного ковша у поєднанні з продувкою металу інертним газом у виробничих умовах.

Промислові експерименти та металографічні дослідження показали, що спостерігається зниження вмісту неметалевих включень на 30–40%.

Ключові слова: неметалеві включення, проміжний ківш, роздавальна камера, безперервне розливання сталі, металографічні дослідження.

Постановка проблеми. В даний час, у всьому світі частка сталі, що розливається на машинах безперервного лиття заготовок, збільшується, при цьому особлива увага приділяється питанням підвищення якості безперервнолитих заготовок, що забезпечується технологією процесу та обладнанням машин безперервного лиття заготовок (МНЛЗ). Важливим технологічним вузлом сучасної МНЛЗ є проміжний ківш, його конструкція значно впливає на якість продукції [1]. В даний час проміжний ківш розглядається як універсальний агрегат для додаткового рафінування сталі, усереднення металу за хімічним складом і температурою. Оснащення ковшів спеціальними пристроями, що рафінують, дозволяють оптимізувати гомогенізацію металевого розплаву і створити сприятливі умови для його рафінування, оскільки на цій стадії представляється, по суті, остання технологічна можливість помітно вплинути на якість сталі [2–4].

Однак, як показує практика, при цьому недооцінюється вплив термодинамічних та кінетичних аспектів видалення неметалевих включень у проміжному ковші та можливості підвищення цієї технологічної операції на прикладі сталі К – 60 [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За даними наукових досліджень [1–4] показано, що вміст неметалевих включень необхідно контролювати перед розливанням готового продукту. Так, у роботах [2–4] показано, що під час лиття можна пригнітити кристалізацію включень і замість крихкого утворити пластичне склоподібне включення, що значно менш шкідливо для готового продукту. В роботах [3–5] показано, що хімічний склад та форма включень можуть бути використані для контролю мікроструктури сталі шляхом подрібнення зерна під час кристалізації або фазових перетворень у твердому стані.

Постановка завдання. На відміну від ізотермічних умов, досліджень, які було проведено раніше, формування неметалевих включень під час лиття є більш складним, оскільки відбувається зміна як температури, так і хімічного складу розплаву. При цьому передбачити зміну включення під час розливання важко, оскільки в термодинаміці оксидів і сульфідів бракує термодинамічних даних для температур металургійних систем. Отже визначення термодинамічних та кінетичних закономірностей процесів модифікування включень є актуальною задачею.

Метою наших досліджень було:

- 1) з використанням термодинамічного аналізу встановити найкращі умови видалення неметалевих включень з проміжного ковша;
- 2) для підтвердження теоретичного аналізу провести фізичне моделювання на холодній моделі;
- 3) перевірити результати досліджень у промислових умовах.

Виклад основного матеріалу. Видалення однорідної неметалевої частинки, що не стискається на поверхню сталі без хімічних процесів, розчинення і без урахування впливу стінок агрегату можна представити зміною ізобарно ізотермічного потенціалу. Оскільки маса металу велика в порівнянні з масою неметалевих включень, приймаємо, що хімічні потенціали та поверхневий натяг металу практично не змінюються при виході продуктів розкислення на поверхню [6]:

$$\Delta G = \sigma^{(g-z)} - \sigma^{(g-m)} - \sigma^{(m-z)} \frac{1 + \cos \theta^{(g-m)}}{2} + \frac{\sigma^{(m-z)} \delta A^{(m-z)}}{A_2^{(g-z)}} \quad (1)$$

де $\sigma^{(g-z)}$, $\sigma^{(g-m)}$, $\sigma^{(m-z)}$ – поверхневий натяг на межі поділу фаз включення – газ, включення – метал та метал – газ, відповідно $m Дж/м^2$; $\theta^{(g-m)}$ – крайовий кут змочування на межі поділу фаз включення – метал; $A^{(m-z)}$, $A^{(g-z)}$ – площа границі поділу фаз метал – газ та включення – газ, відповідно, $м^2$. Зміна енергії Гіббса у таких системах завжди негативна.

Включення, що утворилися в сталі, можуть укрупнюватися завдяки коагуляції неметалевих включень, за рахунок зменшення поверхні, а отже, вільної енергії [7–8]:

$$-dG = \sigma^{g-m} \cdot d\omega \quad (2)$$

де $d\omega$ – зміна поверхні в процесі коагуляції. Тому цей процес протікає спонтанно.

Для неметалевих включень у сталі основним механізмом укрупнення є ортокінетична коагуляція, що протікає за наявності градієнта швидкості у напрямку поперек потоку.

Видалення з металу утворених включень зводиться до їхнього переміщення в об'ємі металу і залежить від їх розмірів, густини, в'язкості металу і описується приблизно рівнянням, виведеним із закону Стокса. Відповідно до закону Стокса опір руху сферичного тіла в рідині, обумовлений в'язкістю останньої [6].

Швидкість руху неметалевих частинок залежить від структури адсорбційного шару. Наявність дифузійної будови адсорбційного прикордонного шару призводить до ковзання, що проявляється у порушенні законів гідродинаміки. Це [7] відповідно до Б. В. Дерягіну призводить до дифузіофоретичного руху частинок за наявності в середовищі градієнта хімічного потенціалу поверхнево-активної речовини.

Така різниця поверхневого натягу викликає додаткові зусилля, що діє на включення, що рухається. Величина цього зусилля чисельно дорівнює різниці капілярних тисків у хвостовій і лобовій частинах включення, що рухається [9], тобто.

$$f_A = P_{\sigma,l} - P_{\sigma,x} \quad (3)$$

$$f_A = \frac{2\sigma_l}{\Gamma} - \frac{2\sigma_x}{\Gamma} = \frac{2}{\Gamma} \Delta\sigma$$

де $P_{\sigma,l}, P_{\sigma,x}$ – капілярний тиск відповідно передньої та задньої частини включення, Па; Γ – надлишок розчиненої речовини у поверхневому шарі, моль·см⁻²; σ_l, σ_x – поверхневих натяг частин неметалевих включень, мДж·м⁻²; $\Delta\sigma$ – зменшення поверхневого натягу, що викликано адсорбцією, мДж·м⁻².

Звідси значення швидкості спливання із сталі включення сферичної форми:

$$U_A = \frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho_m - \rho_a}{\eta} + \frac{1}{3} \frac{\Delta\sigma}{\pi r^2} \quad (4)$$

З урахуванням викладеного, швидкість спливання включень у сталі також має дещо перевищувати розраховану за рівнянням Стокса.

Виходячи з розглянутих теоретичних принципів можна зробити наступний висновок, що рушійним фактором видалення неметалевих включень у практичних умовах є укрупнення частинок за рахунок ортокінетичної коагуляції з одночасною подачею до шлакового покриву, де вони асимілюються шлаком.

За даними [10, 11] інтенсифікації цих процесів сприяє збільшення резидентного часу, що визначається наступною залежністю:

$$\tau = (-0,38 + 8,64\alpha - 44\alpha^2 + 67,18\alpha^3) \cdot \beta^{-0,61} \Phi^{3,04} \cdot Fr^{-0,08}$$

де $\alpha = \frac{W}{L}$; $\beta = \frac{H}{L}$; $\Phi = \frac{l}{L}$; L, W, H – довжина, ширина та висота проміжного ковша відпо-

відно, m ; l – відстань від випускного стакану, m ; Fr – число Фруда.

Рівняння (5) показує, що для збільшення резидентного часу необхідно збільшувати об'єм проміжного ковша і збільшувати розміри виходів, де потоки можуть мати незначні швидкості, достатні для здійснення необхідної тривалості контакту з шлаком включення.

Таким чином, ванна проміжного ковша з гідродинамічної точки зору повинна бути гасителем швидкості потоків, що створюється вимушеною конвекцією.

Довжина проміжного ковша визначається довжиною камери роздавання. Вона залежить від конструкції перегородок, а також кутів нахилу переточних каналів.

Ґрунтуючись на зазначених вище теоретичних принципах, з метою збільшення резидентного часу перебування неметалічних включень у ванні проміжного ковша, нами було проведено фізичне моделювання гідродинамічних потоків у роздавальній камері, що застосовується на ПАТ «Укрстальконструкція» у масштабі 1:3 та автоточності за числом Рейнольдса [10].

У якості робочої рідини, що моделює рідку сталь, використовували воду при температурі 18–25°C, оскільки значення в'язкості води і сталі в області температур позапечної обробки досить близькі один до одного. Як індикатори гідродинамічних потоків використовували кульки полістиролу густиною 0,9–1,1 г/см³. Витрата газу, становив 0,1–0,6 л/хв, а води 1,43 · 10 – 3 м³/хв. Процеси перемішування, що спостерігалися, фіксувалися за допомогою цифрової відеокамери. Підсвічені точковим джерелом світла індикатори відбивали світло і ставали видимими на темному тлі. Це дозволяло візуально спостерігати виразну картину їхнього перерозподілу. При цьому в ході експериментів виконували оцінку траєкторії руху частинок у рідкій ванні проміжного ковша.

Моделюванням встановлено, що з погляду видалення з рідкої сталі неметалевих включень у проміжних ковшах найбільш ефективною є вихороподібна структура, що забезпечує створення умов для коагуляції та видалення неметалевої фази.

Візуальними критеріями тієї чи іншої гідродинамічної системи з погляду видалення неметалевих включень були: кути розташування каналів у перегородці; розміри зони вихроутворення.

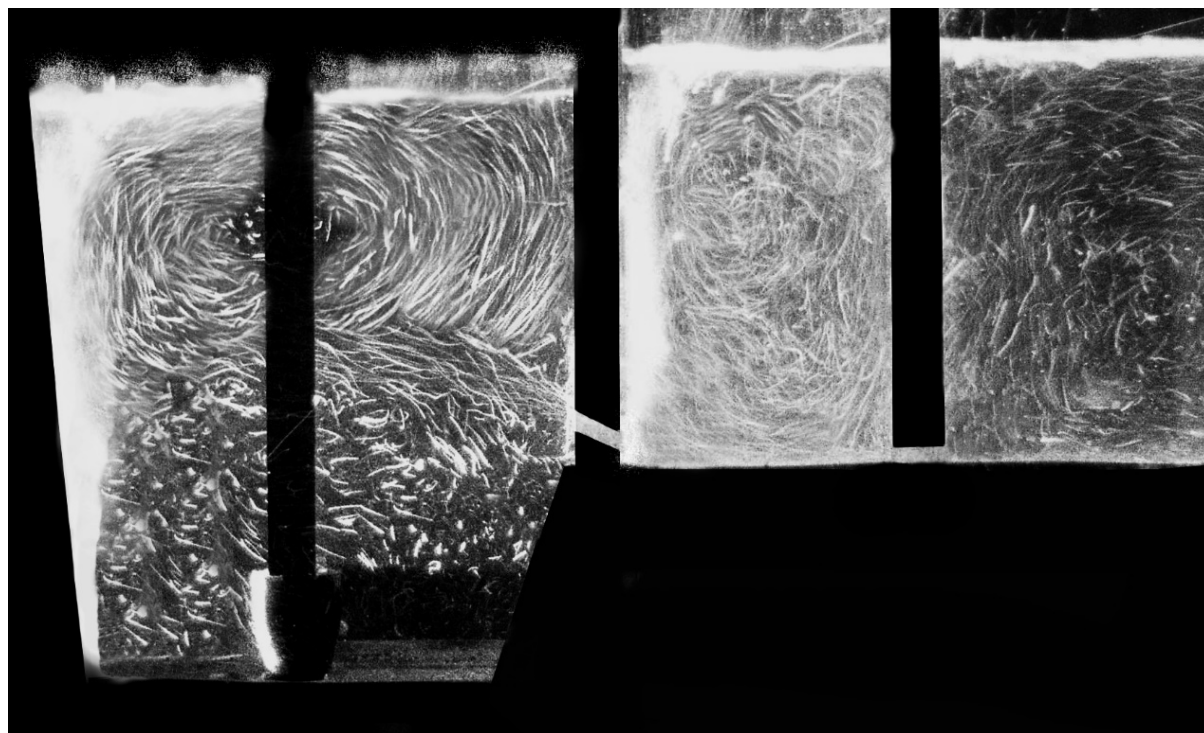


Рис. 1. Схема розповсюдження потоків при встановленні додаткової перегородки у поєднанні з продуванням металу через багатоканальну фурму великої протяжності

Моделльні експерименти показали, що найкращих результатів можна досягти, якщо проміжний ківш буде обладнаний додатковою реакційною камерою. При цьому гідродинаміка проміжної ємності забезпечувала наявність ефективних вихороподібних структур, як у реакційній, так і роздатковій камері, що у свою чергу збільшувало резидентний час перебування індикаторів неметалевих включень за рахунок їх затримки додаткової реакційної камери.

Продувна фурма розташовувалась усередині камери біля перегородки з боку роздавальної камери. Така конструкція забезпечувала створення спрямованого потоку рідини, що утворює дві вихрові гідродинамічні циркуляційні структури. Одна з них утворювалася у реакційній камері, а інша – у роздавальній (рис. 1). Моделльні експерименти показали, що така конструкція проміжного ковша забезпечує збільшення часу перебування імітаторів неметалевих включень у 4–6 разів більше, ніж це має місце за існуючої конструкції проміжного ковша.

Метою промислових випробувань було підтвердження ефективності рафінування проміжних ковшів, обладнаних реакційними камерами. При проведенні промислових випробувань одна з перегородок була дослідною іншою порівняльною. Порівняльна перегородка була обладнана

трьома рядами каналів з різними кутами нахилу, що використовується в даний час. Оцінку ефективності роботи тієї чи іншої схеми розташування каналів у перегородці проводили шляхом порівняння ступеня забрудненості металу неметалевими включеннями. Вміст неметалевих включень по пробах, відібраних із кристалізаторів дослідного і порівняльного рівняків, визначали металографічним методом Л.

За результатами проведених досліджень забрудненості металу неметалевими включеннями (табл. 1) слід відзначити високий рівень ефективності розробленої технології, що свідчать зниження вмісту неметалевих включень загалом на 30–40%.

Висновки. В результаті проведених досліджень теоретично встановлені умови збільшення резидентного часу перебування частинок неметалевих включень у ванні проміжного ковша. Фізичне моделювання довело, що найкращі умови для створення вихороподібної структури спостерігаються при встановленні додаткової перегородки та утворення реакційної камери. Промислові випробування довели, що ефективність використання реакційної камери у поєднанні з продувкою металу інертним газом. Ефективність видалення неметалевих включень становила 30–40%.

**Забрудненість металу дослідного та порівняльного струмків на кшталт включень,
сталі марки К – 60**

Тип включень		2 – й рівень якості металу у відповідності ТТ 232-60-2005: СНД ср.б. $\leq 2,5$; макс. б. ≤ 4		
			Порівняльний метал	Дослідний метал
Сульфіди макс.б.		ср.б.	0,23	0,13
		0,36	0,33	
Оксиди	ОС	ср.б.	0	0
		макс.б.	0	0
	ОГ	ср.б.	0	0
		макс.б.	0	0
	СХ	ср.б.	2,18	1,25
		макс.б.	3,08	1,56
Силікати	СП	ср.б.	0	0
		макс.б.	0	0
	СНД	ср.б.	3,37	2,38
		макс.б.	3,82	3,08

Список літератури:

1. Huang, J., Yuan, Z., Shi, S. Flow characteristics for two-strand tundish in continuous slab casting using PIV. *Metals*. 2019. № 9. P. 41–52.
2. Gushchin, V.N. 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.
9. Solhed, H., Jonsson, L., and Jönsson, P., A theoretical and experimental study of continuous-casting tundishes focusing on slag-steel interaction, *Metall. Mater. Trans. B*. 2002. Vol. 33. № 2. P. 173–185.
10. Linzer, B., Rimnac, A., Bragin, S., and Yang, B., AHSS production with Averdi ESP: a new door of opportunity opens, Proc. METEC Conf. and Trade Fair and 2nd European Steel Technology and Application Days (ESTAD), Düsseldorf, June 15–19, 2015, Düsseldorf, 2015. P. 290.
11. Brooks, G., Pan, Y., Subagyo, and Coley, K., Modeling of trajectory and residence time of metal droplets in slag-metal-gas emulsions in oxygen steelmaking. *Metall. Mater. Trans. B*. 2005. Vol. 36. № 4. P. 525–535.

Yefimova V.G., Smirnov Yu.O. REFINING OF STEEL IN THE TUNDISH WITH A REACTION CHAMBER

The work shows that in the process of pouring steel through tundishes, it is necessary to reduce the content of non-metallic inclusions. It is shown that the design of the tundish significantly affects the quality of the finished product, namely the content and distribution of non-metallic inclusions in the finished product.

Analysis of literary sources has proven that the content of non-metallic inclusions must be controlled before pouring the finished product.

The change in the free energy of the system is shown when a non-metallic particle is removed. It is established that the chemical potentials and surface tension of the metal practically do not change when non-metallic inclusions come out onto the surface of the melt.

It is established that metallurgical suspensions and emulsions without chemical processes, dissolution and changes in adsorption conditions in the process of surfacing to the metal-gas phase interface are unstable disperse systems, since the change in Gibbs energy is always negative.

It is shown that for non-metallic inclusions in steel, the main mechanism of coarsening is orthokinetic coagulation, which occurs in the presence of a velocity gradient in the direction across the flow.

It is determined that the speed of movement of non-metallic particles depends on the structure of the adsorption layer. The presence of a diffusion structure of the adsorption boundary layer leads to sliding, which manifests itself in a violation of the laws of hydrodynamics.

An equation is established to determine the resident time of a particle of a non-metallic inclusion in the tundish bath. It is shown that to increase the resident time, it is necessary to increase the volume of the tundish and increase the size of the vortices, where the flows can have insignificant velocities sufficient to provide the required duration of contact with the slag of the inclusion.

Physical modeling of the metal refining processes in the tundish equipped with partitions and inert gas purging through a long lance was carried out on a cold model.

A study on a physical model showed that, from a hydrodynamic point of view, the tundish bath should be a damper for the flow velocity created by forced convection.

It was determined that the length of the tundish is determined by the length of the distribution chamber. It depends on the design of the partitions, as well as the angles of inclination of the flow channels.

In the modeling process, the best results were shown by the designs of reaction chambers consisting of two solid partitions with slotted channels at the bottom of the ladle. This design ensured the creation of a directed flow of liquid, which forms two vortex hydrodynamic circulation structures. One of them was formed in the reaction chamber, and the other in the distribution chamber.

Model experiments showed that this design of the tundish provides an increase in the residence time of non-metallic inclusions simulators by 4–6 times more than is the case with the existing design of the tundish.

The effectiveness of using reaction chambers in the tundish bath in combination with inert gas purging of the metal under production conditions has been proven.

Industrial experiments and metallographic studies have shown that there is a 30–40% reduction in the content of non-metallic inclusions.

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