

Рубан В.О., Стоянов О.М., Мусійко В.І., Шашкин Т.А., Марко А.Ф.
Дослідження гідродинамічних процесів ковшової ванни
при продувці через донні дуттьові пристрої

Ruban V.O., Stoyanov O.M., Musiko V.I., Shashkin T.A., Marko A.F.
Investigation of hydrodynamic processes of a ladle bath
when blown through bottom blower devices

Об'єкт дослідження – гідродинамічні процеси ковшової ванни при продувці через донні дуттьові пристрої. Мета дослідження – встановлення основних принципів формування барботажної зони і її впливу на шар шлаку, а також оцінка ефективності видалення неметалевих включень при позапічній обробці сталі на установці «ківш-піч». Досліджено стан питання позапічної обробки сталі на установці «ківш-піч», який показав, що на ефективність роботи даного агрегата має значний вплив продувка включаючи розташування донних продувних блоків та інтенсивність масоперенесення. Спираючись на проведений аналіз літературних джерел, розроблено методику експерименту та створено лабораторну установку для проведення фізичного моделювання на холодній моделі. Створено математичні моделі на основі яких може бути описано вплив технологічних факторів таких як: режими продувки, розташування дуттьових пристроїв, висота шлаку, на витрати нейтрального газу і в свою чергу на зміну матеріало- та енергоємності сталі при позапічній обробці. Визначено, що збільшення інтенсивності продувки призводить до зростання ефективності видалення неметалевих включень за рахунок більшої барботажної зони, зокрема, відсоток видалених включень зростає від 8% при 100 л/хв до 22% при 800 л/хв витрат газу. Окрім того, описано вплив різних параметрів, таких як розташування продувних блоків, на взаємодію газового потоку з металом і шлаком, а також їх вплив на утворення продувної плями і температуру металеві ванни. Результати фізичного моделювання і математичні моделі дозволяють оптимізувати процеси позапічної обробки сталі, що сприяє покращенню якості готової продукції.

Ключові слова: установка «ківш-піч», продувна пляма, фізичне моделювання, барботажна зона, продувка інертним газом.

The object of study is the hydrodynamic processes of the ladle bath during blowing through bottom blowers. The purpose of the study is to establish the basic principles of the bubbling zone formation and its effect on the slag layer, as well as to evaluate the efficiency of non-metallic inclusions removal during out-of-furnace steel treatment at the ladle-furnace unit. The state of the art of out-of-furnace steel treatment at the ladle-furnace unit has been studied, which has shown that the efficiency of this unit is significantly influenced by blowing, including the location of bottom blower blocks and the intensity of mass transfer. Based on the analysis of the literature, an experimental methodology was developed and a laboratory setup for physical modeling on a cold model was created. Mathematical models have been created on the basis of which the influence of technological factors such as blowing modes, location of blowing devices, slag height on neutral gas consumption and, in turn, on changes in material and energy consumption of steel during out-of-furnace treatment can be described. It is determined that an increase in the blowing intensity leads to an increase in the efficiency of non-metallic inclusions removal due to a larger bubbling zone, in particular, the percentage of inclusions removed increases from 8% at 100 l/min to 22% at 800 l/min of gas flow. In addition, the influence of various parameters, such as the location of the blowdown blocks, on the interaction of the gas flow with metal and slag, as well as their impact on the formation of the blowdown spot and the temperature of the metal bath is described. The results of physical modeling and mathematical models make it possible to optimize the processes of out-of-furnace steel treatment, which contributes to improving the quality of finished products.

Keywords: ladle-furnace installation, blowout spot, physical modeling, bubbling zone, inert gas purge.

Вступ

Позапічна обробка металу є одним із ключових напрямів підвищення якості та покращення властивостей металопродукції масового призначення і ресурсозбереження в металургії. Одним з найбільш ефективних засобів зниження матеріало- та енергоємності сталі при обробці сталі на установці «ківш-піч» (УКП) є дотримання встановлених режимів продувки, які суттєво впливають на формування барботажної зони.

Продувка може здійснюватися різними методами, зокрема зверху або знизу через донні дуттьові пристрої. Більш поширеною в світовій практиці вважається продувка через донні дуттьові пристрої з різним їх місцем розташування. В залежності від

розташування продувних блоків змінюється взаємодія барботажної зони на границі метал-шлак, що в свою чергу впливає на утворення продувної плями, з подальшими втратами тепла.

Для забезпечення заданих параметрів гідродинаміки ковшової ванни продувці сталі, постає питання вибору розміщення донних дуттьових пристроїв та інтенсивності продувки. В зв'язку з цим виконання дослідження гідродинамічних явищ ковшової ванни при продувці через донні дуттьові пристрої, які направлені на встановлення основних принципів формування барботажної зони і її впливу на шар шлаку, а також на ефективність процесів видалення неметалевих включень при позапічній обробці сталі на УКП є досить актуальною задачею.

© Рубан В.О. – к.т.н., УДУНТ
Стоянов О.М. – к.т.н., доц. УДУНТ
Мусійко В.І. – УДУНТ
Шашкин Т.А. – УДУНТ
Марко А.Ф. – УДУНТ

Ruban V. – c.t.s., USUST
Stoyanov O. – c.t.s., docent USUST
Musiko V. – USUST
Shashkin T. – USUST
Marko A. – USUST



Аналіз літературних даних

Позапічна обробка сталі на установці «ківш-піч» є невід'ємним етапом при виготовленні високоякісних марок сталі, яка включає в себе процес продувки інертним газом для гомогенізації хімічного складу сталі і усереднення температури, що сприяє видаленню неметалевих включень. Відомо, що характер та інтенсивність руху сталі в ковші залежать від ряду параметрів продувки, які впливають на її ефективність, зокрема на ступінь гомогенізації металевої ванни [1].

Авторами роботи представлені результати промислових і лабораторних досліджень двофазового потоку, барботажної зони і розриву шлакового покриву при продувці рідкої сталі в ковші. Промислові дослідження проводилися в заводських умовах в 30-тонному ковші. Під час лабораторних досліджень використовувалася гідравлічна модель ковша (масштаб 1:4,5), причому витрати газу встановлювалися відповідно до критерію подоби Мортонна [2]. Альтернативні дослідження процесів перемішування і розривання шлакового покриву проведені авторами [3, 4]. При чому в якості критерію подоби було обрано критерій Фруда.

В роботі [5] приведені дані, щодо впливу розташування донних продувних блоків на ефективність рафінування сталі та прорив шлакового покриву в ковші, які мають негативний характер при позапічній обробці. Бульбашки газу, що барботують під час продування металевої ванни, сприяють рафінуванню. При збільшенні інтенсивності масоперенесення в ковші відбувається вирівнювання хімічного складу та температури в об'ємі металу. Для підвищення ефективності видалення неметалевих включень, на основі проведених досліджень, автори рекомендують конфігурацію продувних блоків з рівним розподілом потоку (1:1) та однаковим радіальним розташуванням сопел (0,7R/0,7R, 45 градусів), яка підходить як для низьких, так і для високих швидкостей потоку газу.

Авторами роботи [6] відмічено, що видалення неметалевих включень зі сталі при продувці інертними газами відбувається завдяки їх прикріпленню до бульбашки на межі метал-газ, а час необхідний для їх переходу через міжфазну межу метал-газ, може оцінюватися як $10^{-4} - 10^{-6}$ с. Це свідчить про те, що практично будь-яке зіткнення НВ з бульбашкою газу незалежно від її хімічного складу і гідродинамічних умов повинно приводити до прикріплення неметалевої фази до бульбашки.

На підставі проведених досліджень авторами [7 – 9] отримано дані які свідчать про більш ефективне видалення неметалевих включень під час продування знизу ніж при продувці фурмою зверху, причому при збільшенні кількості продувних блоків ефективність видалення включень також зростає. Це обумовлено тим, що більша кількість включень втягується в циркуляційний потік і переноситься в шлак. При чому, перші 2 хвилини видалення відбувається більш інтенсивно ніж

наступні, що пояснюється зменшенням кількості НВ та зворотним захопленням неметалевих включень в циркуляційний потік.

В роботах [10, 11] приведена оцінка впливу вдування аргону в розплавлену сталь на її чистоту, що визначається вмістом неметалевих включень при продуванні та без продування аргонном. Тривалість вдування аргону в сталь має дуже значний вплив на кінцевий вміст неметалевих включень. Короткий час вдування аргону або малий об'єм аргону може призвести до того, що кінцевий вміст включень може бути вищим, ніж на початку. Мінімальний час продувки аргонном, необхідний для зменшення вмісту неметалевих включень, становить 7 хвилин, а рекомендована витрата аргону – 10 літрів на хвилину.

Аналітичний огляд наведених вище робіт показав, що на ефективність усереднення хімічного складу та температури сталі, а також процесів рафінування від неметалевих включень значний вплив має спосіб підведення газів, інтенсивність його подачі і місця розташування донних продувних блоків. Крім того, вдування аргону в розплавлену сталь значно впливає на вміст НВ, що підкреслює важливість контролю за тривалістю та об'ємом вдування газу для досягнення бажаного кінцевого складу сталі. Тому актуальною задачею є проведення досліджень по вивченню гідродинамічних процесів, які відбуваються під час обробки сталі на УКП при продувці через донні дуттьові пристрої.

Підготовка до фізичного моделювання процесів гідродинаміки ковшової ванни при позапічній обробці сталі

Ключовим завданням при знаходженні чисел подібності для фізичного моделювання є вибір найбільш значущих параметрів, які впливають на досліджуваний процес. Виходячи з аналізу процесу та логічних міркувань складено сукупність з незалежних фізичних величин, які характеризують фізичну систему зразка, що моделюється. Виходячи з логічних міркувань прийнято, що на процес утворення продувної плями впливають: об'ємна витрата газу - q_g ; діаметр вставки - d ; товщина шлаку - $h_{шл}$; глибина ванни - $h_{ст}$; в'язкість рідини - ν ; поверхневий натяг - $\sigma_{ст}$; густина сталі - $\rho_{ст}$; густина шлаку - $\rho_{шл}$; густина газу - $\rho_{газ}$; прискорення вільного падіння - g .

Для моделювання обирали повнофакторний експеримент з варіюванням кожного параметру на трьох рівнях: нижньому, верхньому і нульовому. Кількість дослідів для експерименту з двома змінними параметрами для одного розташування пробок складає $n = 3^2$. Отже для двох варіантів розташування продувних блоків (один по центру і два на периферії).

Для проведення досліджень гідродинаміки ковшової ванни при продувці через донні дуттьові пристрої була створена лабораторна установка для холодного моделювання, яка зображена на рис. 1.

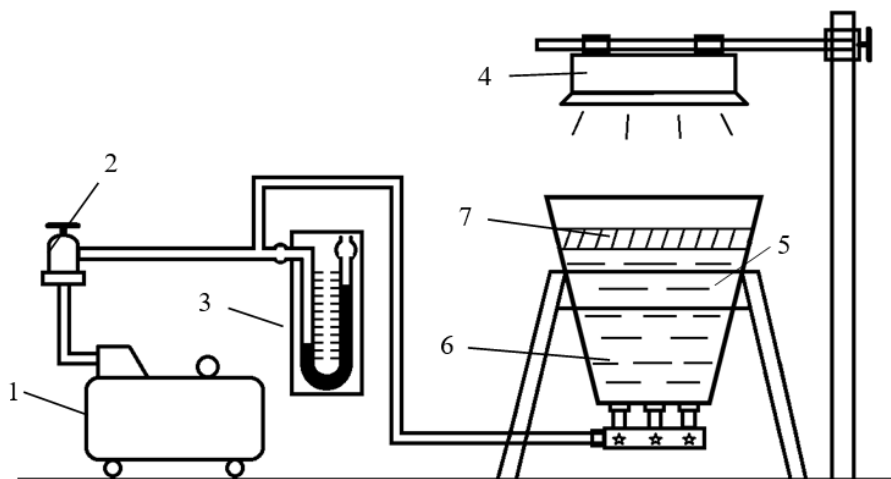


Рис. 1 – Схема експериментальної установки

Дослід проводився на лабораторному обладнанні кафедри металургії чавуну і сталі, яке складалося з: 1 – компресор, 2 – редуктор, 3 – водний манометр, 4 – лампа накаливання, 5 – модель установки «ківш-піч», 6 – рідина імітуюча метал, 7 – рідина імітуюча шлак.

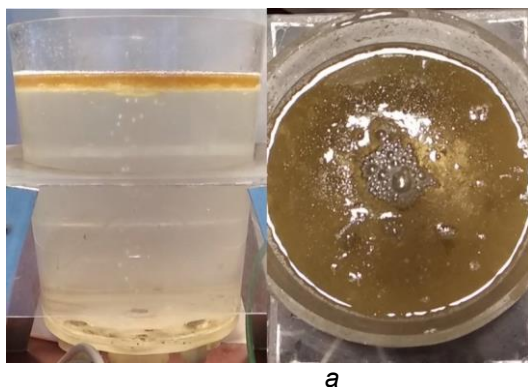
Досліди проводилися через два пористих продувних блока розташованих на периферії ковша, та через центральний продувний блок, зі зміненням товщини шлаку (8 мм, 9 мм, 10 мм) та режимів продувки: усереднююча 1,8 л/хв характерна для періоду нагріву металу, інтенсивна 2,6 л/хв – період десульфурації металу, та рафінуюча – 0,32 л/хв. Контролювалися наступні параметри: тиск газу, розташування продувних блоків, товщину шлаку та площу оголеної поверхні металу.

Характер взаємодії газового струменя з мета-

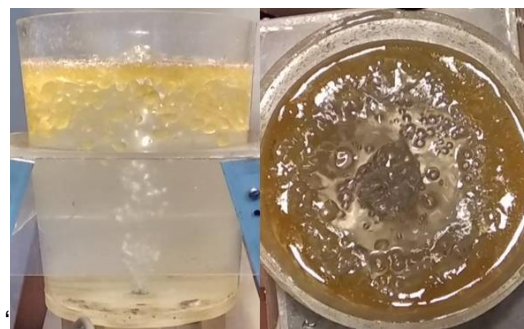
лом в ковші та гідродинамічні потоки вивчаються на моделях в умовах наближених до природи. При подачі дуття через пористі вставки, утворюються бульбашки, які під дією сили Архімеда спливають із розплаву, створюючи барботажну зону ванни, та оголення дзеркала металу на установці «ківш-піч».

Результати фізичного моделювання гідродинаміки ковшової ванни.

За результатами проведеного фізичного моделювання отримано відео файли які були розкадровані та проаналізовані за допомогою програмного продукту Adobe Photoshop. На рисунку 2 зображено вигляд моделі ванни при продувці через пористу вставку розташовану по центру ковша з мінімальними та максимальними витратами газу 0,32 і 2,6 л/хв.



а



б

Рис. 2 – Продувка сталі через пористу вставку розташовану по центру ковша: а – об'ємна витрата газу 0,32 л/хв; б – об'ємна витрата газу 2,6 л/хв

На рисунку 3 зображено вигляд моделі ванни при продувці через пористі вставки розташовані на периферії ковшової ванни з мінімальними та максимальними витратами газу 0,32 і 2,6 л/хв, які відповідають 100 і 800 л/хв на прототипі.

В таблиці 1 наведені результати моделювання

гідродинаміки ковшової ванни, зокрема розташування пробок у дослідях, об'ємна витрата газу q , висота шлаку $h_{шл}$, показники водяного манометру $\Delta h_{ман}$, середньовитратна швидкість газу w , відносна площа оголення дзеркала металу $S_{дз}$ та безрозмірний критерій π_1 .

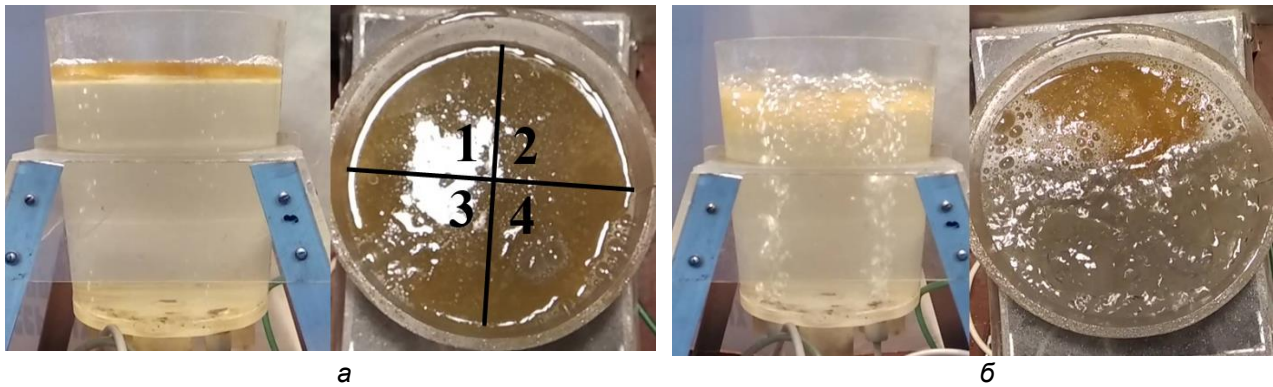


Рис. 3 – Продувка сталі через пористі вставки розташовані на периферії ковша: а – об'ємна витрата газу 0,32 л/хв; б – об'ємна витрата газу 2,6 л/хв

Таблиця 1 – Результати досліджень гідродинаміки ковшової ванни

№ до-сліду	Розташ. пробок	q, л/мин	h _{шп} , мм	Δh _{ман} , м	w, м/с	S _{дз}	π ₁
1	Центр	0,322	8	0,148	0,4	0	41,376
2		1,817	8	0,277	2,3	0,5017	233,35
3		2,600	8	0,405	3,2	0,64	333,99
4	Периферія	0,321	8	0,124	0,4	0	41,189
5		1,816	8	0,254	2,3	0,6135	233,24
6		2,602	8	0,383	3,2	0,6687	334,29
7	Центр	0,324	9	0,149	0,4	0	41,618
8		1,810	9	0,277	2,3	0,5578	232,52
9		2,601	9	0,406	3,2	0,6806	334,08
10	Периферія	0,323	9	0,125	0,4	0	41,43
11		1,816	9	0,255	2,3	0,4294	233,32
12		2,603	9	0,384	3,2	0,6319	334,38
13	Центр	0,322	10	0,150	0,4	0	41,39
14		1,811	10	0,278	2,3	0,4649	232,61
15		2,599	10	0,406	3,2	0,5739	333,82
16	Периферія	0,324	10	0,126	0,4	0	41,67
17		1,817	10	0,256	2,3	0,4847	233,41
18		2,601	10	0,385	3,2	0,6319	334,13

На першому етапі досліджень продувку проведено через пористу вставку розташовану по центру установки «ківш-піч» при товщині шлакового покриву від 8 до 10 мм, та з витратами газу від 0,32 до 2,6 л/хв. Встановлено, що при продувці з мінімальними витратами газу розплав знаходиться в спокійному стані, при цьому взаємодія барботаژної зони зі шлаком виражена незначними збуреннями, які унеможливають затягування шлаку в розплав не оголюючи дзеркало металу. При збільшенні витрат газу шлаковий покрив знаходиться у нестабільному стані, через це відбувається занурення крапель шлаку в метал. Підвищення інтенсивності продувки призвело до розширення діаметра продувної плями, через що збільшуються втрати теплоти в атмосферу печі. Збільшення висоти шлакового покриву сприяє зменшенню діаметра відкритої продувної плями (рис. 2).

На другому етапі – продувка виконана через дві пористі вставки розташовані на периферії ковша при товщині шлакового покриву від 8 мм до 10 мм,

та з витратами газу від 0,32 л/хв до 2,6 л/хв. При рафінуючій продувці розплав знаходиться у спокійному стані, поверхня шлакового покриву характеризується мінімальними збуреннями не утворюючи продувної плями, що сприяє збереженню теплоти металеву ванною. Якщо поверхню ванни умовно розділити на чотири сектори, то можна побачити, як бульбашки нейтрального газу, проходять через шар шлаку в секторах 3 та 4. При інтенсивній подачі газу відбувається зсув шлакового покриву до протилежного продувним блокам борта ковша. Хоча збільшення потужності перемішування сприяє протіканню процесу десульфурації, та є імовірність збільшення в сталі вмісту неметалевих включень, за рахунок затягування відривів шлаку конвективними потоками в розплав, і через окислення оголеного дзеркала металу в зоні продувної плями (рис. 3).

В ході проведення досліджень, були отримані рівняння, які дають змогу визначити, основні принципи формування барботаژної зони і її впливу на шар шлаку, при продувці через продувні блоки що

знаходяться по центру і на периферії. За отриманими математичними моделями, які відтворюють реальні умови при продувці нейтральним газом,

виконано розрахунки параметрів обробки металу в ковші та побудовані тривимірні діаграми (рис. 4–5).

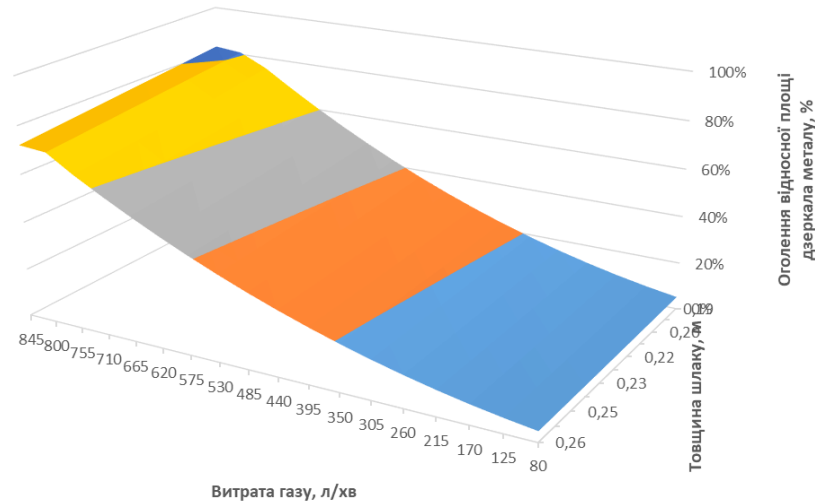


Рис. 4 – Вплив висоти шлаку та інтенсивності продувки на площу розкриття продувної плями при подачі газу через продувні блоки розташовані на периферії ковша

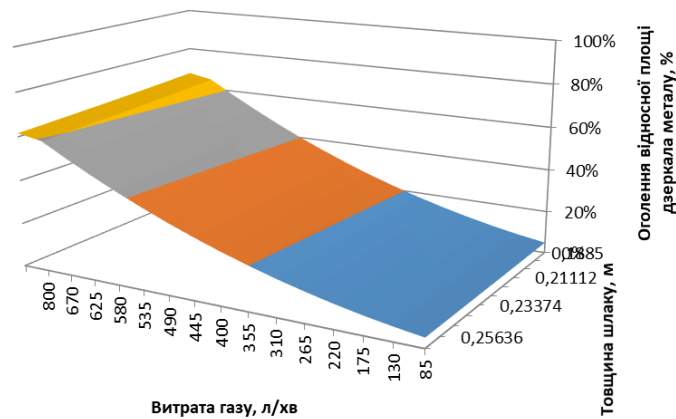


Рис. 5 – Вплив висоти шлаку та інтенсивності продувки на площу розкриття продувної плями при подачі газу через продувні блоки розташовані по центру ковша

Отримані залежності площі продувної плями від товщини шлакового шару та витрат газу який подається через продувні блоки розташовані на периферії показують, що її максимальне розкриття складає 67,1 %, при мінімальній товщині шлаку 0,2 м, тоді як при збільшенні товщини шлаку до 0,24 м площа зменшується до 59,7 %. Що до розкриття продувної плями, при використанні центрального продувного блоку (рис. 5), то воно має таку ж залежність – при товщині шлаку 0,2 м оголення відносної площі дзеркала складає близько 61,5 %, а при 0,24 м шлаку – 59,2 %. Зі збільшенням інтенсивності продувки відносна площа продувної

плями збільшується за рахунок взаємодії барботажної зони на границі метал-шлак до 750 л/хв, а при більш інтенсивній продувці розкриття майже не відбувається.

Загальний вид рівняння, який дозволяє розрахувати відносну площу продувної плями:

$$S = A \times q^n \times h_{\text{шл}}^m, \quad (1)$$

де A , n , m - емпіричні коефіцієнти, величини яких для різних варіантів розташування пробок представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Емпіричні коефіцієнти математичної моделі для розрахунку зміни площі продувної плями

Розміщення продувних блоків	A	n	m
центр	$1,82 \times 10^{-28}$	9,1	-0,22
периферія	$1,36 \times 10^{-28}$	9,3	-0,61

На основі отриманих даних виконано оцінку ефективності видалення неметалевих включень в досліджуваному діапазоні продувки при позапічній обробці сталі на установці «ківш-піч». Ймовірність закріплення включення R_A може бути описана як відношення площі обмеженою критичним діаметром захоплення, через який пливе бульбашка, до

площі обмеженої сумою діаметрів бульбашки і включення [12–14].

На рисунку 6 Зображено графік залежності ефективності видалення неметалевих включень від інтенсивності продувки сталі в ковші.

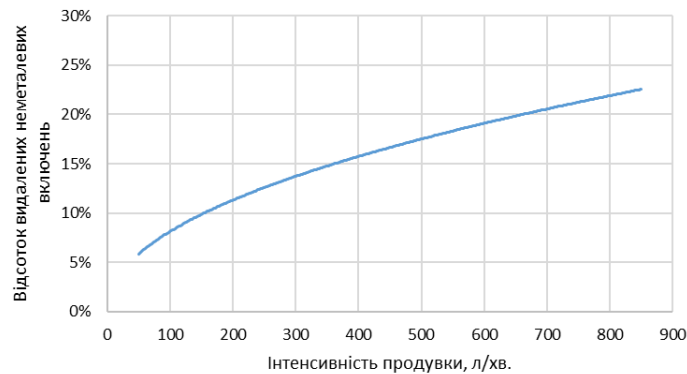


Рис. 6 – Вплив інтенсивності продувки сталі на відсоток видалення неметалевих включень

Зі збільшенням інтенсивності продувки відсоток видалених неметалевих включень зростає, у зв'язку зі збільшення об'єму барботаژної зони, оскільки їх видалення відбувається за рахунок прикріплення до бульбашки на межі метал-газ. При витратах газу 100 л/хв кількість видалених неметалевих включень складає близько 8% збільшивши інтенсивність продувки до 800 л/хв їх кількість складатиме 22% всіх НВ.

Висновки

За результатами проведених досліджень отримані залежності впливу витрат газу, розташування продувних блоків і кількості шлаку на відносну площу продувної плями. Збільшення об'ємних витрат нейтрального газу, при розташуванні дуттьових пристроїв по центру і периферії, призводить до суттєвого збільшення зони барботажу, при цьому відмічено, що при використанні пористої вставки розташованої по центру ковша шлак досить рів-

номірно зміщується до периферії, а при використанні двох вставок шлак зосереджується в протилежній стороні ковша від їх розміщення. Відмінною особливістю продувки через два продувних блока, являється утворення застійної зони яка знаходиться в секторах 1 та 2.

Встановлено, що при мінімальних витратах газу шлаковий покрив зберігає стабільність, а продувна пляма не утворюється, що сприяє збереженню тепла в металевій ванні. Зі збільшенням витрат газу шлаковий покрив стає нестабільним, виникає занурення крапель шлаку в метал і розширення продувної плями, що збільшує втрати теплоти. А при збільшенні товщини шлаку від 0,2 до 0,24 м максимальне розкриття продувної плями зменшується з 67,1% до 59,7%.

Виконаний розрахунок впливу інтенсивності продувки на процес видалення неметалевих включень. Встановлено, що відсоток видалених неметалевих включень зростає, за рахунок збільшення об'єму барботаژної зони.

Перелік посилань

1. Величко О.Г. Технології підвищення якості сталі [Підручник] / О.Г. Величко, О.М. Стоянов, Б.М. Бойченко, К.Г. Нізяєв. – Дніпропетровськ: Середняк Т.К., 2016. – 196 с
2. Волкова О.І., Утворення газового струменя та розрив шлакового шару під час продувки рідкої сталі газом у ковші позапічної обробки / О.І. Волкова, Д.Ю. Рябов, П.Р. Шеллер // Техніка теплофізика та промислова теплоенергетика – 2009. – №1. – С. 46 – 52.
3. Smirnov A. Optimization of argon-injection process parameters for ladle treatment of steel / A. Smirnov, S. Eronko, I. Kovalenko, R. Giessen // EOSC, 5th European Oxygen Steelmaking Conference. – 2006. – № 5. – С. 272 – 279.
4. Maruoka N. Influence of bottom stirring conditions on gas-liquid reaction rate / N. Maruoka, F. Lazard, T. Maeyama, H. Nogami // Scanmet, 3rd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking. – 2008. – С. 449 – 458.
5. Conejo A.N. Effects of Nozzle Radial Position, Separation Angle, and Gas Flow Partitioning on the Mixing, Eye Area, and Wall Shear Stress in Ladles Fitted with Dual Plugs / A.N. Conejo, R. Mishra, D. Mazumdar // Metallurgical and materials transactions. – 2019. – S. 1490 – 1502. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01546-8>
6. Tassot P. Ways of Improving Steel Quality in the Tundish / P. Tassot, N. Reichert // Revue de Metallurgie. – № 107. – 2010. – pp.175-185.
7. Fruehan R.J. The Making, Shaping and Treating of Steel (Steel Making and Refining), volume 2, pp. 125 – 133

8. PERFORMANCE TEST RESULTS OF ArcSave® TECHNOLOGY IN ELECTRIC ARC FURNACE STEELMAKING / Lidong Teng¹, Pär Ljungqvist, Michael Meador, Joakim Andersson, Helmut Hackl¹, Jan-Erik Eriksson¹ // 5th International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking. – 12–15 June 2016.
9. Wang L.T.; Zhang Q.Y.: ISIJ Int. 45-8 (2005), pp. 1138-7.
10. Українська Асоціація Сталеплавильників. Інформаційний портал про чорну та кольорову металургію. Режим доступу: (<https://uas.su/books/2011/minizavod/32/razdel32.php>) (дата звернення: 04.02.2022)
11. Pribulova, A. Influence of Blowing of Argon on the Cleanness of Steel / A. Pribulova // Archives of Foundry Engineering. – 2012. – № 12. S. 91–94.
12. Чичкарев Е.А. Барботажне перемішування та механізм зсвоєння кальція при обробці сталі в ковші порошковим дротом / Е.А. Чичкарев, А.И. Троцан, Е.А. Казачков, С.Г. Рудакова // Вісник приазовського державного технічного університету – 2002. – №12. – С. 11–15.
13. Sano M. Model of Circulation Flow in Molten Metal for the Special Case of Bath Bubbling and Its Application to Gas Injection Processes / M. Sano, K. Mori // Injection Metallurgy - 83. Lulea, Sweden. – 1983. – P. 124–134.
14. Костецький Ю.В. Дослідження ефективності процесу флотації неметалевих включень бульбашками аргону / Ю.В. Костецький, А.В. Мач // Наук. пр. Донець. нац. техн. ун-ту. Сер. Металургія. – 2011. – Вип. 13. – С. 65–76.

References

1. Velychko, O. H., Stoianov, O. M., Boichenko, B. M., & Niziaiev, K. H.. (2016). *Tekhnologii pidvyshchennia yakosti stali*. Seredniak T.K.
2. olkova, O. I., Riabov, D. Yu., & Sheller, P. R. (2009). Utvorennia hazovoho strumenia ta rozryv shlakovoho sha-ru pid chas produvky ridkoi stali hazom u kovshi pozapichnoi obrobky. *Tekhnika teplofizyka ta promyslova teploenerhetyka*, (1), 46-52
3. Smirnov, A., Eronko, S., Kovalenko, I., & Giessen, R. (2006). Optimization of argon-injection process parameters for ladle treatment of steel. *EOSC, 5th European Oxygen Steelmaking Conference*, (5), 272-279
4. Maruoka, N., Lazuardi, F., Maeyama, T., & Nogami, H. (2008). Influence of bottom stirring conditions on gas-liquid reaction rate. *Scanmet, 3rd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking*, 449-458
5. Conejo, A. N., Mishra, R., & Mazumdar, D. (2019). Effects of nozzle radial position, separation angle, and gas flow partitioning on the mixing, eye area, and wall shear stress in ladles fitted with dual plugs. *Metallurgical and Materials Transactions*. 1490-1502. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01546-8>
6. Tassot, P., & Reichert N. (2010). Ways of improving steel quality in the Tundish. *Revure de Metallurgie*, (107), 175-185
7. Fruehan, R. J. The Making, shaping and treating of steel. In: *Steel making and refining*, Vol. 2, 125-133
8. Teng L., Ljungqvist P., Meador M., Andersson J., Hackl H., & Eriksson J.-E. (2016). Performance test results of ArcSave® technology in electric arc furnace steelmaking. In: *5th International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking*, 12-15 June 2016
9. Wang, L. T., & Zhang, Q. Y. (2005). *ISIJ Int.*, 45(8),1138-1144
10. Ukrainska Asotsiatsiia Staleplavlynykiv. Informatsiinyi portal pro chornu ta kolorovu metalurhiiu. <https://uas.su/books/2011/minizavod/32/razdel32.php>
11. Pribulova, A. (2012). Influence of blowing of argon on the cleanness of steel. *Archives of Foundry Engineering*, (12),91-94
12. Chychkarev, E. A., Trotsan, A. Y., Kazachkov, E. A., & Rudakova, S.H. (2002). Barbotazhne peremishuvannia ta mekhanizm zsvoiennia kaltsiia pry obrobtsti staly v kovshi poroshkovym drotom. *Visnyk pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, (12), 11-15
13. Sano, M., & Mori K. (1983). Model of circulation flow in molten metal for the special case of bath bubbling and its application to gas injection processes. *Injection Metallurgy – 83*, 124-134
14. Kostetskyi, Yu .V., & Mach, A. V. (2011). Doslidzhennia efektyvnosti protsesu flotatsii nemetalevykh vklju-chen bulbashkamy arhonu. *Nauk. pr. Donets. nats. tekhn. un-tu. Ser. Metalurhiia*, 13, 65-76

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 21.12.2023

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.02.2024