В.П. Піптюк¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: piptyuk_vp@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2915-1756>

С.Є. Самохвалов², д-р техн. наук, проф., зав. каф., e-mail: science@dstu.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7362-213X>

І.М. Логозинський³, директор з технології і якості, e-mail: info@dss.com.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3915-4106>

С.В. Греков¹, наук. співр., e-mail: office.isi@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2849-0999>

К.С. Красніков², канд. техн. наук, ст. викладач, e-mail: science@dstu.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4241-0572>

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України (ІЧМ НАН України), Дніпро, Україна

²Дніпровський державний технічний університет (ДДТУ), Кам'янське, Україна

³ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А.М. Кузьміна» (ПрАТ «ДСС»), Запоріжжя, Україна

Кінетика видалення газів з металевого розплаву під час дегазації на обладнанні камерного типу

Головна мета дегазації рідкого металу – забезпечення низького вмісту газів (водню, азоту) у сталі. Перш за все це стосується чутливих до утворення флокенів марок сталі і зменшення вмісту неметалевих включень для сталі тих марок, з яких виробляється дріт та інша металопродукція з малим перерізом і підвищеними вимогами до якості. Параметри цього перспективного виду позапічної обробки впливають на процеси дегазації металу, а дослідження їх впливу являється актуальним та має практичний і науковий інтерес.

Попередньо за допомогою розробленого програмного продукту чисельно дослідили процеси перемішування розплаву і його тепловий стан під час дегазації у сталерозливному ковші ємністю 60 т з посиленою футерівкою бійної частини на спеціалізованому обладнанні камерного типу в умовах ПрАТ «ДСС». Кінетику видалення водню та азоту під час дегазації вивчали по контурним діаграмам з однаковими початковими (певний вміст газів, фіксована маса металу, незмінні властивості реагуючих фаз та ін.) і різними технологічними (витрата аргону, тривалість обробки, зміна рівня наповнення ковша металом та ін.) параметрами. Оцінювали вплив змінних чинників на ефективність видалення розчинених газів при зниженому тиску (1 мм рт. ст.) над поверхнею розплаву. Проводили порівняння середнього у ковшовій ванні вмісту водню та азоту з відповідним вмістом цих газів в окремому місці на поверхні металу, що відповідало зазначеному технологічними вимогами місцю відбору проби металу під час дегазації. Додатково визначали вміст аргону в металі, що витрачається для його перемішування при обробці вакуумом.

За результатами чисельних досліджень встановили необхідно достатні витрати аргону для продування ковшової ванни з різною (в межах практичного коливання) масою металу і визначили мінімально можливу тривалість процесу дегазації на обладнанні такого типу в умовах ПрАТ «ДСС», які забезпечують потрібний вміст газів.

З метою перевірки теоретично отриманих в роботі результатів в умовах ПрАТ «ДСС» започаткували дослідно-промислові експерименти.

Ключові слова: дегазація, вміст газів, витрата аргону, тривалість процесу.

Сучасний стан питання. Вакуумна дегазація – перспективний напрям позапічної обробки сталі. Основні задачі цього виду обробки рідкого металу – це зниження вмісту газів, зокрема водню, що особливо важливо для чутливих до утворення фло-

кенів марок сталі, і зменшення вмісту неметалевих включень у тих марках сталі, з яких виробляється дріт та інша металопродукція з малим перерізом і підвищеними вимогами до якості. Параметри технологічного регламенту виробництва сталі впливають,

зокрема, на процеси дегазації і тому дослідження їх впливу на ефективність видалення газів з металевого розплаву і зменшення кількості неметалевих включень у твердому металі являються актуальними і мають науковий та практичний інтерес.

Автори [1] вивчали закономірності видалення водню на установці дегазації сталі камерного типу фірми "Siemens-Vai", яка експлуатується в електросталеплавильному цеху АТ «Уральська сталь» (Росія) за період травень – липень 2015 р. За цей час був проведений статистичний аналіз більше ніж 1500 плавок поточного виробництва найбільш масових марок сталі (09Г2С, 10ХСНД, 17Г1С, К56-2, С-345, Зсп). Для сталі марки 09Г2С визначено технологічні параметри дегазації. Відмічено значне коливання параметрів, що вплинуло на результати дегазації: вміст водню знаходився в межах 1,0–4,5 ppm. Кореляційно-регресивним методом побудовано наведену нижче модель (1) для прогнозування кінцевого вмісту водню [H] від мінімального тиску у вакуум-камері ($P_{\min}$, мбар), витрат аргону на продування (Q_{Ar} , м³/т) температури перегріву металу ($t_{\text{пер}}$, °C) тривалості глибокого вакуумування ($\tau_{\text{в}}$, хв) з коефіцієнтом множинної кореляції 0,58:

$$[H] = 4,224 - 0,064\tau_{\text{в}} + 0,0008\tau_{\text{в}}^2 + 0,0136P_{\min} + 0,0215P_{\min}^2 - 0,015t_{\text{пер}} + 6,23t_{\text{пер}}^2 - 5,966Q_{\text{Ar}} \quad (1)$$

Стверджується, що параметри $t_{\text{пер}}$ та $\tau_{\text{в}}$ складають в сумі біля 96 % ступеню впливу на результати дегазації. Визначені втрати температури при дегазації, раціональний перегрів металу на початку обробки і раціональні параметри процесу, які забезпечать, на думку авторів, вміст водню 2,1 ppm, а також його мінімальне значення 1,6 ppm. Витрати аргону на продування 120 т металеві ванни при цьому слід підтримувати в межах 0,03–0,07 м³/т (90–210 л/хв.).

Але наведене рівняння (1) базується на використанні даних окремого підприємства без урахування впливу таких важливих чинників, як умови перемішування розплаву при дегазації, зміна маси плавки в ковші від плавки до плавки та ін., про що свідчить відносно низьке значення коефіцієнта множинної кореляції (0,58), а наведена в статті інформація відносно режимів продування (0,002–0,146 м³/т), тривалості обробки (0–47 хв.) та ін. практичних параметрів дегазації, у зв'язку з її суперечливістю, не свідчить про можливість використання в якості вихідної. Це не дозволяє використати результати роботи в інших умовах із врахуванням порівняно низької достовірності отриманих даних.

Автори [2] вивчали питання ефективності видалення водню з металу у дегазаторі циркуляційного типу. Відмічено недостатню вивченість процесів дегазації сучасними методами. Зазначено, що видаленню газу сприяє його безпосередній перехід в навколишнє середовище, виникнення бульбашок газу і їх спливання, зародження бульбашок на поверхні контакту вогнетривкої футерівки з металом, продування інертним газом – аргонном. Теоретично визначено глибину

зародження бульбашок водню (наприклад, при досягненні низького тиску для 4 ppm глибина зародження від поверхні металу становить 3 см). Досягненню вмісту водню 2,5 ppm сприяє тривалість обробки (≈ 45 хв.) і кратність дегазації (до 10 разів). Показано, що для інтенсифікації видалення водню з поверхні розплаву у вакуум-камері циркуляційним способом необхідна додаткова продувка з подачею аргону у всмоктуючий патрубок.

Питання дослідження процесів дегазації сталі і їх вдосконалення різними сучасними способами протягом останніх десятиріч розглядаються науковцями різних країн світу. Так, наприклад, у статті М. Iguchi з колегами [3] наводяться результати модельних досліджень про вплив продування газом рідини у циліндричній ванні при зниженому тиску на стан її поверхні. Вплив вакууму на змішування рідини у ківші розглядалось у роботі К. Krishnakumar і N.B. Ballal [4]. Визначенню факторів впливу на формування «аргонової плями» при дегазації сталі з метою покращення взаємодії фаз газ-рідини присвятили роботу N. Maquoka та ін. [5]. В статті Т. Yoshioka та ін. [6] наведено результати вивчення впливу певних режимів, які використовували на різних етапах позапічної обробки сталі (спочатку на установці ківш-піч, а потім на циркуляційному дегазаторі) на склад утворених продуктів взаємодії, а в роботі J. Zhang та ін. [7] розглянуто вплив різних факторів на механізм видалення неметалевих включень при дегазації сталі. Ці та інші публікації вітчизняних та закордонних авторів свідчать про недостатню вивченість процесів дегазації сталі і необхідність подальших досліджень у наведеному напрямі.

Мета роботи. З урахуванням наявних літературних даних та результатів власних попередніх досліджень авторів відносно впливу електромагнітних зусиль [8], конструктивних особливостей сталерозливного ковша [9] та змінних технологічних факторів на умови перемішування та тепловий стан металевого розплаву у ванні під час обробки на установці ківш-піч [10, 11] встановили, що метою теперішньої роботи являється визначення ефективності видалення з металевого розплаву водню та азоту стосовно конкретних технологічних параметрів в залежності від таких факторів, як умови перемішування та тепловий стан розплаву, маса металу в ковші і її коливання від плавки до плавки, витрати аргону на продування розплаву при дегазації, тривалість процесу та температурні умови його здійснення, властивості металеві та шлакової фаз – учасників процесу.

Вихідні дані і методика досліджень. При визначенні об'єкту дослідження виходили з міркувань про можливість використання наявної в ІЧМ НАН України бази даних з виробництва сталі на ПрАТ «ДСС» за останні роки. Ця база даних включає етап позапічної дегазації сталі декількох десятків марок поточного виробництва (більше ніж 2000 плавок). Тому в якості об'єкта для чисельних досліджень було обрано установку для дегазації сталі камерного типу (фірми "Mannesmann Demag") цього підприємства.

В дослідженнях приймали, що конфігурація ковшової ванни і розташування донної продувної фурми

відносно посиленої бійної частини (потовщення футерівки) відповідає діючим у виробничих умовах конструктивним та експлуатаційним характеристикам досліджуваного об'єкта. Попередньо чисельно дослідили умови перемішування розплаву і його тепловий стан під час дегазації на віртуальному промисловому обладнанні з відповідними характеристиками [12] за допомогою розробленого програмного продукту [13].

Також враховували, що обробка сталі на дегазаторі камерного типу розподіляється на три етапи: початковий – зниження тиску повітря у вакуум-камері; основний – стан «глибокого» (тиск близько 1 мм рт. ст.) вакууму з тривалістю приблизно 20 хв.; кінцевий – доведення і визначення хімічного складу та температури металу, утеплення поверхні розплаву. Досліджували основний етап вакуумної обробки з наступними початковими умовами: температура розплаву 1625 °С, вміст водню і азоту 4 ppm і 80 ppm відповідно, витрати аргону від 0,1Q до 1,0Q (л/хв.), де Q – максимальні витрати аргону, які вивчаються, коливання маси плавки в межах від 54 до 66 т.

Виклад основних результатів дослідження.

Чисельні дослідження проводили шляхом оцінки вмісту газів (водень і азот) у розплаві по контурних діаграмах під час дегазації при різних значеннях маси плавки і різних витратах аргону на продування. Початкова концентрація водню і азоту рівномірно розподілена по усьому об'єму металеві ванни (однакова в усіх розрахункових комірках ковшової ванни). Під час продування аргонном через донну фурму відбувається насичення металеві ванни цим газом, здійснюється

перемішування розплаву та видалення з нього водню і азоту при зниженні тиску повітря у вакуум-камері менше 1 мм рт. ст.

Результати чисельних досліджень представлено на рис. 1 і 2. Контурні діаграми побудовано у координатах: витрата аргону і тривалість дегазації з функціями відгуку – середній у ковшовій ванні вміст водню або азоту і вміст цих газів при відборі проб металу у зазначеному місці (відповідно до відбору проби металу у промислових умовах). Середній у ковшовій ванні вміст газів у металі визначали як середнє значення по всіх (більш 10000) комірках розрахункової області металеві ванни.

Як видно з рис. 1 (поз. 1) умови без продування аргонном або при дуже малих його витратах через донну фурму не сприяють перемішуванню металеві розплаву. При цьому видалення водню відбувається через поверхню металу в незначній кількості. Це обумовлено тим, що утворення первинних бульбашок водню відбувається на шорсткій поверхні футерівки і на малій глибині. За 20 хвилин глибокого вакууму без продування аргонном видалиться приблизно 0,0066 ppm водню. Встановлено, що при малих (0,1Q–0,17Q) витратах аргону кількість видаленого водню збільшується до рівня, який може забезпечити його нормативне значення (≤ 2 ppm). Подальше збільшення витрат аргону (0,33Q–1,0Q) приводить до незначного зменшення видалення водню, що обумовлено, ймовірно, відносно більшими швидкостями потоків металеві розплаву у приповерхневих шарах ванни і зануренням бульбашок цього газу у глибину

Рис. 1. Контурні діаграми залежності середнього у ковшовій ванні вмісту водню (1) і його вмісту у визначеній зоні на поверхні металу під час дегазації (2) від витрат аргону на продування і маси плавки (54 т (а), 60 т (б) і 66 т (в))

Рис. 2. Контурні діаграми залежності середнього у ковшовій ванні вмісту азоту (1) і його вмісту у визначеній зоні на поверхні металу під час дегазації (2) від витрат аргону на продування і маси плавки (54 т (а), 60 т (б) і 66 т (в))

металевої ванни низхідними потоками. Зменшення маси плавки сприяє більш швидкому видаленню водню. При витратах аргону $0,17Q$ вміст водню ≤ 2 ppm у розплаві досягається за 12 хв. при масі плавки 54 т, за 13 хв. і за 18 хв. для 60 т і 66 т відповідно. Аналогічним чином при збільшенні маси плавки поводить себе і азот (рис. 2 (поз. 1)). Так на 20 хв. дегазації досягається зниження його вмісту до 64 ppm (маса плавки 54 т) і відповідно 66 ppm (для 60 т) та 69 ppm (для 66 т). Залежності видалення азоту при різних витратах аргону мають характер, що відповідає характеру видалення водню.

Слід відзначити, що наведені на рис. 1 (поз. 2) та рис. 2 (поз. 2) дані в порівнянні з відповідними даними на рис. 1 (поз. 1) та рис. 2 (поз. 1) свідчать про відповідно не однаковий вміст цих газів під час дегазації. При витратах аргону $0,17Q$ для плавки з масою 54 т спостерігається зменшення концентрації водню в порівнянні з нормативним (≤ 2 ppm) його вмістом у металі протягом перших 3 хв. дегазації (це обумовлено, ймовірно, значним видаленням водню з металу під час перших хвилин обробки і місцем відбору проби – біля стінки ковшової ванни), далі відбувається збільшення вмісту водню за рахунок перемішування металу. Для значень маси плавки у 60 т і 66 т у перші хвилини обробки, навпаки, спостерігається збільшення вмісту водню (ймовірно, він не встигає залишити металеву ванну). Бульбашки азоту спливають повільніше бульбашок водню (вони мають більшу щільність газу) і не встигають залишити розплав з його приповерхневих шарів (рис. 2 (поз. 2)).

Встановлено, що вміст аргону, який подається у металеву ванну, збільшується протягом перших 3 хв.

Рис. 3. Контурна діаграма вмісту аргону (цифри на ізолініях, ppm) у металевій ванні під час дегазації при різних масі плавки

в період глибокого вакууму і досягає середнього його значення у ковшовій ванні, яке позначене на рис. 3. Збільшення вмісту інертного газу обумовлено підвищенням витрат аргону з $0,06Q$ (у попередньому періоді при створенні вакууму) до величини його витрати, при якій здійснюється відповідне дослідження. Поверхня бульбашок аргону, які контактують з металом, ймовірно, є центрами зародження бульбашок водню та азоту у глибині ковшової ванни. З метою перевірки теоретично отриманих в роботі результатів в умовах ПрАТ «ДСС» започаткували дослідно-промислові експерименти.

Висновки

1. Методом математичного моделювання досліджено кінетику видалення водню та азоту з металевого розплаву під час дегазації сталі камерним способом. Дослідження проводили з урахуванням тривалості процесу обробки та температурних умов його здійснення,

властивостей металевої та шлакової фаз, особливостей конструкції ковша, умов перемішування та теплового стану розплаву, маси металу в ковші та її коливань від плавки до плавки, витрат аргону на продування розплаву та інших змінних технологічних чинників.

2. Теоретично встановлено, що видалення водню і азоту в умовах дегазації сталі камерним способом без продування аргонном або при дуже малих його витратах (до 0,1Q) відбувається через поверхню металу в незначній кількості. При малих (0,1Q–0,17Q) витратах аргону кількість видаленого водню збільшується до рівня, який може забезпечити його норма-

тивне значення (≤ 2 ppm). Збільшення витрат аргону (0,33Q–1,0Q) приводить до незначного зменшення видалення водню.

3. Визначено залежність тривалості процесу дегазації від маси плавки у ковші. Показано, що для досягнення вмісту водню ≤ 2 ppm у розплаві, наприклад, при витратах аргону 0,17Q достатньо тривалості обробки 12 хв. при масі плавки 54 т, 13 хв. при масі плавки 60 т і 18 хв. при масі плавки 66 т. Встановлено, що аналогічний характер залежності видалення з розплаву притаманний азоту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тутарова В.Д., Шаповалов А.Н., Калитаев А.Н. Закономерности удаления водорода на установке вакуумирования стали камерного типа. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 3. С. 192–199.
2. Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Шевченко О.И., Корогодский А.Ю. К вопросу удаления водорода из металла в вакууматоре циркуляционного типа. *Теория и технология металлургического производства*. 2016. № 1 (18). С. 29–32.
3. Iguchi M., Eguchi Y., Kawaskia A., Kitamura Sh., Naito K. Swirl Motions in a Cylindrical Bath Induced by Gas Injection Under Reduced Pressure on Surface. *ISIJ International*. 1999. Vol. 39. № 8. P. 767–771.
4. Krishnakumar K., Ballal N.B. Effect of Vacuum on Mixing Behavior in a Ladle – a Watermodel Study. *ISIJ International*. 1999. Vol. 39. № 11. P. 1120–1124.
5. Maruoka N., Lazuardi F., Maeyama T., Kim S., Conejo AN, Shibata H., Kitamura Sh. Evaluation of Bubble Eye Area to Improve Gas / Liquid Reaction Rates at Bath Surfaces. *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. № 2. P. 236–241.
6. Yoshioka T., Nakahata K., Kawamura T., Ohba Y. Factors to Determine Inclusion Compositions in Molten Steel during the Secondary Refining Process of Case-Hardening Steel. *ISIJ International*. 2016. Vol. 56. № 11. P. 1973–1981.
7. Zhang J., Liu J., Yu S., Su X., Yan B., Yang He. Bubble Growth and Floating Behavior during Degassing Process of Molten Steel / (N_2 , H_2) System. *ISIJ International*. 2020. Vol. 60. № 3. P. 470–480.
8. Піптюк В.П., Крикент І.В., Самохвалов С.Е., Греков С.В., Кабаков Д.Ю. Оценка величины и влияния электромагнитных сил в ванне установки ковш-печь переменного тока. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 2014. Т. 57. № 9. С. 40–45.
9. Піптюк В.П., Самохвалов С.Е., Логозинский И.Н., Сальников А.С., Кондрашкин В.А., Греков С.В. Влияние усиления футеровки в бойной части сталеразливочного ковша на параметры перемешивания расплава. *Металлург*. 2013. № 7. С. 29–34.
10. Піптюк В.П., Самохвалов С.Е., Павлюченков И.А., Логозинский И.Н., Сальников А.С., Греков С.В. Исследование тепло-, массообменных процессов в ванне установки ковш-печь. Часть 2. Результаты моделирования теплового состояния расплава. *Теория и практика металлургии*. 2013. Т. 94–95. № 5–6. С. 49–52.
11. Кабаков Д.Ю., Самохвалов С.Е., Піптюк В.П. Математичне моделювання переносних процесів в установці ківш-піч. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2015. 124 с.
12. Піптюк В.П., Самохвалов С.Е., Логозинський І.М., Греков С.В., Красніков К.С. Вивчення умов перемішування та теплового стану розплаву при дегазації сталі на обладнанні камерного (VD) типу. *Зб. наук. праць ІЧМ НАНУ «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металлургії»*. 2020. Вип. 34. С. 121–127.
13. Солоня А.В., Піптюк В.П. Моделювання процесу ковшового вакуумування з продувкою інертним газом. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. *ITMM'2017: Матеріали IX міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 28–30 березня 2017 р.)*. Дніпро: НМетАУ, 2017. С. 79.

Надійшла 12.05.2020

REFERENCES

1. Tutarova, V.D., Shapovalov, A.N., Kalitaev, A.N. (2017). Laws of removing hydrogen unit steel degassing chamber-type. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgia. University News. Ferrous metallurgy*, vol. 60, no. 3, pp. 192–199 [in Russian].
2. Metelkin, A.A., Sheshukov, O.Yu., Nekrasov, I.V., Shevchenko, O.I., Korogodskiy, A.Yu. (2016). On the issue of removal of the metal in the degasser hydrogen circulation type. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva. Theory and technology of metallurgical production*, vol. 1 (18), pp. 29–32 [in Russian].

3. Iguchi, M., Eguchi, Y., Kawaskia, A., Kitamura, Sh., Naito, K. (1999). Swirl Motions in a Cylindrical Bath Induced by Gas Injection Under Reduced Pressure on Surface. *ISIJ International*, vol. 39, no. 8, pp. 767–771.
4. Krishnakumar, K., Ballal, N.B. (1999). Effect of Vacuum on Mixing Behavior in a Ladle – a Watermodel Study. *ISIJ International*, vol. 39, no. 11, pp. 1120–1124.
5. Maruoka, N., Lazuardi, F., Maeyama, T., Kim, S., Conejo, AN, Shibata, H., Kitamura, Sh. (2011). Evaluation of Bubble Eye Area to Improve Gas / Liquid Reaction Rates at Bath Surfaces. *ISIJ International*, vol. 51, no. 2, pp. 236–241.
6. Yoshioka, T., Nakahata, K., Kawamura, T., Ohba, Y. (2016). Factors to Determine Inclusion Compositions in Molten Steel during the Secondary Refining Process of Case-Hardening Steel. *ISIJ International*, vol. 56, no. 11, pp. 1973–1981.
7. Zhang, J., Liu, J., Yu, S., Su, X., Yan, B., Yang, He. (2020). Bubble Growth and Floating Behavior during Degassing Process of Molten Steel / (N_2 , H_2) System. *ISIJ International*, vol. 60, no. 3, pp. 470–480.
8. Piptyuk, V.P., Krikent, I.V., Samokhvalov, S.E., Grekov, S.V., Kabakov, D.Yu. (2014) Assessment of the magnitude and influence of electromagnetic forces in the bath of the ladle – AC furnace. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgia. University News. Ferrous metallurgy*, vol. 57, no. 9, pp. 40–45 [in Russian].
9. Piptyuk, V.P., Samokhvalov, S.E., Logozinskiy, I.N., Salnikov, A.S., Kondrashkin, V.A., Grekov, S.V. (2013). Influence of lining gain in impact zone of steel teeming ladle on parameters of melt stirring. *Metallurg. Metallurgist*, no. 7, pp. 29–34 [in Russian].
10. Piptyuk, V.P., Samokhvalov, S.E., Pavlyuchenkov, I.A., Logozinskiy, I.N., Salnikov, A.S., Grekov, S.V. (2013). The study of heat, mass transfer processes in the bath of the ladle-furnace installation. Part 2. The results of modeling the thermal state of the melt. *Teoriya i praktika metallurgii. Theory and Practice of Metallurgy*, vol. 94–95, no. 5–6, pp. 49–52 [in Russian].
11. Kabakov, D.Yu., Samokhvalov, S.E., Piptyuk, V.P. (2015). Mathematical modeling of portable processes in the installation of a ladle–furnace. Dneprodzerzhinsk: DDTU, 124 p. [in Ukrainian].
12. Piptyuk, V.P., Samokhvalov, S.E., Logozinskiy, I.N., Grekov, S.V., Krasnikov, K.S. (2020). Study of the conditions of mixing and thermal state of the melt during degassing of steel on equipment chamber (VD) type. *Sb. nauch. trudov ICHM NANU «Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii»*. Collection of scientific works of the ISI of NASU “Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy”, iss. 34, pp. 121–127 [in Ukrainian].
13. Solona, A.B., Piptyuk, V.P. (2017). Modeling of bucket evacuation process with inert gas purging. Information Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering. *ITMM'2017: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference. (Dnipro, March 28–30, 2017)*. Dnipro: NmetAU, p. 79 [in Ukrainian].

Received 12.05.2020

Summary

V.P. Piptyuk¹, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: piptyuk_vp@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2915-1756>

S.E. Samokhvalov², Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Department, e-mail: science@dstu.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7362-213X>

I.M. Logozinskiy³, Director of Technology and Quality, e-mail: info@dss.com.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3915-4106>

S.V. Grekov¹, Researcher, e-mail: office.isi@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2849-0999>

K.S. Krasnikov², PhD (Engin.), Senior Lecturer, e-mail: science@dstu.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4241-0572>

¹*Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine (ISI NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine*

²*Dniprovsky State Technical University (DSTU), Kamenskoye, Ukraine*

³*Private Joint Stock Company “Electrometallurgical Works “DNIPROSPETSSTAL” named after A.M. Kuzmin” (PJSC “DSS”), Zaporizhzhia, Ukraine*

Kinetics of the removal of gases from a metal melt during degassing in a chamber-type unit

The main purpose of liquid metal degassing is to ensure a low content of gases (hydrogen, nitrogen) in steel. First of all, this applies to flocks-sensitive steel grades and reducing the content of non-metallic inclusions for steel of those grades from which wire and other metal products with small cross-section and high quality requirements are made. The parameters of this promising direction of out-of-furnace processing influence the processes of metal degassing, and the study of their influence is relevant and has practical and scientific interest.

Previously, with the help of the developed software product, the processes of melt mixing and its thermal state during degassing in a steel ladle with a capacity of 60 tons with reinforced of lining gain in impact zone on specialized chamber equipment in the conditions of PJSC "DSS" were numerically investigated. The kinetics of hydrogen and nitrogen removal during degassing were studied according to contour diagrams with the same initial (certain gas content, fixed metal mass, constant properties of reacting phases, etc.) and different technological ones (argon consumption, processing time, change of bucket filling level with metal, etc.) parameters. The influence of variable factors on the efficiency of removal of dissolved gases at reduced pressure (1 mm Hg) above the melt surface was evaluated. The average content of hydrogen and nitrogen in the ladle bath was compared with the corresponding content of these gases in a separate place on the metal surface, which corresponded to the specified place of sampling of the metal during degassing. Additionally, the content of argon in the metal consumed for its mixing during vacuum treatment was determined.

Based on the results of numerous studies, sufficient argon consumption was required to purge the bucket bath with different (within practical fluctuations) metal mass and determined the minimum possible duration of the degassing process on this type of equipment in PJSC "DSS", which provide the required gas content.

In order to verify the theoretically obtained results in the conditions of PJSC "DSS" experimental and industrial experiments were initiated.

Keywords

Degassing, gas content, argon consumption, process time.