

УДК 681.51.007.57:669.184

Богушевський В.С., д.т.н., Єгоров К.В., Скачок О.Е., Сухенко В.Ю.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

КОНТРОЛЬ В'ЯЗКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАВУНА В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ КОНВЕРТЕРНОЮ ПЛАВКОЮ

В'язкість – одна з важливіших фізико-хімічних характеристик розплавів, що відображає їх внутрішню структуру й властивості (перенос теплоти й маси компонентів). Вона відображає опір в переміщені часток в середині рідини з подоланням енергетичного бар'єру, що дорівнює величині енергії активації в'язкого руху.

Основні процеси в кисневому конвертері проходять на границі розділу фаз. В'язкість розплаву, що обумовлює гідродинамічний режим на міжфазній границі, може бути використана для визначення ступеня засвоєння кисню при продувці. Дійсно, відповідно сучасному представленню про механізм обтікання пухирця турбулентний опір, який діє на нього, вельми малий, а основним є в'язкий опір, який має дисипативний характер, тобто під'ємна сила пухирців СО при їх спливанні витрачається на подолання в'язких сил металу [1].

Великий вплив на гідродинамічний режим на міжфазній границі має вміст в ній поверхнево активних речовин (ПАР), а також оксидні компоненти – рідкий залістий шлак, що є донором кисню [2].

В сучасних системах керування конвертерною плавкою [3 – 4] в'язкість чавуна не контролюється. Якщо це виправдано для закордонних конвертерних цехів, враховуючи велику увагу в них до підготовки шихтових матеріалів, то у вітчизняних – це призводить до втрат продуктивності конвертерів, зниження ефективності їх роботи з-за неправильної організації керування шлаковим режимом, втрати часу на невиправдані скочування шлаку.

Наведені в статті дослідження проводились в Національному технічному університеті України «КПІ» по темі «Математичні моделі й алгоритми системи управління кисневим конвертером» державний реєстраційний номер 0110U002880.

В'язкість, опір, границя, турбулентність, конвертер, плавка, шлаковий режим, температура, чавун, вуглець, газова фаза, оперативний метод, масова частка.

Для рідких металів і сплавів, у яких відсутні структурні коливання зі зміною температури, Я.І. Френкель отримав температурну функцію динамічної в'язкості у вигляді експоненціального рівняння [5].

$$\mu = A \exp \left[\frac{E}{R_m T} \right], \quad (1)$$

де μ – динамічна в'язкість, Па · с; A – параметр, що залежить від початкових умов, Па · с; E – енергія активації в'язкого руху кДж/кмоль; R_m – універсальна газова стала, що дорівнює 8,314 кДж/(кмоль · К); T – температура розплаву, К.

Використовуючи технологію зливу чавуна із міксерів (шляхом стрибкоподібного його повороту через деякі проміжки часу), можна контролювати в'язкість розплаву по приращенню питомого значення інтеграла кута нахилу агрегату

$$\mu = \left[K \int_0^{\tau_*} \Delta \alpha(\tau) d\tau / m_{\text{ч}} \right], \quad (2)$$

де K – коефіцієнт пропорційності, Па · т/...⁰; τ , τ_* – поточний час і тривалість зливу чавуна, с; $\Delta \alpha(\tau)$ – приращення кута нахилу міксерів під час зливу чавуна, ...⁰; $m_{\text{ч}}$ – маса злитого чавуна за проміжок часу τ_* , т.

З урахуванням (1) формулу (2) можна представити у вигляді

$$T = \frac{E}{[R_m (\ln K + \ln i - \ln A)]}, \quad (3)$$

де i – питома (на одиницю маси злитого чавуна) значення інтегралу приращення кута нахилу міксерів під час зливу чавуна, ...⁰ · с/т.

Після підстановки конкретних даних ідентифікації ($A = 0,35 \cdot 10^{-4}$ Па·с, $E = 70390$ кДж/кг·атом, $K = 0,002$ Па·т/...⁰ і масовій частці вуглецю 4,3 %) отримуємо

$$t_{\text{ч}} = \frac{8250}{4,05 + \ln i} - 273, \quad (4)$$

Експериментальні дані, що оброблені методом нелінійної регресії підтвердили залежність (4), з наступними показниками: коефіцієнт кореляційного відношення залежності $\eta = 0,873$, залишкове середньоквадратичне відхилення $\sigma = 9,1$ °С і достовірність залежності $P > 0,95$ (рис. 1). Залежність (4) пояснюється тим, що при зниженні температури чавуна збільшується його в'язкість і потрібен більший кут нахилу, щоб за один й той же час злити визначену масу.

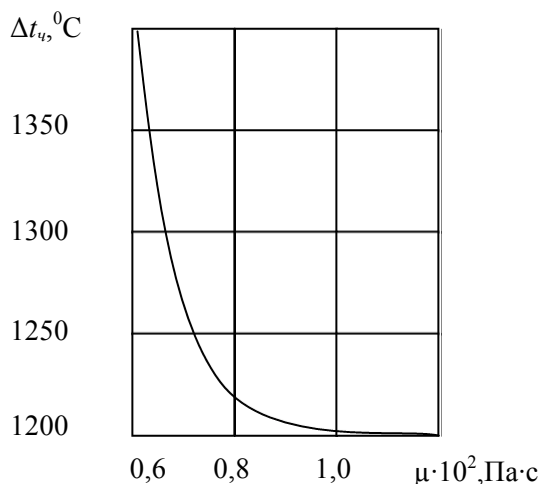


Рис. 1. Залежність температури чавуна $t_{\text{ч}}$ від його динамічної в'язкості μ і питомого значення інтеграла приращення кута нахилу міксеру при зливі розплаву у ківш

Одночасно проведена експериментальна перевірка оперативного методу визначення масової частки вуглецю, що заснований на залежності в'язкості рідкого чавуна от його температури й частки вуглецю в ньому. Результуюче рівняння має вигляд

$$C_{\text{ч}} = 12,08 - 0,562 \cdot 10^{-2} t_{\text{ч}} - 0,0546 i \quad (5)$$

із наступними показниками: коефіцієнт сукупної кореляції $R = 0,735$, $\sigma = 0,093$ %, $P > 0,990$.

Для виміру в'язкості в промислових умовах метод за формулою (1) був спрощений – контроль відбувався при імпульсному діянні на агрегат

$$\mu = 4 \ln(m_1/m_2)/3\tau, \quad (6)$$

де m_1, m_2 – маса чавуна, що злитий із міксеру відповідно за перший і другий проміжок часу, що дорівнюють один одному, τ ; τ – проміжок часу, с.

Так як контроль параметрів чавуна з використанням інформації про його в'язкість проводиться по ходу злива розплаву, значення температури чавуна і частки в ньому вуглецю є середніми за час злива, що підвищує достовірність їх значень.

Питоме значення дифузійного потоку речовини

$$v = - DC_0/\delta \quad (7)$$

де D – коефіцієнт дифузії; δ – товщина дифузійного шару; C_0 – концентрація компонента на границі шару.

Товщина дифузійного шару визначається як

$$\delta = D^{1/3} g^{1/6} \sqrt{x/u} \quad (8)$$

де ϑ – кінематична в'язкість, що визначає швидкість передачі імпульсу (кількості руху) в потоці рідини, x – відстань від точки набігання потоку на поверхню розділу фаз; u – швидкість руху рідини.

Для розплаву чавуна й сталі, у яких дифузійне число Прандтля $Pr = \vartheta/D \gg 1$, при зміні кінематичної в'язкості коефіцієнт дифузії змінюється за законом

$$D = \beta/\vartheta \quad (9)$$

де $\beta = \text{const}$ – сталий множник.

Приймаючи до уваги ці міркування, стосовно конвертерного процесу можна сказати, що товщина дифузійного шару розплаву на міжфазній поверхні зворотно пропорційна його кінематичній в'язкості, точніше значенню $\vartheta^{5/6}$.

Нами встановлено, що при збільшенні частки сірки в чавуні, що є сильнодіючим ПАР, зменшується ступінь використання кисню на окиснення вуглецю ванни із-за гальмування в ній масообмінних процесів й, як наслідок, швидкість окиснення вуглецю [6]. У киснево - конвертерному процесі всі взаємодії відбуваються в багатокомпонентній системі метал - шлак - газ. Кожен процес характеризується такими факторами, як перемішування металу, ступінь досконалості контакту між фазами, інтенсивність теплопередачі між шарами металу і шлаку та ін. Тому контроль і облік при управлінні продувкою, інформація про відносну в'язкість чавуну як комплексного параметра, що характеризує температуру, хімічний склад і реологічні особливості розплаву, може бути використаний для збільшення точності визначення масової частки вуглецю і температури перед повалкою.

Як показали наші дослідження, відносна в'язкість чавуна має помітний вплив на характер вигорання вуглецю й температуру ванни конвертера. Можна передбачити, що при зменшенні в'язкості дещо збільшується перемішування ванни за рахунок більш інтенсивного дроблення пухирців кисню, що збільшує площу контакту металеві й газові фаз.

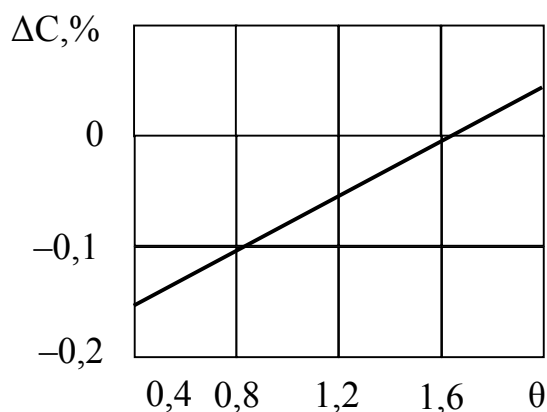


Рис. 2. Вплив відносної в'язкості чавуну μ на відхилення кінцевої масової частки вуглецю в металі від значення, очікуваного за [2, 3]

Внаслідок цього зростає об'єм кисню, що йде безпосередньо на окиснення вуглецю. При цьому утворюється додатковий потік CO , що збільшує інтенсивність перемішування ванни. Цей висновок підтверджується отриманою нами залежністю між відносною в'язкістю чавуну і кінцевим вмістом вуглецю ванні при продувці визначеної питомої кількості кисню. Залежність між питомою кількістю продути у ванну кисню і кінцевою часткою вуглецю досить повно досліджена [2, 3]. На дослідних плавках нами визначено вплив відносної в'язкості чавуну θ на характер цієї залежності (рис. 2). Відносна в'язкість визначалася як відношення розрахункової маси чавуну, обчисленої по куту нахилу міксеру протягом зливу, до фактичної. Залежність отримана регресійним аналізом при коефіцієнт парної кореляції $r = 0,93$, $\sigma = 0,023\%$ і $P > 0,99$.

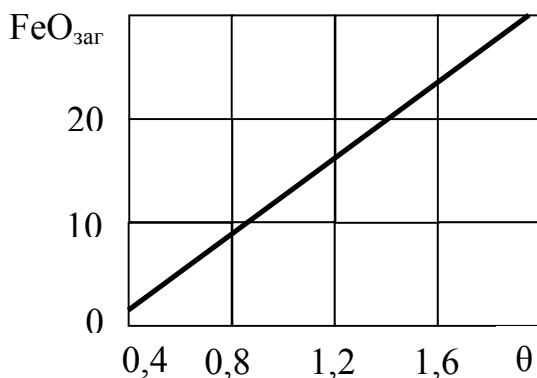


Рис. 4. Залежність сумарної масової частки оксидів заліза в кінцевому шлаку від відносної в'язкості чавуна

Аналогічні дослідження виконані по температурі металу перед повалкою (рис. 3). Для цієї залежності $r = 0,85$, $\sigma = 13,2$ °C і $P > 0,99$.

Отримана також залежність між відносною в'язкістю чавуна й масовою часткою оксидів заліза в кінцевому шлаку (рис. 4). Статистичні характеристики залежності такі: $r = 0,72$, $\sigma = 1,4$ %, $P > 0,95$.

Збільшення об'єму кисню, що йде на окиснення вуглецю при зменшенні в'язкості, приводить до зменшення об'єму кисню, що йде на окиснення заліза, тобто в кінці продувки знижується сумарна масова частка оксидів заліза в шлаку, що перерахована на еквівалентну частку монооксиду заліза.

Висновки

Контроль в'язкісних характеристик чавуна й введення цієї інформації в статичні системи керування конвертерною плавкою суттєво підвищує точність розрахунків як режиму зневуглицювання, так і температурного й шлакового режимів.

Для виміру в'язкісних характеристик чавуна можна використовувати поведінку струменя чавуну під час зливання його з міксеру.

Подальші дослідження будуть направлені на введення інформації про в'язкісні характеристики чавуну в систему автоматичного керування продувкою кисневого конвертера.

1. Маленков И.Г. О движении больших пузырей газа, всплывающих в жидкости // Прикладная механика и техническая физика. – 1968. – № 6. – С. 130 – 136.

2. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д.Ф.Чернега, В.С.Богушевський, Ю.Я.Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф.Чернеги, Ю.Я.Готвянського. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.

3. Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С.: Підручник / Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія). – Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.

4. Богушевський В.С., Сухенко В.Ю., Шматко О.В. Математична модель і система керування режимом дуття конвертерної плавки // Вісник НТУУ „КПІ”, серія Машинобудування. – 2011. – № 61, т. 2. – С. 38 – 43.

5. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945. – 424 с.

6. Исследование вязкости чугуна как информации в АСУ конвертерной плавкой / В.А.Ясинский, С.К.Соболев, В.С.Богушевский, Н.А.Сорокин // Современные методы и средства автоматизации сталеплавильного производства. – К.: Ин-т автоматизации, 1979. – С. 28 – 35.

7. Богушевський В.С., Сергеева Е.А., Жук С.В. Динамическая модель управления температурным режимом конвертерной ванны // Металл и литье Украины. – 2011. – № 5. – С. 24 – 28.