

Єфімова В.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пилипенко Т.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ УМОВИ ВИДАЛЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ІЗ РОЗПЛАВУ СТАЛІ ПРИ ЇЇ БЕЗПЕРЕРВНОМУ РОЗЛИВАННІ

Перехід неметалевих включень на межу поділу фаз метал-шлак у проміжному ковші відбувається за рахунок поверхневих явищ у системі метал-шлак-неметалеві включення. Це обумовлює визначення основних термодинамічних характеристик фізико-хімічних процесів, що перебігають у проміжному ковші.

Одною з головних вимог, що висувається до якості безперервнолитого металу є низький вміст неметалевих включень у готовому продукті та рівномірний їх розподіл по перетину сталеві заготовки. У статті розглянуто основні фізико-хімічні умови видалення неметалевих включень з розплаву сталі у проміжному ківші при продуванні його інертним газом крізь багатоканальні фурми великої довжини. Відомо, що найкращі умови ефективного видалення неметалевих включень створюються при продуванні рідкого металу інертним газом.

У роботі розглянуто теоретичні, лабораторні та промислові дослідження ефективності видалення неметалевих включень з металу, що безперервно рухається у ванні проміжного ковша. Це дозволило визначити раціональні значення інтенсивності продування рідкого металу, що забезпечує оптимальний розмір газових пухирів та витрати інертного газу.

У якості методів дослідження було використано термодинамічний аналіз двох фаз, що не змішуються (метал-шлак), у процесі видалення неметалевих включень за рахунок прикріплення їх до газових пухирів. Для підтвердження теоретичних розрахунків авторами було проведено фізичне моделювання гідродинамічних процесів, що відбуваються у проміжному ковші в процесі розливання рідкого металу. Дані теоретичних досліджень та фізичного моделювання підтверджено промисловими випробуваннями.

У результаті проведених досліджень було встановлено, що продування рідкого металу інертним газом забезпечує видалення як дрібних включень, розміром 10-20 мкм, так і включень, що мають розмір більш 50 мкм. Найбільший ефект рафінування може бути досягнутий за рахунок застосування багатоканальної продувної фурми великої довжини, яка може забезпечити продування всього об'єму роздавальної камери проміжного ковша.

Показано, що найбільш ефективні умови рафінування металу при продуванні аргонем спостерігаються при створенні пухиркового режиму продування. Промислові випробування підтвердили дані теоретичних розрахунків та гідродинамічного моделювання.

Ключові слова: проміжний ківш, безперервне розливання, неметалеві включення, шлак, продувальна фурма, поверхневі явища.

Постановка проблеми. Відомо, що одним із найважливіших показників якості сталі є її забруднення неметалевими включеннями різного розміру та складу. Ця неметалева фаза утворюється у процесах позапічної обробки та безперервному розливанні сталі та безпосередньо пов'язано з поведінкою кисню, що знаходиться у металі, шлаку та футеровці сталеплавильних пристроїв, а також у процесах вимушеного перемішування та технологічних переливаннях металу [1, 2]. Літературні джерела свідчать, що ефективно видалення неметалевої фази відбу-

вається при продуванні її інертними газами [3]. Отже дослідження фізико-хімічних процесів, що відбуваються в процесі продування рідкого металу інертним газом є важливим етапом у процесі отримання якісної сталеві продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз досліджень, які присвячені отриманню якісної безпервнолитої заготовки свідчить, що у проміжному ковші необхідно додатково встановлювати пороги та перегородки різної конструкції, з метою створення раціонального руху металу [4, 5]. Положення перегородок та порогів

обирається індивідуально для кожної конструкції проміжного ковша та залежить від цілого ряду факторів, що оптимізують цей процес [6]. Для більш глибокого рафінування сталі від неметалевих включень додатково застосовується продування металу інертним газом, через пристрої, що встановлюються на дні проміжного ковша.

Слід зауважити, що перехід неметалевої фази на межу поділу метал-шлак у проміжному ковші визначається поверхневими явищами, що мають місце у системі розплав сталі – шлак – неметалеve включення. В дослідженнях, що були проведені раніше [4-6] не враховували вплив термодинамічних аспектів видалення неметалевих включень у проміжному ковші, а також вплив цих факторів на гідродинамічну ситуацію, що створюється у ємності проміжного ковша.

Постановка завдання. Метою досліджень було підвищення якості металу, що розливається безперервним методом. Для цього авторами було проведено термодинамічний аналіз процесів, що відбуваються при продуванні рідкого металу інертним газом, моделювання гідродинамічних процесів на прозорій моделі і підтвердження даних наукових досліджень промисловими випробуваннями.

Виклад основного матеріалу дослідження. Видалення неметалевих включень з розплаву сталі при продуванні інертним газом відбувається за рахунок закріплення їх на пухирі на межі поділу фаз метал-газ. Відомо, що час, за який неметалеve включення переходить границю поділу метал – газ становить 10^{-4} – 10^{-6} с. Це означає, що будь-яке зіткнення неметалевої частинки з пухирем аргону, в незалежності від складу та гідродинамічних умов, повинно призводити до закріплення неметалевої фази, значного зниження вмісту неметалевих включень у готовому продукті.

Видалення неметалевої фази з розплаву металу у проміжному ковші відбувається за рахунок флотації суспензії розплав металу – неметалеві включення пухирями, що спливають, та укрупнення їх у струменях, які утворилися. Час τ , за який відбувається укрупнення монодисперсної частинки суспензії розплав металу-неметалеve включення можна визначити як [3]:

$$\tau_{sp.} = \frac{2,44 \cdot 10^{-4}}{n_0 r^3} \cdot Q \sqrt{\frac{R}{1 + \frac{U}{Q}}} \quad (1)$$

де n_0 – кількість частинок неметалевих включень; r – радіус частинок, *мм*; R – радіус пухи-

рів, що спливають, *мм*; Q – витрати газу $\frac{л}{мин}$; U – швидкість руху металу, $\frac{м}{мин}$.

Виходячи з цієї залежності можна зробити висновок, що час, за який укрупнюється частинки неметалевих включень, лінійно зменшується зі зменшенням розміру пухирей та зі зростанням витрат інертного газу. За час інтенсивного продування, який охоплює весь об'єм рідкої ванни встановлюється режим однорідної ізотропної турбулентності, за якої укрупнення дисперсійної фази відбувається швидше. Це означає, що продування металу інертним газом з метою його рафінування необхідно вести у режимі дрібних пухирів, які будуть рівномірно розповсюджуватись по об'єму розплаву.

Стійкість дисперсної системи, якою є розплав сталі, в умовах, коли відбувається процес коагуляції, визначається поведінкою тонких плівок середовища, що розділяє частинки [7]. Якщо прийняти, що агрегація неметалевих включень між собою та їх перехід на поверхню газового пухиря відбувається після зменшення та розриву плівок, то стійкість плівок буде визначатися тиском, що розклинює [8]:

$$P = P^{vac.} - P^{пл.} = P^{пвз.} - P^{пл.} = - \frac{\partial(\sigma^{vac.-пл.} - \sigma^{пвз.-пл.})}{dl}; \quad (2)$$

де $P^{vac.}$, $P^{пл.}$, $P^{пвз.}$ – тиск у фазах неметалеve включення, плівка, газовий пухир, *Па*; $\sigma^{vac.-пл.}$; $\sigma^{пвз.-пл.}$ – поверхневий натяг на межі поділу фаз частинка – плівка, пухир – плівка, $\frac{Дж}{м^2}$; l – товщина плівки, що розділяє, *м*. За даними [7] можливість процесу виходу частинки неметалевого включення на міжфазну границю поділу фаз визначається наближеним критерієм Z :

$$Z = 0,5\sigma^{\rho-m} + P \cdot l, \quad (3)$$

де $\sigma^{\rho-m}$ – поверхневий натяг на межі поділу фаз газ-метал, $\frac{Дж}{м^2}$.

Виходячи з цих залежностей можна зробити висновок, що можливість укрупнення включень, агрегації їх з газовими пухирями та перехід у шлакову фазу визначається кінетикою розриву плівки металу.

Вірогідність прикріплення пухиря до частини неметалевої фази $P_{np.}$ зростає за умов зменшення розмірів пухиря та зростання розміру частинок та описується рівнянням Навье – Стокса [7]:

$$P_{np.} = \frac{2u_n D}{9(u_q + u_n) Y} \left(\frac{d_u}{d_n} \right) \left[\sqrt{(X + C)^2 + 3Y^2} + 2(X + C) \right]^2 \quad (4)$$

де d_u и d_n – діаметр частини та бульбашки, м; u_n – швидкість спливання бульбашки, м/с; X, Y, C, D – параметри, що не мають одиниць виміру, які визначаються з наступних співвідношень:

$$X = \frac{3}{2} + \frac{9 \text{ Re}}{32 + 9,888 \text{ Re}^{0,694}}; Y = \frac{3 \text{ Re}}{8 + 1,736 \text{ Re}^{0,694}};$$

$$C = \frac{u_u}{u_n} \left(\frac{d_n}{d_u} \right)^2; D = \frac{\sqrt{(X + C)^2 + 3Y^2} - (X + C)}{3Y}.$$

Рішення рівняння (4) підтвердило, що вірогідність зіткнення збільшується при зменшенні розміру бульбашки аргону та зростання розміру частинок неметалевої фази. Ефективність видалення неметалевих включень ε може бути визначена з наступного виразу:

$$\varepsilon = (1 - e^{-K\tau}) \cdot 100 \quad (5)$$

де τ – час перебування рідкої сталі у проміжному ковші при продуванні аргонном; K – константа, що визначається за формулою:

$$K = \frac{3U_e P_{np} T_C}{2d_n T_0} \quad (6)$$

де U_e – швидкість подавання інертного газу до одиниці площі $\frac{M^3}{c \cdot M^2}$; T_C и T_0 – відповідно температура сталі та температура газу у газорідному потоці, К; d_n – діаметр бульбашки, м.

Результати розрахунків, що були проведені за рівнянням (5) для неметалевих частинок діаметром 20–40 мкм, показали, що висока ефективність видалення неметалевих включень спостерігається у випадку, коли діаметр бульбашки лежить в діапазоні 1–3 мм, а час перебування металу у проміжному ковші становить 240–720 с. З урахуванням умов, що отвори, з яких виходить газ, не змочуються металом та мають визначений розмір, діаметр бульбашки можна визначити як [7]:

$$d_n = \left[\frac{3\sigma_p d_{n,0}}{\rho_p g} N'_C + \left(\frac{9\sigma^2 d_{n,0}^2}{\rho_p^2 g^2} N'_C + \frac{10Q^2 d_{n,0}}{g} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (7)$$

де $d_{n,0}$ – зовнішній діаметр каналу, з якого виділяється газ, м; g – прискорення сили тяжіння $\frac{M}{c}$; δ_p и ρ_p – відповідний поверхневий натяг, $\frac{Дж}{m^2}$ та густина розплаву сталі, $\frac{кг}{m^3}$;

$$N'_C = \frac{4\rho_p g}{\pi d_{n,0}}$$

– константа, що залежить від загального об'єму системи, що підводить газ; Q – витрати газу, $\frac{л}{хв}$.

Розрахунки, що проведені за рівнянням (7), також показали, що діаметр бульбашки газу для продування металу інертним газом повинен бути в межах 1–3 мм.

Для оцінки ефективності видалення неметалевих включень залежно від режимів продування ванни рідкого металу у проміжному ковші було проведено дослідження розповсюдження потоків металу у проміжному ковші на фізичній моделі.

Проведення досліджень по видаленню неметалевих включень з розплаву сталі у проміжному ковші було здійснено на фізичній моделі (рис. 1). Модель було виконано з прозорого матеріалу у масштабі 1:4. В якості базових критеріїв подібності були прийняті критерій Фруда та критерій Рейнольдса.

У якості рідини, що імітувала розплаву сталі, застосовували воду, для імітації шлаку на поверхню металу наводили шар силіконової олії. Це дозволяло вивчати процес виходу бульбашок газу, що вдувається на поверхню рідкої ванни. Візуалізацію потоків проводили за рахунок забарвлення кольоровими чорнилами локальних об'ємів води, яка поступає у модельний пристрій. Рух конвективних потоків рідини у проміжному ковші фіксували за допомогою цифрової відеокамери.

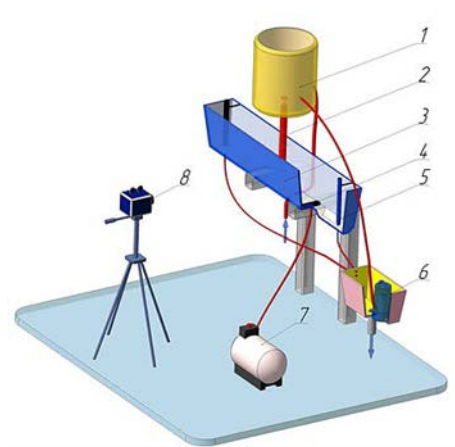


Рис. 1. Схема модельного стенда проміжного ковша: 1 – ємність, що імітує розливальний ківш; 2 – захисна труба; 3 – проміжний ківш; 4 – продувальний пристрій; 5 – стопор; 6 – ємність для збору води, що витікає з проміжного ковша; 7 – компресор; 8 – цифрова відеокамера

Для кількісної оцінки видалення неметалевих включень у проміжному ковші у захисну трубу вводили спеціальну суміш гідрофобних частинок, масою 200 грамів. У ході експерименту оцінювали траєкторію руху частинок у рідкій ванні проміжного ковша, а також оцінювали долю частинок, що були асимільовані шлаком. Для цього, рідину, що витікає з проміжного ковша збирали у ємність та

відстоювали на протязі двох-трьох годин для того, щоб речовина, яка імітує неметалеві включення, повністю сплила на поверхню. Після цього імітатор збирали та зважували. Кожний експеримент проводили три рази. Ефективність відділення неметалевих включень визначали за формулою:

$$E = \frac{M - m}{M} \cdot 100(\%) \quad (8)$$

де M – маса гідрофобних частинок на початок експерименту, г; m – маса гідрофобних частинок на кінець експерименту, г.

Для вдування повітря у рідку ванну проміжного ковша застосовували продувальні пристрої, що встановлювалися на дні розливальної ємності. Вони забезпечували утворення дрібних пухирів. При цьому важливим фактором, що забезпечував інтенсивність вдування газу, була поведінка шлаку, що знаходився на поверхні металу. Тому в процесі фізичного моделювання контролювали поведінку шлаку та фіксували ситуації, що призводили до його розриву та оголенню поверхні рідини.

Результати моделювання наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Оцінка ефективності видалення неметалевих включень з проміжного ковша при продуванні його інертним газом на фізичній моделі

№ п/п	Обладнання проміжного ковша	Витрати газу, л/хв	Резидентний час, с	Ефективність видалення, %
1	Без продування інертним газом	-	35	20-25
2	Продування інертним газом	6-9	74	45-60
3	Продування інертним газом	10-12	115	92-94
4	Продування інертним газом	13-16	140	65-75

Результати досліджень свідчать, що загальна ефективність видалення неметалевих включень на фізичній моделі для даної конструкції проміжного ковша становить 45–94% залежно від витрат газу, що вдується. Результати свідчать, що максимальний ефект спливання та видалення неметалевих включень спостерігається при витратах газу у межах 10–12 л/хв. При таких витратах поверхня води у проміжному ковші не оголюється від масла.

Порівняльний аналіз ефективності видалення неметалевих включень з розплаву сталі у про-

цесі її продування інертним газом був здійснений у промислових умовах конвертерного цеху ОАО МК «Азовсталь» на 60-тонному проміжному ковші. Вибір схем розташування продувальних пристроїв був здійснений у відповідності результатів фізичного моделювання. Продувальний пристрій встановлювався у дні проміжного ковша. Його довжина становила 1000 мм, поперечний перетин (70x80) мм, та була обладнана 30 каналами, що виділяли газ, діаметр окремого каналу становив 1,5–2 мм. Продування проводили при витратах газу 10–12 л/хв.

Оцінку ефективності продування металу інертним газом проводили шляхом порівняння ступеня забруднення металу неметалевими включеннями. Вміст неметалевих включень з проб розплаву, які відбирали з кристалізаторів, визначали металографічним методом Л на мікроскопі «Неофот – 2».

Таблиця 2

Забруднення металу за типом неметалевих включень сталі марки К – 60

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

Результати досліджень показали, що застосування продувки металу інертним газом призводить до зниження неметалевих включень в середньому на 30–40%.

Висновки. У результаті проведеної роботи теоретичні розрахунки показали, що діаметр пузиря інертного газу при його продуванні повинен бути у межах 1–3 мм. Дані фізичного моделювання свідчать, що витрати інертного газу при продуванні металу у проміжному ковші повинні бути в межах 10–12 л/хв, оскільки за низьких витратах, знижується ефект рафінування, а за високих – спостерігається розрив шару масла,

що імітує шлак та в промислових умовах призведе до додаткового забруднення металу неметалевими включеннями. Промислові випробування підтвердили дані теоретичних досліджень

та фізичного моделювання і показали, що при продуванні рідкого металу інертним газом спостерігається зниження вмісту неметалевих включень на 30–40%.

Список літератури:

1. Gushchin V.N. Improved tundish refining of steel in continuous-casting machines. Steel in Translation. 2017. №5. P. 320–324.
2. Yang G. Influence of Reoxidation in Tundish on Inclusion for Ca-Treated Al-Killed Steel. Steel research international. 2013. №5. P.784–792.
3. Holappa L.E. Role of slags in steel refining: Is it really understood and fully exploited. Revue de Métallurgie. 2009. № 1. P. 9–20.
4. Janiszewski K. Refining of Liquid Steel in a Tundish Using the Method of Filtration During its Casting in the CC Machine Metalurgija. 2013. № 1. P. 71–74.
5. Mabentsela A. Numerical and physical modelling of tundish slag entrainment in the steelmaking process Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy 2017. № 5. P. 469–483.
6. Минаев Ю.А., Яковлев В.В. Физико-химия в металлургии. Москва, 2001. 320 с.
7. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муляр В.М. Поверхностные силы. Москва, 1986. 398 с.

Yefimova V.G., Pilipenko T.M. PHYSICO-CHEMICAL CONDITIONS FOR THE REMOVAL OF NON-METALLIC INCLUSIONS FROM THE MELT IN THE TUNDISH

This paper reviews theoretical, laboratory, and industrial studies of the removal efficiency of non-metallic inclusions from metal moving in an intermediate bucket bath. This allowed us to determine the rational values of the purge intensity of the liquid metal, which ensures the optimal size of gas bubbles.

The transition of non-metallic inclusions to the interface of the phase separation of metal-slag in the intermediate ladle occurs due to the interphase phenomena in the system metal-slag-inclusion. This determines the basic thermodynamic characteristics of the physico-chemical processes flowing in the intermediate ladle. It is known that steel melt is a heterogeneous system where the dispersion medium is a metal melt and the dispersion phase is non-metallic inclusions. This means that the basic laws of thermodynamics can be applied to such a system. The transition of non-metallic inclusions of the metal-slag phase boundary in the intermediate ladle is determined by surface phenomena in the melt-slag-non-metallic inclusion system.

One of the main requirements for the quality of continuous cast metal is the low content of non-metallic inclusions in the finished product and their uniform distribution along the cross section of the steel billet. The article deals with the basic physicochemical conditions of removal of nonmetallic inclusions in the melt of steel in the intermediate ladle when blowing it with inert gas through multichannel tufts of long length. It is known that the best conditions for effective removal of non-metallic inclusions are created by blowing the liquid metal with inert gas. This paper reviews theoretical, laboratory, and industrial studies of the removal efficiency of non-metallic inclusions from metal moving in an intermediate bucket bath. This allowed us to determine the rational values of the purge intensity of the liquid metal, which ensures the optimal size of gas bubbles.

Thermodynamic analysis of two immiscible phases (metal-slag) was used as the research methods in the process of removing non-metallic inclusions by attaching them to gas bubbles. In order to confirm the theoretical calculations, a physical simulation of the hydrodynamic processes occurring in the intermediate ladle during the pouring of liquid metal was carried out. To confirm theoretical studies and physical modeling, industrial tests were conducted to determine the content of non-metallic inclusions in metal by known metallographic methods.

As a result of the studies, it was found that the purging of the liquid metal with inert gas allows the removal of both small inclusions of 10-20 microns in size and inclusions of more than 50 microns in size. The greatest effect of refining can be achieved by the use of multi-channel purlins of long length, which can ensure the purging of the entire volume of the dispensing chamber of the intermediate bucket. It is shown that the most effective conditions of metal refining when blowing with argon are observed when creating a bubble blowing mode.

Key words: *intermediate ladle, continuous casting, non-metallic inclusions, slag, blow-out tuft, interphase phenomena.*