

МЕТАЛУРГІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.41.2022.1

УДК 669.162

Є.М. Сігарьов, д.т.н., професор, en_sigarev@ua.fm

Д.В. Єськов, аспірант

А.А. Похвалітій, к.т.н., доцент, ArtemMSLP@gmail.com

Т.А. Манукян, аспірант, telman.manukian@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

РОЗПОДІЛ МЕТАЛЕВИХ КРАПЕЛЬ МІЖ ГАЗОВОЮ ТА ШЛАКОВОЮ ФАЗАМИ ПРИ ПРОДУВАННІ КОВШОВОЇ ВАННИ

Метою роботи є дослідження особливостей винесення у оточуючий простір металевих крапель, сформованих після розриву газових пузирів при виході на поверхню ковшової ванни. Для реалізації поставленої мети в умовах лабораторії кафедри МЧМОМТ ДДТУ проведено серію високотемпературних експериментів з моделюванням продувки ванни при ковшовій десульфурзації чавуну. Вивченням особливостей винесення та втрат чавуну з краплями при переливах останнього показано, що тільки певна частина крапель при досягненні критичного діаметру, у польоті вибухає з виділенням бурого диму та утворенням крапель менших розмірів ніж «материнська» крапля. Частина крапель, незважаючи на сприятливі умови, досягає поверхні ванни або вилітає за її межі без вибуху. З використанням отриманих експериментальних даних запропоновано модель виходу газових пузирів на поверхню ванни та алгоритм розрахунку показників переміщення металевих крапель, що сформовані з металевієї плівки на поверхні газових пузирів після їх розриву. Визначено, що найбільш вірогідним для умов продувки ванни у 230-т ковші є виліт крапель металу з поверхні ванни під кутами у діапазоні 35...45 град. Підтверджено визначальну роль фізико-хімічних властивостей шлакового покриву та доцільність подальшого удосконалення дуттьового і шлакового режиму ковшової десульфурзації переробного чавуну.

Ключові слова: *ківш; установка десульфурзації чавуну; чавун; шлак; краплі; продувка; корольки.*

The purpose of the work is to study the peculiarities of the removal of metal drops into the surrounding space, which are formed after the bursting of gas bubbles, when they fall on the surface of the ladle bath. To realize the set goal, a series of high-temperature experiments with simulation of bath purging during bucket desulfurization of cast iron were conducted in the laboratory conditions of the Department of metallurgy of ferrous metals and pressure metal processing of DSTU. A study of the features of removal and loss of cast iron with drops during overflows of the latter shows that some of the drops explode in flight with the release of brown smoke and the formation of drops of smaller sizes than the "mother" drop. Despite favorable conditions, part of the drops reach the surface of the bath or fly beyond it without exploding. Using the obtained experimental data, a model of the release of gas bubbles on the surface of the bath and an algorithm for calculating the indicators of the movement of metal drops formed from a metal film on the surface of gas bubbles after their rupture are proposed. It was determined that the most probable condition for blowing out the bath in a 230-ton bucket is the departure of metal drops from the surface of the bath at angles in the range of 35...45 degrees. The decisive role of the physicochemical properties of the slag cover and the expediency of further improvement of the blowing mode and slag regime of ladle desulphurization of processing cast iron have been confirmed.

Keywords: *ladle; cast iron desulfurization plant; cast iron; slag; drops; blowdown; metal grains.*

Постановка проблеми

Відомо, що інтенсифікація процесів видалення сірки з переробного чавуну шляхом вдунання реагентів у потоці інертних газів вглиб розплаву у ковші приводить до диспергування крапель металу та накопичення їх у покривному шлаку [1—3]. Втрати металу зі шлаком, що

скачують з поверхні розплаву переробного чавуну на установках скачування після закінчення процесу ковшової десульфуратії та втрати з металевими краплями, що покидають ковшову ванну при виході та розриві на її поверхні газових пузирів, впливають на собівартість та енергоефективність операції. В цілому, величина втрат заліза зі шлаком при проведенні десульфуратії за різними оцінками може складати від 30—60 % [5] до 80 % [4] від загальних втрат заліза в залежності від технології рафінування. За нашими даними, вдування у ковшову ванну суміші диспергованого магнію з вапном в умовах УДЧ ПрАТ «КАМЕТ—СТАЛЬ» приводить до підвищення як в'язкості, так і маси ковшових шлаків, зі збільшенням вмісту металу у вигляді корольків в ковшовому шлаку, що скачують після рафінування, до 68—79 %.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Загальні втрати заліза при ковшовій десульфуратії зазвичай розглядають як суму втрат заліза з різних джерел: краплі заліза, що потрапили до шлаку при інтенсивному введенні реагентів та перемішуванні розплаву чавуну безпосередньо по ходу рафінування; частина заліза у вигляді корольків у шлаку, що скачують з поверхні ванни після рафінування; наморожування певної кількості металу при випуску з ковша [4].

Особливості перебігу реакцій видалення сірки, гідрогазодинамічні закономірності при використанні стаціонарних та обертових заглибних фурм для вдування реагентів вглиб ковшової ванни, механізм утворення шлакових крапель і їх спливання на поверхню металеві ванни, параметри та особливості утворення відкритої зони на поверхні ванни, особливості переміщення металевих крапель у шарі покривного шлаку з поверненням у ванну та ін. частково розглянуті авторами даної роботи раніше [5—8].

До причин виникнення ендегенної металеві фази відносять винесення металу у шлак як у вигляді плівки на поверхні спливаючих газових пузирів газу—носію або суміші газу—носію з парами незасвоєного ванною магнію так і у вигляді «сліду» у кормовій частині пузиря. Пузири спливають до границь шлак—метал та метал—атмосфера в межах барботажної та реакційної зон відповідно. В останньому випадку формується вільна від шлаку зона. Умови та особливості формування вільної від шлаку зони на поверхні ванни по ходу продувки розглянуті в роботі [9]. При виході на границю метал—атмосфера в межах цієї області спливаючі газові пузири, покриті плівкою металеві розплаву, розриваються. Металева плівка внаслідок дії сил поверхневого натягу стягується у краплі різних діаметрів, що рухаються над поверхнею ванни за різними траєкторіями. Частина металеві крапель потрапляє на поверхню шлаку та має можливість повернутися у ванну як по ходу обробки, так і під час транспортування ківшу до установки скачування шлаку, інша — призводить до втрат заліза за рахунок формування корольків у шлаку.

Можливу траєкторію руху окремої металеві краплі, що містить неметалеві включення й переміщується у шлаку, розглянуто в роботі [12], а розрахунок резидентного часу перебування залізної краплі в шлаковій фазі — у роботі [13]. В залежності від маси краплі металу може залишитися на поверхні шлаку й лише у випадку надбання маси, коли сила тяжіння перевищує суму сил гідростатичного витискання й поверхневого натягу, опускається донизу. З цим, в тому числі, може бути пов'язано переважне накопичення корольків відносно малих діаметрів (менш 2,5 мм, а за оцінкою окремих авторів і менш 5 мм), утворених при вибуху «материнської» краплі, у поверхневому шарі шлаку. Величина втрат заліза з краплями таких фракцій може складати 0,7—1,1 % від маси чавуну. Відмічають, що вилучення мільких крапель зі шлаку магнітною сепарацією ускладнене та енергоємне, внаслідок необхідності тонкого змільчення затверділого ковшового шлаку [14].

При накопиченні металеві крапель у шлаку й під час переміщення внаслідок сил гравітацій відбувається їх зіткнення. Під час зіткнення у шлаковій фазі двох металеві крапель утворюється міжфазна плівка, яка під дією гравітаційних, динамічних, капілярних та т. ін. сил стоншується до певної критичної величини та розривається з подальшим злиттям крапель. Це призводить до порушення седиментаційної сталості та характеру розподілу крапель різних розмірів у покривному шлаку. Краплі під дією гравітації внаслідок різниці густин чавуну та шлаку осідають у металеву ванну. Співвідношення швидкостей винесення металеві крапель за межі ковша та осідання крізь шлакову фазу у метал у значній мірі визначає вміст корольків у кінцевому шлаку.

У роботі Смірнова О.М. [15], присвяченій вивченню умов спливання неметалевих включень (НВ) при продуванні ванни у проміжному ковші, відмічено, що переміщення крапель металу у шлаковій зоні визначається балансом вільної енергії. Кінетична енергія газового пузиря при його спливанні залишається постійною та не впливає на формування та рух металевих крапель. З цим можна погодитись, якщо врахувати, що витрати газу у проміжному ковші не перевищують 10—12 л/хв. й до основних механізмів потрапляння металу у шлак віднесені розрив металеві плівки та розпад струменя металу, сформованого при спливанні пузиря у шлаковій фазі. Відмічено, що при проходженні крізь шлакову фазу в кормовій частині пузиря формується «металевий потік» за рахунок стікання металеві плівки й зростання розміру пузиря. А при руйнуванні пузиря на границі «шлак—атмосфера» металева плівка повертається у шлак та переходить у металеву ванну. В умовах проведених фізичних експериментів (для умов спливання одиночних пузирів) бурління та розбризкування у місцях виходу пузирів на поверхню не спостерігалось.

Процес вдування десульфураторів (СаО та Mg) крізь заглибну фурми вглиб ковшової ванни (230-т чавунозаливальний ківш, витрати газу-носію 50—60 $\text{м}^3/\text{год}$) носить більш «бурхливий» характер, супроводжується розбризкуванням металу при розриві пузирів та винесенням металевих крапель за межі ванни.

Відмічаючи факт того, що сформована при розриві пузиря металева крапля може переміщатися у будь-якому напрямку з вихідною кінетичною енергією, автори [15] розглядають рух краплі над поверхнею ванни тільки у вертикальному напрямку.

Формулювання мети дослідження

Існування крапель металу у покривному шлаку у будь-який період ковшової обробки чавуну, як і втрати металу з винесенням потоками відхідних газів і викидами за межі ковшів є об'єктивним та невідворотнім. Енергоєфективні варіанти вилучення металу з ковшових шлаків десульфурації чавуну вкрай обмежені. Метою роботи є дослідження особливостей винесення у оточуючий простір металевих крапель, сформованих після розриву газових пузирів при виході на поверхню ковшової ванни й визначення заходів для зменшення втрат металу.

Виклад основного матеріалу

У попередніх дослідженнях авторами даної роботи виконано аналіз розподілу за геометричною формою та фракційним складом вилучених з промислових шлаків десульфурації корольків металу. Запропоновано розподіл за геометричною формою на три групи «А», «Б» та «В» [16]. До групи «А» віднесені корольки, в основному неправильної форми, які, напевне, утворюються переважним чином за рахунок сплесків рідкого металу в зоні вільній від шлаку та мають діаметр більш 10 мм; до групи «Б» — корольки шароподібної форми 2,5...10 мм та до групи «В» — корольки як шароподібної, так і неправильної форми з характерним діаметром менш 2,5 мм. При цьому співвідношення діаметрами відібраних зі шлаку корольків складало відповідно: 0,5...2,5 мм — 10...16 %; 6...8 мм — 10...20 %; >10 мм — 30...45 %; відсоток фракції корольків діаметром менш 0,5 мм — від 19 до 25 %.

В умовах лабораторії кафедри МЧМОМТ ДДТУ провели серію високотемпературних експериментів з моделюванням продувки ванни при ковшовій десульфурації чавуну. Використана установка на базі індукційної печі. Розплав переробного чавуну масою 100—110 кг з початковою температурою 1340—1360 °С продували аргоном крізь заглибну фурму з боковими соплами. У першій серії плавок продували розплав переробного чавуну вільного від шлакового шару на поверхні ванни з метою встановлення зон виходу пузирів на поверхню ванни, визначення висоти та напрямків вильоту крапель металу при розриві спливаючих пузирів газу при перетинанні границі метал—атмосфера. У наступній серії продували розплав з наведенням на його поверхні шару шлаку з основністю 1,1—1,4 та товщиною від 0,02 до 0,04 м.

Крім виділення та розподілу за розмірами та формою корольків зі шлаків після обробки по ходу продувки ванни проводили вловлювання металевих крапель, що вилітали за межі ванни зі збиранням у спеціальних ємностях з піском.

Фіксацію особливостей утворення зони, вільної від шлаку, розмірів пузирів перед їх руйнуванням на поверхні ванни, напрямків вильоту та довжини шляху польоту (l) металевих крапель забезпечували використанням швидкісної відеозйомки (120 кадрів/сек.).

Вивченням особливостей винесення та втрат чавуну з краплями при переливах останнього показано, що частина крапель у польоті вибухають з виділенням бурого диму та утворенням крапель менших розмірів ніж «материнська» крапля. Подібні процеси спостерігаються й при проведенні ковшової десульфуратії переробного чавуну як у лабораторних, так і у промислових умовах (рис. 1, а, б, в, г).

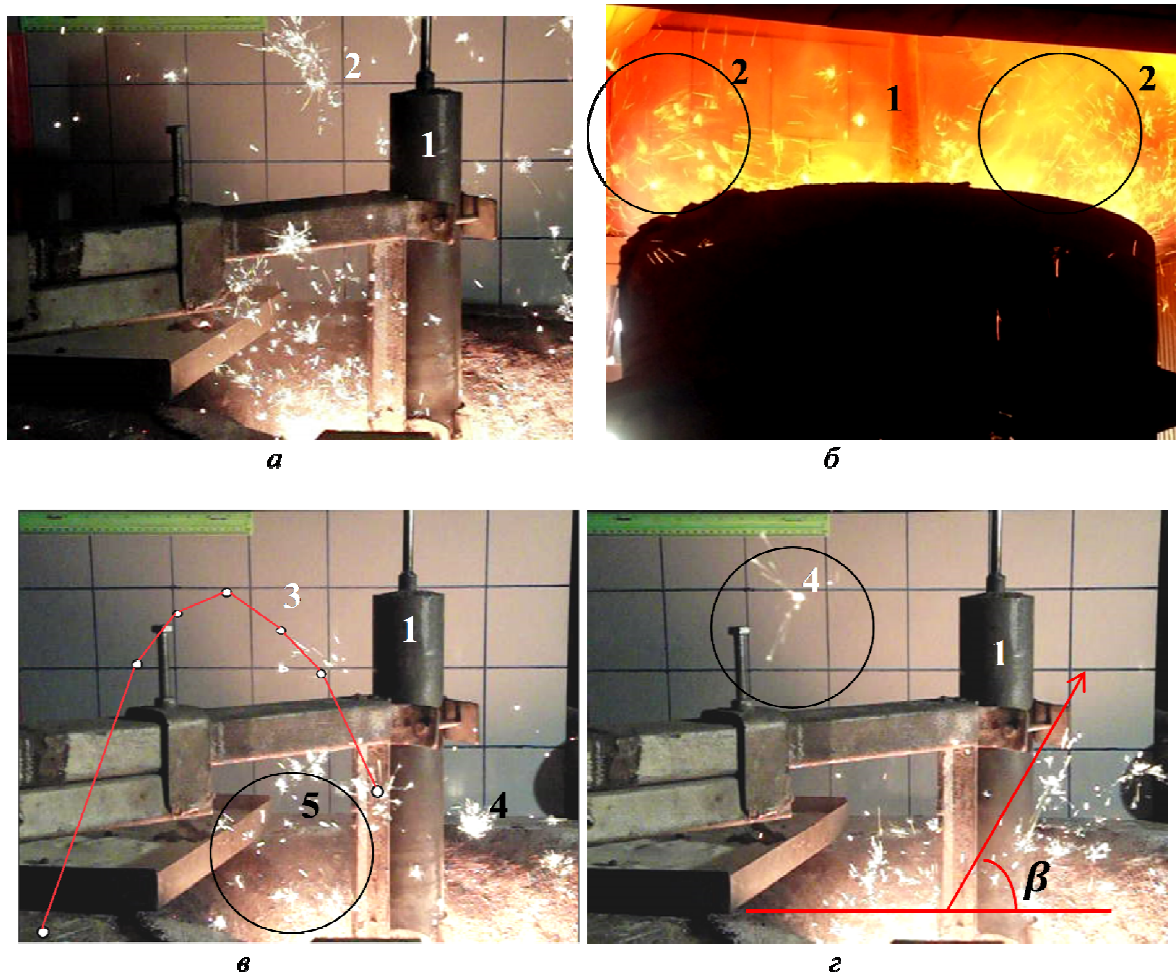


Рис. 1. Картина вильоту металевих крапель 2 за межі ковшової ванни при продуванні чавуну газом крізь заглибну фурму 1 у тиглі індукційної печі (а), у 230-т чавунозаливальному ковші (б), траєкторія польоту 3 (в) та вибух 4 «великої» краплі чавуну (г), що вилітає з поверхні ванни під кутом α з утворенням групи «дрібних» крапель та переміщення металевих крапель без вибуху 5

У роботі [17] показано, що «уламки» крупних крапель після вибуху носять сліди кількох разових вибухів. Вторинні бризки, що утворились при вибуху крупних крапель, мають діаметр у 10—20 разів менший. Якщо серед крапель діаметром більш 250 мкм частка зруйнованих внаслідок вибуху складає 100 %, то серед крапель розміром менш 30 мкм слідів вибуху не виявлено. Вірогідність вибуху крапель запропоновано визначати за виразом [17]: $P = 1 - e^{-0,16625 \cdot D/D_0}$, де D — діаметр металевої краплі, мкм; D_0 — мінімальний діаметр краплі, за якого починаються вибухові процеси, мкм.

Вибух крапель чавуну у польоті може бути результатом виділення пузиря CO при окисленні вуглецю крізь шар закису заліза, що утворився на поверхні краплі. В той же час для зародження пузиря у гомогенному середовищі потрібно до $10^{20000000}$ молекул CO, що свідчить про неможливість цього процесу. Але, за ствердженням автора наявність у чавуні твердої гетерогенної фази зі складним рельєфом поверхні (графіту), погана змашуваність її залізом, зниження

поверхневого натягу металу на викривленій міжфазній границі надає можливості утворенню пузиря СО та вибуху краплі.

В той же час, згідно з результатами проведених авторами даної роботи високотемпературних експериментів, частина металевих крапель, що вилітають за межі ванни під час її продування газом, не вибухає (рис. 1, в) незважаючи на перевищення визначених [17] для умов переливу чавуну, граничних розмірів (діаметром більш 0,25 мм).

З використанням отриманих експериментальних даних, даних попередніх досліджень [8—11], порівнянням з особливостями утворення барботажних зон та поведінки поверхні ковшової ванни при використанні обертових заглиблених фурм у східних умовах [6, 9] та результатів аналізу отриманих відеофайлів запропоновано модель виходу газових пузирів на поверхню ванни та алгоритм розрахунку показників переміщення металевих крапель, що сформовані з металеві півки на поверхні газових пузирів після їх розриву (без врахування вибухових процесів).

Згідно моделі процес перетинання границі метал-атмосфера газовим пузирем з металевію півкою на поверхні закінчується його розривом й вильотом металевію півки з шарового сегменту (з центральним кутом α) у оточуючий простір. Під дією сил поверхневого натягу з півки формуються металеві краплі, які рухаються від поверхні у різних напрямках під кутом.

Площа поверхні шарового сегменту газового пузиря, що вийшов на поверхню ванни на границі метал-атмосфера визначається за виразом, м²:

$$S = 2 \pi \cdot R \cdot h, \quad (1)$$

де $h = \frac{L}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4}$, L — діаметр основи шарового сегменту, м.

Після відповідних перетворень отримаємо:

$$S_c = 0.785 \cdot d^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4}. \quad (2)$$

Об'єм металевію півки на визначеній площі шарового сегменту газового пузиря складе, м³:

$$V = S_c \cdot \delta, \quad (3)$$

де $\delta = 5(\mu \cdot l / \rho \cdot U)^{1/2}$; δ — товщина металевію півки, м; l — характерний розмір, що відповідає діаметру пузиря, м; U — швидкість потоку, що набігає на півку на поверхні пузиря, м/с; μ — динамічна в'язкість, Па·с.

Таким чином об'єм металевію півки складе:

$$V = S_c \cdot 5(\mu \cdot l / \rho \cdot U)^{1/2} = 0.785 \cdot d^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} \cdot 5(\mu \cdot l / \rho \cdot U)^{1/2}. \quad (4)$$

Відповідно масу металевію півки, що зривається з поверхні сегменту, визначимо як, кг:

$$m = V \cdot \rho = 3.925 \cdot d^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} \cdot (\mu \cdot l / \rho \cdot U)^{1/2}. \quad (5)$$

Вираз для визначення роботи газу у спливаючому газовому пузирі має вигляд, Дж:

$$A = \frac{4 \cdot \sigma}{d} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^3}{6} \right) = 2.093 \cdot \sigma \cdot d^2, \quad (6)$$

де P — надлишковий тиск у пузирі, кг/м³; σ — поверхневий натяг, Н/м; d — діаметр пузиря, м.

Розрив пузиря забезпечує відповідну швидкість вильоту w металевію півки, м/с:

$$w = \sqrt{\frac{2A}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2.093 \cdot \sigma \cdot d^2}{3.925 \cdot d^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} \cdot (\mu \cdot l / \rho \cdot U)}} \quad (7)$$

на відстань:

$$L = \frac{w^2 \cdot \sin 2\beta}{g}. \quad (8)$$

Відношення довжини шляху польоту краплі до висоти її підйому (H) над поверхнею ванни можна визначити за виразом:

$$L / H = g \frac{\sin 2\beta}{\sin^2 \beta}. \quad (9)$$

Результати розрахунків з використанням виразів (1—9) для промислових умов продування розплаву чавуну у 230-т ковші, представлені на рис. 2 і 3.

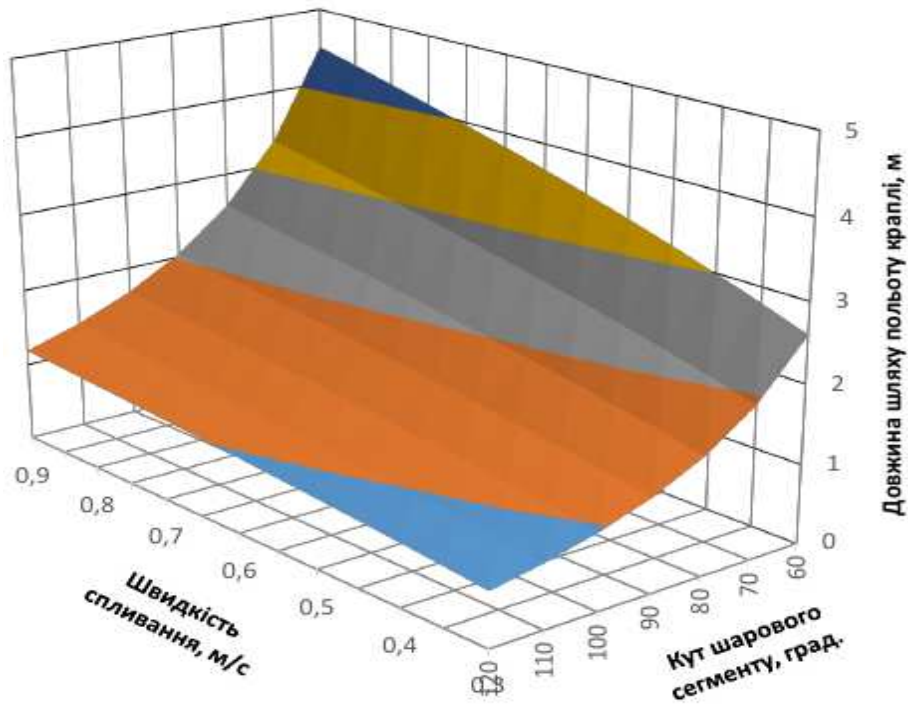


Рис. 2. Вплив швидкості спливання газових бульбашок з металевою плівкою на поверхні та центрального кута шарового сегменту на довжину шляху польоту металеві краплі

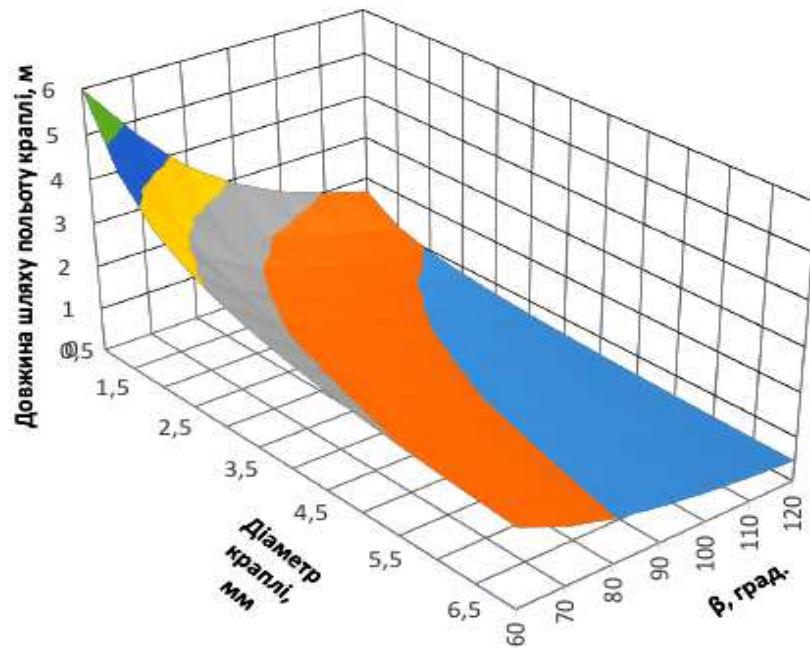


Рис. 3. Залежність довжини шляху польоту сформованої з плівки металеві краплі від її діаметру та кута вильоту при розриві газового бульбашки

Висновки

Проведені експериментальні дослідження з метою вивчення особливостей вильоту металевих крапель за межі ковшової ванни. Визначені характерні кути та значення висоти вильоту крапель над ванною, траєкторія їх польоту, відстань та тривалість їх переміщення у оточуючому ванну газовому середовищі. Запропоновано методику розрахунку втрат металу з краплями, що утворюються при розриві газових бульбашок на границі «метал—газ» при ковшовій десульфурзації переробного чавуну. Визначено, що найбільш вірогідним для умов продувки ванни у 230-т ковші є виліт крапель металу з поверхні ванни під кутами у діапазоні 35...45 град. В умовах вибуху частини крапель та при меншому куті вильоту може отримати розвиток переважне накопичення корольків малих розмірів у верхніх шарах покривного шлаку. Повернення їх у металеву ванну потребує додаткових заходів, пов'язаних з необхідністю розрідження шлаку та небезпекою ресульфурзації чавуну. Підтверджено визначальну роль фізико-хімічних властивостей шлакового покриву та доцільність подальшого удосконалення дуттьового і шлакового режиму ковшової десульфурзації переробного чавуну.

Список використаної літератури

1. Brodrick C. : Proc. 7th Int. Heavy Minerals Conf. on 'What next', The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, South Africa, 2009. P. 141–147.
2. Chevrier V.F. , Cramb A.W. X-ray fluoroscopy observations of bubble formation and separation at a metal-slag interface. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 31. 2000. P. 537–540. URL: <https://doi.org/10.1007/s11663-000-0159-z>
3. Han Z. Holappa L. Mechanisms of Iron Entrainment into Slag due to Rising Gas Bubbles. *ISIJ International*, № 3(43). 2003. P. 292–297. URL: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.292>
4. Оценка влияния технологии внепечной десульфурации чугуна на параметры шлакообразования в ковше А.Ф. Шевченко та ін. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*: Сб. научн. тр. Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2008. № 17, С.116–123.
5. Сігарьов Є.М., Похвалітій А.А., Довженко О.В. та ін. Закономірності масообміну між ковшовою ванною та покривним шлаком. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. 2018, № 2 (33), С. 3–8.
6. Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating. / E.N. Sigarev, A.G. Chernyatevich, K.I. Chubin [e.a.] // *Steel in Translation*, 2011. № 6, P. 487–491.
7. Desulfurization of iron using magnesium / E.N. Sigarev, A.G. Chernyatevich, K.I. Chubin // *Steel in Translation*, 2002, Vol. 32, № 2, P. 7–9.
8. Сігарьов Є.М., Довженко О.В., Похвалітій А.А. Закономірності формування та переміщення металевих крапель у ковшовому шлаку. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. 2020. № 1(36), С. 14–21.
9. Сігарьов Є.М., Крячко Г.Ю., Довженко О.В. та ін. Особливості формування зони хвиль та сплесків на поверхні ковшової ванни. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. 2021. №2 (39). С. 3–10.
10. Sigarev E., Manukian T., Yeskov D. Melt bubble behavior in a ladle with the usage of rotating lance // Trends in science and practice of today. Proceedings of the XXIX International Scientific and Practical Conference. Stockholm, Sweden. 2022. P. 298–302. DOI: 10.46299/ISG.2022.1.29
11. Sigarev E., Dovzhenko O., Lobanov Y., Chernyatevich I., Chubina O. Дослідження впливу технологічних факторів на втрати чавуну при видаленні сірки у ковші / Theoretical foundations of engineering. Tasks and problems: collective monograph / Boiko T., Boiko P., – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2021, № 485, P. 375–383. DOI-10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.III
12. Ефимова В.Г. Формирование металлических капель в шлаковой фазе при продувке стали инертным газом в промежуточном ковше МНЛЗ. *Металл и литье Украины*, 2014, №1 (248), С. 20–24.

13. Study of Slag–Metal Reactions in an LD–LBE Converter / C. Cicutti, M. Valdez, T. Perez, J. Petroni, A. Gomez, R. Donayo, L. Ferro // *Proc. Slag Conf.*, Stockholm, 2000, P. 79–88.
14. M. Magnelow, J. Eriksson, J. Drugge, J. Bjorkvall and B. Bjorkmann: *Ironmaking Steelmaking*, 40 (2013), No. 6, 436.
15. Смирнов А.Н., Ефимова В.Г., Кравченко А.В. Исследование условий всплытия неметаллических включений при продувке аргоном жидкой ванны промежуточного ковша МНЛЗ. Сообщение 2 // *Изв. Вузов. Черная металлургия*. 2014. №1. С. 19–25.
16. Сігарьов Є.М., Похвалітій А.А., Довженко О.В., Чубіна О.А. Характеристика металевих корольків у шлаку після десульфурації чавуну за схемою коінжекції реагентів. *Збірник наукових праць ДДТУ*. 2019. №2 (35). С. 10–16.
17. Кравец В.А., Лоцман А.А., Попов А.Л. Фазовые превращения, приводящие к выбросам графита, монооксида углерода и бурого дыма при переливах чугуна. *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. 2013. № 4 (102), С. 144–150.

DISTRIBUTION OF METAL DROPLETS BETWEEN GAS AND SLAG PHASES DURING BUCKET BATH BLOWING

Sigarev E., Yeskov D., Pohvalityi A., Manukian T.

Abstract

Losses of metal with slag falling from the surface of the molten cast iron at the loading plants after the end of the ladle desulfurization process and losses with metal drops leaving the ladle bath when gas bubbles exit and break on its surface affect the cost and energy efficiency of the operation. Blowing a mixture of dispersed magnesium with lime into the ladle bath in the conditions of cast iron desulphurization plant PrJSC "KAMET—STEEL" leads to an increase in both the viscosity and the mass of the ladle slag, with an increase in the metal content in the form of balls in the ladle slag to 65—80 %.

The purpose of the work is to study the peculiarities of the removal of metal drops into the surrounding space, which are formed after the bursting of gas bubbles, when they fall on the surface of the ladle bath. To realize the set goal, a series of high—temperature experiments with simulation of bath purging during bucket desulfurization of cast iron were conducted in the laboratory conditions of the Department of metallurgy of ferrous metals and pressure metal processing of DSTU. A study of the features of removal and loss of cast iron with drops during overflows of the latter shows that some of the drops explode in flight with the release of brown smoke and the formation of drops of smaller sizes than the "mother" drop. Despite favorable conditions, part of the drops reach the surface of the bath or fly beyond it without exploding. Using the obtained experimental data, a model of the release of gas bubbles on the surface of the bath and an algorithm for calculating the indicators of the movement of metal drops formed from a metal film on the surface of gas bubbles after their rupture are proposed. It was determined that the most probable condition for blowing out the bath in a 230-ton bucket is the departure of metal drops from the surface of the bath at angles in the range of 35...45 degrees. The decisive role of the physicochemical properties of the slag cover and the expediency of further improvement of the blowing mode and slag regime of ladle desulphurization of processing cast iron have been confirmed.

References

- [1] Brodrick, C. (2009). Desulphurization of pig iron using calcium carbide based reagents. Proceedings of the *Heavy Minerals Conference «What next?»*. (pp. 141-147). Johannesburg: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- [2] Chevrier, V.F., Cramb, A.W. (2000). X-ray fluoroscopy observations of bubble formation and separation at a metal-slag interface. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 31, 537–540. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11663-000-0159-z>

- [3] Han, Z., Holappa, L. (2007). Mechanisms of Iron Entrainment into Slag due to Rising Gas Bubbles. *ISIJ International*, 3 (43), 292-297, Retrieved from <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.292>
- [4] Shevchenko, A.F., Kurilova, L.P., Kislyakov, V.G., Bashmakov, A.M., Rudenko A.L. (2008). Otsenka vliyaniya tekhnologii vnepechnoy desulfuratsii chuguna na parametry shlakoobrazovaniya v kovshe [Evaluation of the effect of out-of-furnace iron desulfurization technology on the parameters of slag formation in the ladle]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii – Fundamental and Application Problems of Iron and Steel Industry*, 17, 116-123. Retrieved from <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/22352> (In Russian).
- [5] Sigarev, Ye.M., Pokhvalityi, A.A., Dovzhenko, O.V. [et al.]. (2018). Zakonomirnosti masoobminu mizh kovshovoyu vannoyu ta pokryvnyim shlakom [Patterns of mass transfer between the ladle bath and the covering slag]. *Zbirnik naukovykh prats DDTU (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of DSTU (Technical Sciences)*, 2 (33), 3–8. (in Ukrainian).
- [6] Sigarev, E.N., Chernyatevich, A.G., Chubin, K.I. [et al.]. (2011). Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating. *Steel in Translation*, 6, 487–491.
- [7] Sigarev, E.N., Chernyatevich, A.G., Chubin, K.I. (2002). Desulfurization of iron using magnesium. *Steel in Translation*, 2 (32), 7–9.
- [8] Sigarev, Ye.M., Dovzhenko, O.V., Pokhvalityi, A.A. (2020). Zakonomirnosti formuvannya ta peremishchennya metalevykh krapel u kovshovomu shlaku [Patterns of formation and movement of metal drops in ladle slag]. *Zbirnik naukovykh prats DDTU (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of DSTU (Technical Sciences)*, 1(36), 14–21. (in Ukrainian).
- [9] Sigarev, Ye.M., Kryachko, H.Yu., Dovzhenko O.V. [et al.]. (2021) Osoblyvosti formuvannya zony khvyl ta spleskiv na poverkhni kovshovoyi vanny [Features of the formation of the zone of waves and splashes on the surface of the bucket bath]. *Zbirnik naukovykh prats DDTU (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of DSTU (Technical Sciences)*, 2 (39), 3–10. (in Ukrainian).
- [10] Sigarev, E., Manukian, T., Yeskov, D. (2022). Melt bubble behavior in a ladle with the usage of rotating lance // *Proceedings of the XXIX International Scientific and Practical Conference « Trends in science and practice of today»*. (pp. 298–302). Stockholm, Sweden. Retrieved from <https://doi.org/10.46299/ISG.2022.1.29>
- [11] Sigarev, E., Dovzhenko, O., Lobanov, Y., Chernyatevich, I., Chubina, O. (2021). Doslidzhennya vplyvu tekhnolohichnykh faktoriv na vtraty chavunu pry vydalenni sirky u kovshi [Study of the influence of technological factors on iron loss during the removal of sulfur in the ladle]. T. Boiko, P. Boiko (Eds.), *Theoretical foundations of engineering. Tasks and problems: collective monograph*. Boston : Primedia eLaunch, 485, 375–383. Retrieved from <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.III>
- [12] Yefimova, V.G. (2014) Formirovaniye metallicheskih kapel' v shlakovoy faze pri produvke stali inertnym gazom v promezhutochnom kovshe MNLZ [Formation of metal drops in slag phase at steel blowing inert gas in the tundish of CCM]. *Metall i lit'ye Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, 1 (248), 20–24. (in Russian).
- [13] Cicutti, C., Valdez, M., Perez T. [et al.]. (2000) Study of Slag–Metal Reactions in an LD–LBE Converter. *Molten Slags, Fluxes and Salts: Proceedings of the Sixth International Conference*. (pp. 79–88). Stockholm, Sweden. Retrieved from <https://pyrometallurgy.co.za/MoltenSlags2000/pdfs/111.pdf>
- [14] Magnelöw, M., Eriksson, J., Drugge, J., Bjorkvall J., Bjorkmann, B. (2013). Investigation of iron losses during desulphurisation of hot metal utilising nepheline syenite. *Ironmaking & Steelmaking*, 6 (40), 436–442. Retrieved from <https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000067>
- [15] Smirnov, A.N., Yefimova, V.G., Kravchenko, A.V. (2014). Issledovaniye usloviy vsplytiya nemetallicheskih vklyucheniy pri produvke argonom zhidkoy vanny promezhutochnogo kovsha MNLZ. Soobshcheniye 2 [Study conditions of non-metallic inclusions flotation during argon injection of liquid bath tundish CCM. Report 2]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya –*

- Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 1 (57), 19–25. Retrieved from <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-1> (in Russian).
- [16] Sigarev, Ye.M., Pokhvalityi, A.A., Dovzhenko, O.V., Chubina, O.A. (2019). Kharakterystyka metalevykh korol'kiv u shlaku pislya desul'furatsiyi chavunu za skhemoyu koinzhektsiyi reahentiv [Characteristics of metal balls in slag after desulfurization of cast iron according to the co-injection scheme of reagents]. *Zbirnik naukovykh prats DDTU (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of DSTU (Technical Sciences)*, 2019, no. 2 (35), pp. 10–16. Retrieved from <https://doi.org/10.31319/2519-2884.35.2019.36> (in Ukrainian).
- [17] Kravets, V.A., Lotsman, A.A., Popov, A.L. (2013) Fazovyie prevrashcheniya, privodyashchiye k vybrosam grafita, monooksida ugleroda i burogo dyma pri perelivakh chuguna [Phase transformations leading to emissions of graphite, carbon monoxide, and red fume (brown smoke) at pig-iron overflow]. *Visnyk Donbas'koyi natsional'noyi akademiyi budivnytstva i arkhitektury – Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 4 (102), 144–150. (in Russian).