

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА ПЕРЕМІЩЕННЯ
МЕТАЛЕВИХ КРАПЕЛЬ У КОВШОВОМУ ШЛАКУ**

Вступ. По ходу ковшової десульфурзації введений та розчинений у металевій ванні магній утворює газові бульбашки, які спливають до границь „шлак-метал“, „атмосфера-шлак“ та „атмосфера-метал“ (область вільного від шлаку „ока“). Якщо прийняти, що сірка, у переважній кількості, вступає у реакцію з магнієм на поверхні його бульбашок [1], то її концентрація визначиться величиною адсорбції відповідно до рівняння Гіббса, кг/м^2 : $\Gamma = -\frac{[S]}{RT} \frac{\partial \sigma}{\partial S}$, де $[S]$ – поточний вміст сірки у металевому розплаві, %; $\frac{\partial \sigma}{\partial S}$ – відношення зміни поверхневого натягу розплаву та $[S]$.

З врахуванням того, що концентрація магнію у бульбашці значно перевищує концентрацію сірки на його поверхні, можна вважати, що вся сірка перетворюється на $\text{MgS}_{\text{ТВ}}$. Одночасно протікає процес розкислення розплаву. Продукти взаємодії магнію з сіркою та киснем у вигляді плівок $\text{MgS}_{\text{ТВ}}$ та $\text{MgO}_{\text{ТВ}}$ накопичуються на границі газовий бульбашка-розплав [2].

Таким чином, поверхня бульбашок вкривається металеву оболонку, у складі якої є поверхнево активна сірка, яка, крім того, з об'єму металу дифундує до поверхні бульбашки. Бульбашка з металеву плівкою на поверхні після спливання на границю „шлак-метал“ у області „ока“ руйнується з викиданням у оточуючий простір рідких крапель металу, насичених $[S]$, а покривний шлак, у свою чергу, збагачується $\text{MgS}_{\text{ТВ}}$ та $\text{MgO}_{\text{ТВ}}$ за рахунок змивання металеву плівки з кормову частини бульбашки у шлак. Раніше встановлено [3], що у залежності від фізико-хімічного стану шлаку покриті металеву плівкою бульбашки, що руйнуються, можуть утворювати як частинки округлої або овальної, так і частинки неправильної форми. При руйнуванні бульбашок в гетерогенному сухому шлаку утворюються у переважній кількості металеві краплі неправильної форми. У межах „ока“ при перетинанні границі „атмосфера-метал“ металеву оболонку з поверхні бульбашок у момент їх руйнування викидається під різними кутами на поверхню шлаку та у оточуючий простір, подрібнюється і формує ендогенну металеву фазу у шлаку у вигляді крапель (а після кристалізації – корольків) різних фракцій. Визначено також, що співвідношення характерних груп за діаметрами металевих корольків складає: 0,5...2,5 мм – 10...16%; 6...8 мм – 10...20%; >10 мм – 30...45%. Зі зменшенням діаметра корольків від 2,5 мм та менше спостерігається тренд на підвищення в останніх вмісту сірки. Вміст сірки у корольках < 0,5 мм сягає, а у більшості випадків і перевищує цей показник для шлаку.

З метою підвищення ступеня видалення з ковшової ванни продуктів десульфурзації, розчинених у металі газів та т. ін., застосовують метод післяпродувного перемішування („post stirring“). Останній характеризується сукупністю фізико-хімічних процесів, для яких характерними є утворення металеву емульсії у шлаку, виділення металевих крапель, підвищення інтенсивності масопереносу між фазами, що не змішуються та т. ін. При цьому переважна кількість дослідників, як відмічено у роботі Смірнова О.М.

[4], вважає, що механізм потрапляння металевих крапель у покривний шлак (у промковші МБЛЗ) заснований на розриві металевієї плівки на поверхні газового пузиря.

До можливого механізму потрапляння металевих крапель у шлак необхідно віднести також їх захоплення нижнім шаром шлаку, який зтягується циркуляційними потоками до металевієї ванни [5]. Винесені у шлак краплі коалесцують та за умови досягнення критичного розміру (3-5 мм), коли дія сили тяжіння стає більшою, ніж сила поверхневого натягу, осідають у нижні шари шлаку до границі з металом, а за умов достатньої витримки – повертаються до металевієї ванни. На швидкість їх осідання впливає величина міжфазного натягу на границі „шлак-метал“, в'язкість шлаку та умови коалесценції крапель. На швидкість коалесценції металевих крапель у шлаку впливають дифузійні фактори – інтенсивність перемішування та підвищення температури.

При цьому коалесценція може і не відбутися внаслідок відносно великого міжфазного натягу системи „шлак-метал“ (0,6 Нм) та невеликої відносної швидкості крапель ($\leq 8 \cdot 10^{-3}$ м/с) при високій в'язкості шлаку. Як відомо [6], в умовах конвертування переробного чавуну з підвищенням в'язкості шлаку з 0,065 Па·с до 0,195 Па·с ефективність осадження крапель зменшується з 90 до 59%.

Постановка задачі. Покривний шлак, що скачують з поверхні ковшової ванни після десульфурації, містить від 65 до 80% заліза. Ефективна екстракція металу зі шлаку та полегшення переробки відходів шлаку залишаються актуальними завданнями. Метою досліджень є розвиток уявлень стосовно закономірностей та механізму переміщення металевих крапель у шлаковій фазі при ковшовій десульфурації чавуну в залежності від характеристик шлаку, механізмів перенесення металу у шлак на поверхні спливаючих газових пузирів та повернення у металеву ванну.

Результати роботи. З метою з'ясування масообмінних закономірностей при використанні заглибної фурми для продувки у ковші проведено серію експериментів на холодній моделі ковша з використанням критеріїв Архімеда, Лапласа, Фруда та симплексів $\frac{\eta_m}{\eta_g}$, $\frac{\rho_m}{\rho_g}$, $\frac{\rho_{ш}}{\rho_ч}$ та $\frac{h_{ш}}{h_ч}$ (відповідно до в'язкості масла та води, густини масла та води, густини шлаку та чавуну, висоти шарів шлаку та чавуну у ковші).

Масштаб моделі з плексигласу 1:12 по відношенню до 230-т ковша конвертерного цеху ПАТ „Дніпровський меткомбінат“. Для експериментів використовували виділену на моделі заливального ковша характерну для промислових умов „область переважного спливання газових пузирів“. При проведенні експериментів рідкий чавун моделювали водою (з температурою 20⁰С), покривний шлак – моторними маслами в'язкістю від 0,05 до 0,07 Па·с. Вода при температурі 20⁰С, покривний шлак та чавун при температурах ковшової обробки 1200-1400⁰С мають в'язкість 0,00102 Па·с, 0,05-0,30 Па·с та 0,002-0,004 Па·с відповідно.

У такому випадку величина симплексу ($\frac{\eta_m}{\eta_g} = 49,0 \div 68,6$) знаходиться у межах величин симплексу в'язкості шлаку та чавуну (25÷150). Симплекси густини масел та води $\frac{\rho_m}{\rho_g} = 0,85 \div 0,91$ та шлаку з чавуном $\frac{\rho_{ш}}{\rho_ч} = 0,41 \div 0,47$ одного порядку. Як і рідкий чавун і покривний шлак, так і масло і вода взаємно нерозчинні.

У якості індикатора, що характеризував процес перенесення металевієї плівки на поверхні газових пузирів крізь міжфазні границі, використали сині чорнила, якими було підфарбовано моделючу чавун речовину (воду).

Товщина моделі покривного шлаку (масло) на поверхні ванни складала від 0,03 до 0,07 м. Модельні фурми для вдування газу зі змінними соплами діаметром від 0,2 до

1,2 мм занурювали у ванну глибиною 300-320 мм. Продувку ванни компресорним повітрям проводили як у «пузирковому» режимі, так і з використанням сформованих рівномірно у часі „поодиноких» пузирів. Процес продування фіксували відеокамерою з використанням методів високошвидкісної зйомки (240 кадрів/с).

У даній роботі розглянуто особливості перетинання границі „метал-шлак» газовими пузирями, вкритими металевою оболонкою, за межами виходу основного потоку газових об'ємів в області утворення „ока» на поверхні ванни [1]. Іншим завданням було визначення умов переміщення та накопичення металу у шлаковому шарі за відсутності інтенсивного перемішування останнього (за умов ламінарного режиму, критерій Рейнольда $Re \leq 1$). Для кожного варіанту продувки ванни експерименти проводили декілька разів, похибка визначення величин не перевищувала 2%.

Як вже показано вище, спливаючі до верхніх горизонтів ванни газові пузири, на поверхні яких проходить реакція утворення $MgS_{ТВ}$, оточені плівкою металевого розплаву. З врахуванням рівності сил поверхневого натягу та підйомної сили Архімеда радіус пузиря, що спливає до границі „шлак-метал», дорівнюватиме, м:

$$r = \left(\frac{3 \cdot r_{KP} \cdot \sigma}{2 \cdot g(\rho_M - \rho_G)} \right), \quad (1)$$

де K_P – коефіцієнт опору; σ – поверхневий натяг розплаву, Н/м; $\rho_{ж}$ – густина розплаву, кг/м³; $\rho_G = \frac{P \cdot \mu}{R \cdot T}$ – густина газової суміші парів магнію та азоту, кг/м³; μ – молярна маса сірки, кг/кмоль.

При переході пузиря через границю „шлак-метал» остання прогинається, пропускаючи металеву плівку на поверхні пузиря у шар шлаку. Металева плівка може як піднятися до границі „атмосфера-шлак», так і відділитися від пузиря на визначеній висоті з подальшим формуванням краплі металу та його опусканням до металевої ванни. При цьому металева крапля, що опускається з верхніх шарів шлаку, може як обминати наступний газовий пузир, що піднімається назустріч, так і зливатися з металевою плівкою, що піднімається на поверхні останнього. Як вважають автори [7], надалі, у залежності від співвідношення підйомної та сили опускання краплі у шлаку, система „газовий пузир – крапля металу» у шлаку буде підніматися, знаходитися у нерухомому стані або опускатися.

У ході проведених авторами даної роботи досліджень встановлено, що механізми потрапляння, накопичення крапель металу у шарі покривного шлаку та повернення металу до металевої ванни за рахунок гравітаційних сил можна класифікувати наступним чином.

До першого механізму можна віднести змивання металевої оболонки з поверхні пузиря при перетинанні границі „метал-шлак». В такому випадку рідкий метал під впливом сил поверхневого натягу у вигляді крапель шароподібної форми накопичується у шарі шлаку, який щільно контактує з основною металевою ванною (у нижній частині шару шлаку). Внаслідок реалізації цього механізму у такій зоні відтискається шар шлаку і газові пузири легко проникають у середні та верхні горизонти шлакової ванни крізь металевий прошарок (тунель) у нижній частині шлаку на границі „шлак-метал» (рис.1). У такому випадку вплив товщини шлаку на переміщення металевих крапель мінімізується. Газові пузири у залежності від їх розміру та питомої витрати газу спливають як своєрідними агломератами із чітко вираженими металевими прошарками між окремими пузирями, так і у „поодинокому» режимі за умов досягнення необхідного розміру (згідно з рівнянням (1)) (рис.2, б).

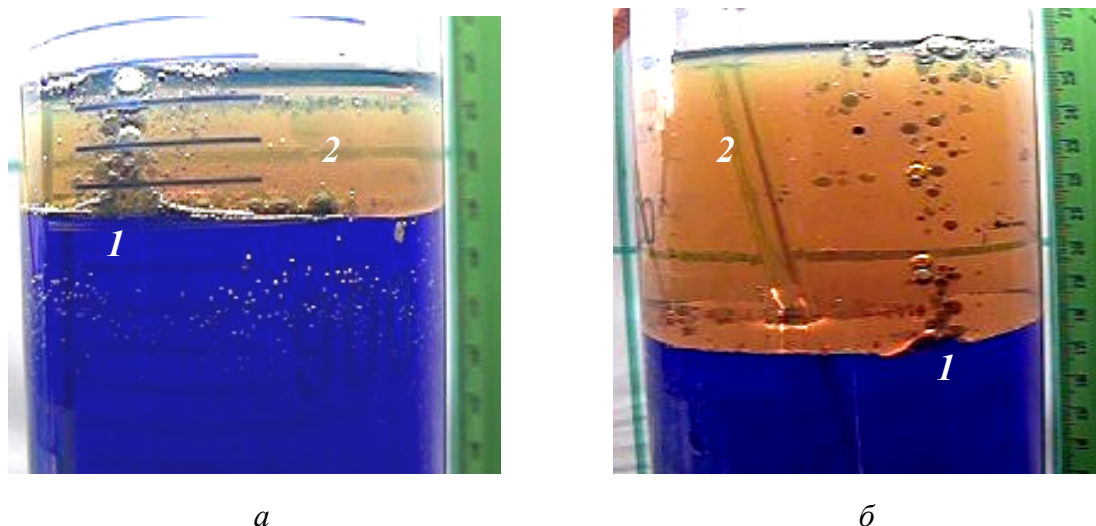


Рисунок 1 – Вигляд формування „проривної“ металеві зони (тунелю) 1 на границі „метал-шлак“ 2 у шлаковій ванні товщиною 30 (а) та 70 мм (б)

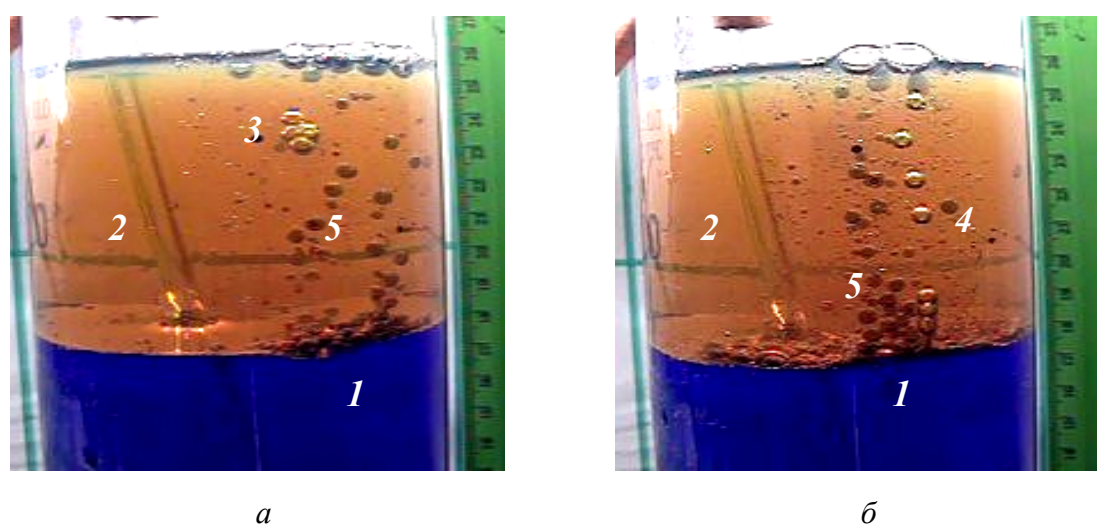


Рисунок 2 – Спливання агломерацій 3 (а) та поодиноких пузирів 4 (б) у шлаку та формування „металевих“ крапель 5 у „шлаку“ 2

До другого механізму можна віднести відрив металевого „шлейфу“, що тягнеться за спливаючим пузирем на відповідному рівні H_T у шлаковому шарі, який визначається за виразом [8]

$$H_T = H_{шл} \cdot \frac{\rho_{шл}}{\rho_M}, \quad (2)$$

де $H_{шл}$ – товщина шлакового покрову, м; $\rho_{шл}$ та ρ_M – густина шлаку та металу, кг/м^3 з подальшим опусканням шароподібних крапель рідкого металу крізь шлак до границі „метал-шлак“ з поверненням у металеву ванну (рис.3, а).

Встановлені закономірності в цілому корелюють із описаними у роботі [9] механізмами формування „рідкої лінії току“ при підйомі пузирів, вкритих металеві плівкою, у шлаку. Максимальна довжина лінії току може бути визначена за виразом:

$$H_{\text{ЛТ}} = 3,09d_{\text{П}}(We_{\text{М-ШЛ}})^{0,8}, \quad (3)$$

де $d_{\text{П}}$ – діаметр пузиря, м; $We_{\text{М-ШЛ}}$ – число Вебера для спливання пузиря у металевому та шлаковому розплавах.

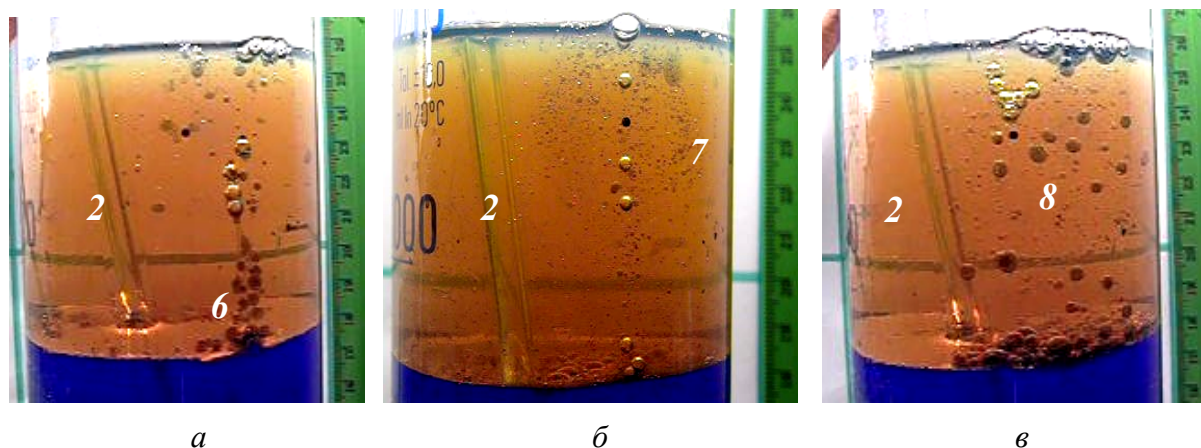


Рисунок 3 – Утворення (а) та відрив металевих „шлейфів“ б від газового пузиря з формуванням осідаючих до границі „шлак-метал“ невеликих 7 та крупних 8 крапель „металу“

За результатами обробки отриманих за результатами даної роботи даних встановлено, що рівень відриву металевих „шлейфів“ від пузиря у шлаковому шарі можна описати рівнянням

$$H_x = 0,264 \cdot H_{\text{ШЛ}}. \quad (4)$$

Наприклад, для умов десульфурації чавуну у 230-т заливальному ковші на УДЧ конвертерного цеху ПАТ „ДМК“ [10] цей показник може скласти 0,39-0,48 від висоти шлакового покриву в залежності від динаміки його додаткового утворення по ходу обробки та зміни в'язкості шлаку.

До третього варіанту формування та накопичення металевих крапель у шлаку можна віднести повернення у ванну залишків металевих плівок після розриву газового пузиря на границі „атмосфера-шлак“ (рис.3, б, в).

У такому випадку при спливанні поодиноких пузирів (рис.3, б) останні після досягнення границі „атмосфера-шлак“ утворюють газову порожнину над поверхнею шлаку, яка після досягнення відповідного внутрішнього тиску розриває металеву оболонку купола з викиданням металевих крапель у оточуюче середовище та на поверхню шлаку. Утворені металеві краплі невеликого розміру частково опускаються у шлаку симетрично до шляху підйому спливаючих газових пузирів (рис.3, б), а частково залишаються у верхніх шарах шлаку. У свою чергу, металева оболонка з нижньої частини газової порожнини після руйнування останньої осідає крізь шар шлаку до границі „метал-шлак“ та у металеву ванну.

При спливанні агломерацій пузирів третій механізм утворення та повернення до металевих крапель металевих крапель металевих крапель переважує над іншими (рис.3, в). Краплі металевих крапель більшого, ніж у випадку (рис.3, б), розміру опускаються до границі „метал-шлак“.

Вирази для визначення швидкості руху металевих крапель, сформованих у шлаковому покриві, запропоновані за результатами чисельних досліджень [8, 11-13], наведено у табл.1.

Результати розрахунків, виконаних для умов післяпродувного перемішування ванни у 230-т заливальному ковші конвертерного цеху ПАТ „ДМК”, з використанням, наприклад, рівняння 1 (табл.1), наведено на рис.4.

Таблиця 1 – Вирази для визначення швидкості руху металевих крапель у шлаковому покриві

№	Вираз	Джерело
1	$V_1 = \frac{2}{9} \cdot g \cdot r_K^2 \cdot \frac{\rho_M - \rho_{ШЛ}}{\eta_{ШЛ}}$	[11]
2	$V_2 = \frac{2}{3} \cdot g \cdot r_K^2 \cdot \frac{\rho_M - \rho_{ШЛ}}{\eta_{ШЛ}} \cdot \frac{\eta_{ШЛ} + \eta_M}{2\eta_{ШЛ} + 3\eta_M}$	[12]
3	$V_3 = \sqrt{\frac{8 \cdot g \cdot r_K \cdot (\rho_M - \rho_{ШЛ})}{3 \cdot \rho_{ШЛ} \cdot k_f}}$	[11]
4	$V_4 = \frac{2 \cdot A \cdot g \cdot r_K^2}{3 \cdot \eta_{ШЛ}} \cdot \frac{\eta_{ШЛ} + \eta_M}{2 \cdot \eta_{ШЛ} + 3 \cdot \eta_M}$, де $A = \left[\rho_M - \rho_{ШЛ} \left(1 + \frac{r_{II}^3}{r_K^3} \right) \right]$	[11]
5	$V_5 = \sqrt{\frac{8 \cdot A \cdot g \cdot r_K}{3 \cdot \rho_{ШЛ} \cdot k_f}}$, де $A = \left[\rho_M - \rho_{ШЛ} \left(1 + \frac{r_{II}^3}{r_K^3} \right) \right]$	[11]
6	$V_6 = \frac{2 \cdot g \cdot r_K^2 \cdot (\rho_M - \rho_{ШЛ})}{18 \cdot \eta_{ШЛ}}$	[11]
7	$V_7 = \sqrt{\frac{8 \cdot g \cdot r_K \cdot (\rho_M - \rho_{ШЛ})}{3 \cdot \rho_{ШЛ} \cdot k_f}}$, де $k_f = 18,5 / Re^{0,6}$ для $2 < Re < 500$ $k_f = 0,44$ для $500 < Re < 1500$	[8]
8	$V_8 = \sqrt{12,12 \cdot g \cdot r_K \cdot \frac{(\rho_M - \rho_{ШЛ})}{\rho_{ШЛ}}}$	[11]
9	$V_9 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot r_K \cdot (\rho_M - \rho_{ШЛ})}{3 \cdot \rho_{ШЛ} \cdot k_f}}$	[11]
10	$V_{10} = \frac{4 \cdot g \cdot r_K^2 \cdot (\rho_M - \rho_{ШЛ})}{3 \cdot \eta_{ШЛ} \cdot (1 + 0,25 \cdot Re + 0,1 \cdot Re^2 \cdot \ln Re)}$	[12]
11	$V_{11} = \frac{0,78 \cdot (2 \cdot r_K)^{1,14} \cdot (\rho_M - \rho_{ШЛ})}{\rho_M^{0,285} \cdot \eta_{ШЛ}^{0,43}}$	[13]

У табл.1: r_K та r_{II} – радіуси краплі металу у шлаку та спливаючого у шлаку газового пузиря, покритого металевою оболонкою, відповідно, м; g – прискорення вільного падіння, м/с²; ρ_M та $\rho_{ШЛ}$ – густини металу та шлаку відповідно, кг/м³; η_M та $\eta_{ШЛ}$ – динамічна в'язкість металу та шлаку відповідно, Па·с.

Як видно з рис.4, діаметр крапель металу нелінійно впливає на швидкість їх опускання у шлаку до границі „шлак-метал”. Існує певний максимум швидкості опускання у залежності від в'язкості шлаку та його товщини.

Висновки. За результатами моделювання запропоновано класифікацію механізмів перенесення, переміщення у шарі покривного шлаку та осадження у металеву ванну крапель металу. Діаметр крапель металу, переміщених у шар покривного шлаку, нелі-

нійно впливає на швидкість їх опускання до границі „шлак-метал”. На швидкість опускання крапель впливає в’язкість шлаку. Для умов 230-т ковша мінімальний час повернення металу з шлаку до металевої ванни, як і очікували, отримано для в’язкості шлаку у діапазоні 0,1-0,25 Па·с та товщини останнього до 150 мм, з перевищенням цієї величи-

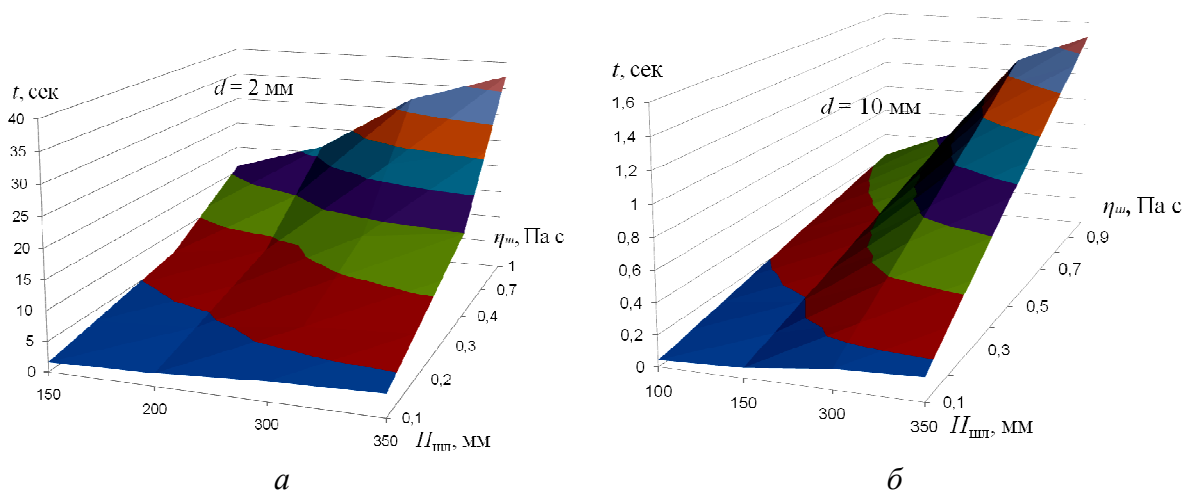


Рисунок 4 – Залежність тривалості опускання крапель металу діаметром 0,002 м (а) та 0,010 м (б) у шарі покривного шлаку в залежності від його товщини та в’язкості

ни тривалість опускання металевих крапель різко збільшується. Таким чином, до основних завдань для повернення крапель металу до металевої ванни під час післяпродувного перемішування можна віднести забезпечення мінімальної в’язкості покривного шлаку, підвищення різниці густини чавуну та шлаку, мінімізацію товщини шлакового шару на поверхні ванни, створення умов для коалесценції крапель металу у шарі шлаку. Використання останнього фактору для досягнення завдань зменшення втрат металу зі шлаком, що скачують після десульфурації з поверхні ванни, представляється особливо ефективним внаслідок того, що радіус крапель входить до ряду виразів для визначення швидкості осадження (табл.1) у квадраті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сігарьов Є.М., Кочмола Д.С., Сігарьов М.К. Формування відкритої зони на міжфазовій границі при ковшовому рафінуванні розплаву. *Зб. наукових праць Дніпровського технічного університету (технічні науки)*, 2018. Вип. 1(32). С.3-9.
2. Сігарьов Є.М., Кочмола Д.С., Чубін К.І. Вплив покривного шлаку на перебіг ковшової десульфурації чавуну. *Теорія і практика металургії*. 2018. №1-2. С.67-75.
3. Сігарьов Є.М., Похвалітий А.А., Довженко О.В., Чубіна О.А. Характеристика металевих корольків у шлаку після десульфурації чавуну за схемою коінжекції реагентів. *Зб. наукових праць Дніпровського технічного університету (технічні науки)*, 2019. Вип. 2(35). С. 10-16.
4. 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.
5. Сігарьов Є.М., Похвалітий А.А., Довженко О.В., Ісаков В.Н. Закономірності масообміну між ковшовою ванною та покривним шлаком. *Зб. наукових праць Дніпровського технічного університету (технічні науки)*, 2018. Вип. 2(33). С.3-8.

6. Meile He, Min CHEN, Nan Wang and Chuanfu Li. Sedimentation Behavior of Liquid Iron Droplets during Smelting Reduction of Converter Slag by Considering the Coalescence of Droplets. *ISIJ International*, Vol. 59 (2019), No. 6, pp. 973-980.
7. Формирование металлической фазы при барботаже газом-восстановителем многокомпонентного оксидного расплава. Сообщение 1. / А.С.Вухсихис, Л.И.Леонтьев, В.П.Ченцов и др. *Изв. Вузов. Черная металлургия*. 2016. Том. 59. №9. С.639-643.
8. Сидоренко М.Ф. Теория и практика продувки металла порошками. 2-е изд. М.: Металлургия, 1978. 232с.
9. Momoko A., Manabu I. Filament and Droplets Formed Behind a Solid Sphere Rising Across a Liquid-Liquid Interface. *Materials Transactions*. 2004. Vol. 45. No. 3. P.870-876.
10. Сігарьов Є.М., Недбайло М.М., Кривцун І.В. Напрямки удосконалення ковшової десульфурзації чавуну. *Зб. наукових праць Дніпровського технічного університету (технічні науки)*, 2016. Вип. 2(29). С.3-9.
11. Рыбаков Л.С. Фазовый состав в ванне основной мартеповской печи. *Тепло- и массообменные процессы: труды I Всесоюзной научно-технической конференции*. М.: Металлургия, 1975. С.274-276.
12. Минаев Ю.А. Поверхностные явления в металлургических процессах. М.: Металлургия, 1984. 152с.
13. Мьяновская Я.В., Пройдак Ю.С. Оценка степени завершенности тепло- и массообменных процессов при движении фаз в процессах формирования марганцевых сплавов. *Теория и практика металлургии*, 2017. № 1-2. С.5-9.

Надійшла до редколегії 30.03.2020.

УДК 669.184

DOI 10.31319/2519-2884.36.2020.4

СІГАРЬОВ Є.М., д.т.н., професор
ЛОБАНОВ Ю.С., пошукач
ПОЛІСТАЄВ В.П., к.т.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ВПЛИВ ЯКОСТІ МЕТАЛОБРУХТУ ПРИ ЙОГО ПОПЕРЕДНЬОМУ ПІДІГРІВІ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

Вступ. Сучасний стан забезпечення якісними шихтовими матеріалами конвертерного процесу виплавки сталі свідчить про необхідність еволюційної зміни металургійних технологій. У конвертерному способі виробництва сталі за рахунок використання різних, у тому числі альтернативних джерел енергії існує можливість широко варіювати складом металошихти, зі зміненням в ньому співвідношення чавуну, металобрухту, обкотишів, інших залізовмісних матеріалів.

Якщо врахувати, що до 95% витрат енергії у конвертерній плавці складають приховані енерговитрати [1], основною статтею у яких залишається енергоємність (23,8-28,6 ГДж/т) переробного чавуну (85-91% від загальних витрат), то до основних напрямків підвищення енергоефективності конвертерного процесу можна віднести зменшення питомої витрати переробного чавуну у металошихті.

Як відомо [1, 2], на переробку металобрухту витрачається 10-30% первинної енергії, що витрачається на технологічному маршруті „залізна руда – доменна піч – кис-