

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ МОДИФІКАЦІЇ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В ПРОЦЕСІ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ СТАЛІ КАЛЬЦІЄМ

У цьому дослідженні показано, що сталі, які були розкислені алюмінієм та містять у своєму складі розчинену сірку, під час обробки кальцієм утворюють твердий сульфід кальцію, при цьому CaO буде присутній у вигляді алюмінатів кальцію, з відповідною зміною складу в залежності від температури. З'ясовано, що для кожної стадії реакцій перетворення алюмінатів кальцію рівноважні концентрації продуктів реакції будуть мати сталі значення за умови сталості коефіцієнтів активності сірки та алюмінію відповідно. В дослідженні наведено зміну рівноважних продуктів реакції в результаті перебігу хімічного процесу та встановлено, що на останніх стадіях процесу підвищується активність CaO та знижується активність Al_2O_3 . В процесі досліджень було встановлено кінетичну модель перебігу гетерогенного процесу модифікування розплаву сталі кальцієм. У наших дослідженнях встановлено, що механізм розчинення кальцію у рідкій сталі проходить крізь утворення проміжної сполуки. Визначено оптимальну концентрацію кальцію у межах 1 ppm, що буде інгібітором процесу утворення $\text{CaS-Al}_2\text{O}_3$. Показано, що лімітуючою стадією процесу буде транспортування Al та S від включень у об'єм рідкої сталі. В роботі показано, що для підтвердження аналітичного аналізу та перевірки стадії, що лімітує процес, а саме реакція $\text{CaS-Al}_2\text{O}_3$, за рахунок розчиненого Ca у якості проміжної сполуки, полягає у розрахунку швидкості перетворення включень. Наведено, що концентрації розчинених алюмінію та сірки, що перебувають у рівновазі з включеннями, дуже малі, а загальний час, що необхідний для модифікації включень, у багато разів перевищував рівноважні концентрації. Для врахування цих умов нами було створено кінетичну модель для оцінки часу, що дозволила визначити стадію, що лімітує швидкість загального процесу модифікування включень. Для визначення і розрахунків рівноважних умов співіснування двох фаз у наших дослідженнях було використано термодинамічний пакет програм FactSage 8.3. З використанням термодинамічних розрахунків встановлено час, необхідний для перетворення включень глинозема у основні рідкі оксидні включення. В дослідженнях показано, що реакція модифікації включень напряму залежить від ступеня витрати твердого CaS . Для кожної стадії реакції перетворення включень швидкість має сталі значення, що підтверджується сталою швидкістю видалення CaS . В результаті проведених досліджень та термодинамічних розрахунків встановлено, що гетерогенний процес модифікації включень перебігає у дифузійній області і контролюється масопереносом. Час модифікації лінійно зростає зі зростанням вмісту кисню та зменшується зі зростанням вмісту кальцію у розплаві сталі. Доведено, що на заключній стадії модифікації включень необхідно в шість разів більше часу, ніж на ранніх стадіях процесу модифікування.

Ключові слова: модифікація, неметалеві включення, термодинамічні розрахунки, гетерогенний процес, рівноважний стан, дифузія.

¹ канд. тех. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0003-2372-8398, yefimovavq@gmail.com

² канд. хім. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-9434-7747, ganna.yusina@mipolytech.education

³ канд. екон. наук, доцент, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ, ORCID: 0009-0009-0479-5828, stalevoz@i.ua

⁴ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: 0000-0003-1454-2882, pilipenkotm@gmail.com

V.G. Yefimova, A.L. Yusina, Yu.O. Smirnov, T.M. Pylypenko. Analytical acknowledgment of the kinetics of modifications of non-metal inclusions in the process of treatment of steel with calcium. This study shows that steels that have been deoxidized with aluminum and place in their warehouse the dissolved sulfur, during the treatment with calcium, create solid calcium sulfide, in which CaO will be present in It looks like calcium aluminates, with a consistent change in storage depending on temperature. It is clear that for the skin stage of the reaction of the transformation of calcium aluminates, equal concentrations of the reaction products will become important for the stability of the coefficients of activity of the sulfur and aluminum It's obvious. In the subsequent study, a change in the equally important reaction products was carried out as a result of the interruption of the chemical process, and it was established that at the remaining stages of the process the activity of CaO increases and the activity of Al₂O₃ decreases. During the investigation, a kinetic model of the heterogeneous process of modifying the steel melt with calcium was established. Our research has established that the mechanism of calcium breakdown in rare cases begins to occur through the strengthening of the perineum. The optimal calcium concentration was determined to be 1 ppm, which would act as an inhibitor of the process of CaS-Al₂O₃ formation. It is shown that the limiting stage of the process will be the transport of Al and S to include rare steel. The work shows that to confirm the analytical analysis and verify the stage that the process is limited, and the CaS-Al₂O₃ reaction itself, for the breakdown of the dissolved Ca at the perineum, lies in the fluidity breakdown Turn it on. It has been found that the concentrations of aluminum degraders and sulphurs that occur in equal amounts of the inclusions are even small, and the initial hour that is necessary for the modification to be included, many times exceeds equal concentrations ii. To enlighten these minds, we created a kinetic model for estimating time, which allowed us to identify the stage that limits the fluidity of the initial modification process. For the identification and development of equal minds of the development of two phases, our research used the thermodynamic software package FactSage 8.3. It has been established that the hour required for the transformation of alumina at the main rare oxide inclusions lies within the limits of the established minds and becomes 2000τ. The research shows that the modification reaction is directly dependent on the degree of loss of solid CaS. For the cutaneous stage of the reaction of the transformation, the liquidity reaches a value that is confirmed by the increased liquidity of the CaS sample. As a result of the investigation of thermodynamic changes, it was established that the heterogeneous modification process occurs in the diffusion region and is controlled by mass transfer. The modification time increases linearly with the growth of acid and changes with the growth of calcium in the melting steel. It has been established that at the final stage of modification it is necessary to turn on six times more than an hour less in the early stages of the modification process.

Keywords: *modification, non-metallic inclusions, thermodynamic calculations, heterogeneous process, equilibrium state, diffusion.*

Постановка проблеми. Відомо, що обробка кальцієм часто застосовується при виробництві сталей, що розкислені алюмінієм. Кальцій вводиться у рідку сталь для перетворення включень глинозема у рідкі чи частково рідкі алюмінати кальцію. Застосування цього методу дозволяє уникнути заростання сталерозливного стакану під час безперервного розливання. Цей метод є дуже ефективним та поширеним в процесі модифікації включень, а саме їх переведення у рідкий стан. При цьому на сьогоднішній день недостатньо вивчена кінетика процесу модифікування, а саме невідомо, яка стадія визначає швидкість загального процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що тверді включення великих розмірів Al₂O₃ впливають на вихід та експлуатаційні характеристики сталі. Отже для модифікації цих включень використовують кальцій, який покращує експлуатаційні характеристики готової продукції [1]. При цьому твердий глинозем перетворюється у алюмінати кальцію, які у розплаві сталі перебувають у рідкому стані [1, 2].

Вивченню кінетики модифікування включень у розплаві сталі присвячено багато досліджень [1-4].

Так у роботах [3-6] було досліджено кінетику модифікації з метою встановлення точної кількості додавання кальцію та механізму модифікації. Авторами цих робіт було встановлено кінетичну модель для оксидів та сульфідів в процесі обробки кальцієм. Ця модель була основана на тому, що швидкість внутрішньої дифузії включень дуже висока, а відповідно, це свідчить про перебіг процесу в кінетичній області.

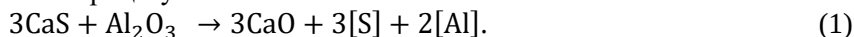
В роботах [7, 8] було встановлено, що процес утворення рідких включень в процесі модифікації Al_2O_3 є реакцією першого порядку.

Дослідження [9, 10] свідчать, що модифікація включень, які були оброблені кальцієм, покращується за рахунок скорочення часу реакції після обробки. В цих дослідженнях встановлено, що стадія, яка визначає швидкість загального процесу, є хімічною реакцією між глиноземом та рідким алюмінатом кальцію.

В роботі [11] показано, що кінетична модель модифікації включень, враховує відновлення кальцію у шлаковій фазі, швидкість розчинення кальцію у сталі, масоперенос у прикордонному шарі та дифузії розчиненої речовини у шарі продукту.

Отже, як впливає з огляду літературних джерел, кінетична модель модифікації неметалевих включень носить суперечливий характер і потребує додаткових досліджень, а саме, встановлення області перебігу процесу модифікування та його часу.

Дослідження останніх років підтвердили, що для сталей, що розкислені алюмінієм, які містять більш 10 ppm за масою розчиненої сірки, основним продуктом, що утворюється першим під час обробки кальцієм, є твердий сульфід кальцію. За даними роботи [3] зазвичай CaS зароджується на включеннях глинозема. При цьому утворюються включення алюмінатів кальцію у відповідності рівнянню хімічного процесу:



Виходячи з рівняння хімічної реакції, твердий CaS реагує з твердим Al_2O_3 з утворенням CaO . При цьому CaO присутній у вигляді різних алюмінатів кальцію. За температури $1550^\circ C$ послідовність продуктів реакції алюмінату кальцію в ході реакції (1) буде $CaO \cdot 6Al_2O_3$ (CA_6), потім $CaO \cdot 2Al_2O_3$ (CA_2), $CaO \cdot Al_2O_3$ (CA) і, нарешті, рідкий $CaO-Al_2O_3$.

З рівняння хімічного процесу (1) випливає, що для кожної стадії реакції рівноважні продукти $[\%S]^3[\%Al]^2$ будуть мати сталі значення (за умови, що коефіцієнтів активності розчинених S та Al мають сталі значення).

В ході перебігу хімічного процесу та врівноваження різних оксидних фаз (з різною активністю CaO та Al_2O_3) рівноважний продукт $[\%S]^3[\%Al]^2$ змінюється (на останніх стадіях процесу його стає менше, включаючи підвищену активність CaO та знижену активність Al_2O_3).

У роботі [2] показано, що відбір зразків рідкої сталі (як лабораторних розплавів, так і промислових плавок) показав, що CaS , який не прореагував, зазвичай зберігається у рідкій сталі декілька хвилин, що може призвести до заростання сталерозливного стакану.

Отже, визначення кінетичної моделі перебігу гетерогенної хімічної реакції (1) є актуальною задачею.

Мета статті – з використанням термодинамічних розрахунків процесу модифікування неметалевих включень кальцієм, встановити стадію, що лімітує швидкість перебігу гетерогенного процесу, а також середній час модифікування включень.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що реакція (1) відбувається між двома твердими фазами. У наших дослідженнях ми припустили, що механізм розчинення кальцію у рідкій сталі буде відбуватися з утворенням проміжної сполуки. Концентрація кальцію, що розчинився, буде становити до 1 ppm, що буде обмежувати швидкість реакції $CaS-Al_2O_3$.

Іншим потенційно визначальним фактором швидкості процесу буде транспортування Al та S (що утворюються в реакції (1)) від включень у об'єм рідкої сталі.

Одним із способів аналітичного аналізу та перевірки стадії, що лімітує процес, а саме реакція $CaS-Al_2O_3$, за рахунок розчиненого Ca у якості проміжної сполуки, полягає у розрахунку швидкості перетворення включень, якщо транспортування Al та S буде визначати швидкість реакції.

У відповідності до кінетики перебігу гетерогенних процесів передбачається, що біля поверхні твердої фази утворюється нерухомий мономолекулярний шар, в якому відбувається

хімічна реакція і встановлюються умови динамічної рівноваги. Продукти цієї реакції за рахунок дифузії переміщуються у глибину розплаву сталі, де також з часом встановлюється рівновага.

Передбачалося, що включення перед реакцією були сумішшю CaS і Al_2O_3 , змінюючи свій склад під час реакції. Включення мали розмір 0,5-4 мкм. Для включень такого розміру масообмін між об'ємом сталі і включенням відбувається за рахунок дифузії в фактично стаціонарних умовах, для яких число Шервуда дорівнює 2 (мається на увазі, що включення мають сферичну форму). Отже, коефіцієнт масопередачі у $\text{г/м}^2\cdot\text{с}$, між розплавом сталі та включенням буде визначатися як:

$$m = \frac{D}{r}, \quad (2)$$

де D – коефіцієнт дифузії частинок Al та S у рідкій сталі, $\text{м}^2/\text{с}$; r – радіус включень, м .

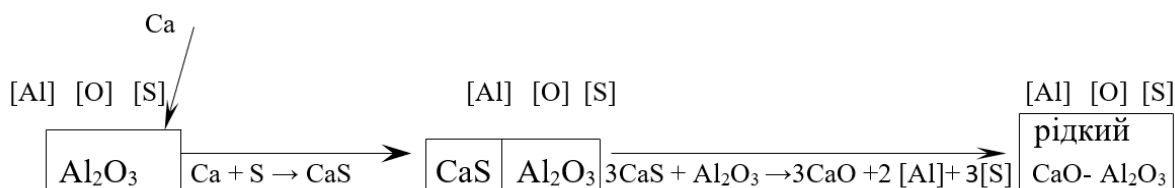


Рис. 1 – Схема етапів реакції при обробці кальцієм сталі, що містить сірку та розкислена алюмінієм. У якості проміжної сполуки утворюється твердий сульфід кальцію, а потім відбувається реакція з утворенням модифікованих включень CaS з Al_2O_3

У наших дослідженнях ми вважали, що реакція (1) обмежена масопереносом у сталі. Кількісно масоперенос визначався шляхом транспортування кінцевого об'єму сталі до кожного включення в одиницю часу. Цей об'єм сталі досягав рівноваги з включенням, потім змішувався з основною масою сталі і процес повторювався. Оскільки вважалось, що реакція (1) досягає стану рівноваги між включенням і об'ємом сталі, що реагує, вважалось, що реакція «тверде – тверде» (опосередкована розчиненням кальцієм) не є лімітуючою стадією процесу.

Для кожної зміни часу Δt , маса сталі ΔM у кг , яка вступає в реакцію з одиничним включенням, буде визначатися як:

$$\Delta M = 4\pi\rho_{\text{сталі}}rD\Delta t, \quad (3)$$

де $\rho_{\text{сталі}}$ – густина рідкої сталі кг/м^3 ; r – радіус включення, м .

Якщо загальна маса включень у даному об'ємі сталі визначається як $M_{\text{включень}}$, то загальна кількість включень $n_{\text{включень}}$ буде визначатись, як:

$$n_{\text{включень}} = \frac{M_{\text{включень}}}{4/3\pi r^3 \rho_{\text{включень}}}, \quad (4)$$

де $\rho_{\text{включень}}$ – густина включень, кг/м^3 .

Тоді маса сталі, що реагує відносно маси включень, буде визначатися за формулою:

$$\frac{\Delta M_{\text{сталі}}}{n_{\text{включень}}} = \frac{3\left(\frac{\rho_{\text{сталі}}}{\rho_{\text{включень}}}\right)D\Delta t}{r^2}. \quad (5)$$

У нашому дослідженні вважається, що всі включення мають наближено однаковий розмір та склад і реагують паралельно. З рівняння (5) випливає, що час за який в масі сталі утворилися включення, буде визначатись як:

$$\tau = \frac{r^2 \rho_{\text{включень}}}{3D\rho_{\text{сталі}}}. \quad (6)$$

Чисельне значення цього часу невелике. Для типового значення радіусу включень 1 мкм, $D = 9 \times 10^{-9} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\rho_{\text{включень}} = 2500 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{сталі}} = 7000 \text{ кг/м}^3$, $\tau = 13 \text{ мс}$.

Оскільки концентрації розчинених Al і S , що перебувають у рівновазі з включенням, дуже малі, загальний час, що необхідний для завершення модифікації включень, буде в багато разів перевищувати характеристику часу. Тому нами було використано кінетичну модель для оцінки часу, що визначає лімітуючу стадію гетерогенного процесу модифікування включень.

Далі в наших дослідженнях було використано термодинамічний пакет програм FactSage 8.3, що має можливість використання макросу для виконання розрахунків рівноваги,

що повторюються. Використання цього макросу дозволяє моделювати реакцію масопереносу, що контролюється дифузією, оскільки керування масопереносом має на увазі локальну рівновагу в об'ємі реакції. Це означає, що можна моделювати доволі складні процеси.

Базову структуру макросу, що було використано у наших дослідженнях, наведено на рис. 2. Макророзрахунки включають в себе врівноваження невеликої маси сталі, рівняння (3), що повторюється з кожним включенням, кожний раз з послідовним змішуванням сталі, що прореагувала з основним об'ємом сталі, що не прореагувала.

Реакція А

Рівновага розплаву сталюї ванни
без включень



Рис. 2 – Діаграма потоку, яка ілюструє принцип кінетичної моделі для локальної рівноваги з включеннями та обмеженого масопереносу між розплавом сталі зі включеннями та основним розплавом сталі. Реакції А та В відбуваються один раз для початкових умов, а реакції 1 та 2 відбуваються багатократно на кожному інтервалі часу

У термодинамічному пакеті програм FactSage для рідкої сталі було використано базу даних «FTmisc», а для рідкого шлаку – «FToxid» [2]. При цьому також розглядалися тверді речовини CaS, Al₂O₃, Ca₆, Ca₂, Ca і C₃A₂ у якості можливих продуктів реакції. Умови проведених розрахунків наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Припущені умови для модельних розрахунків.

Умови	Значення
Температура	1550 °C
Тиск	1 атм
Густина включень, кг/м ³	2500
Густина рідкої сталі, кг/м ³	7000
Початковий склад включень	CaS та Al ₂ O ₃ , у співвідношенні 0,7:1
Початкова концентрація включень в сталі	20 ppm

Результати розрахунків, з використанням умов, що наведені у Таблиці 1, наведені на рис. 3. Час було визначено у відповідності з рівнянням (6).

Послідовність переходу фаз оксидних включень довів саме ту послідовність, яку ми очікували, а саме: Al₂O₃ → Ca₆ → Ca₂ → Ca → рідина. Включення глинозема модифікуються у відповідності з реакцією CaS.

Час, необхідний для перетворення включень глинозема у основні рідкі оксидні включення, залежить від припущених умов, але зазвичай складає 2000т. У загальному випадку цей час становить наближено 26 мс для включень з типовим радіусом 1 мкм. При цьому мається на увазі, що реакція з Al₂O₃ не обмежується масопереносом Al та S у рідкій сталі (оскільки реакція триває декілька хвилин). Цей висновок знаходить своє підтвердження з запропонованою роллю масопереносу розчиненого кальцію між CaS та оксидними включеннями.

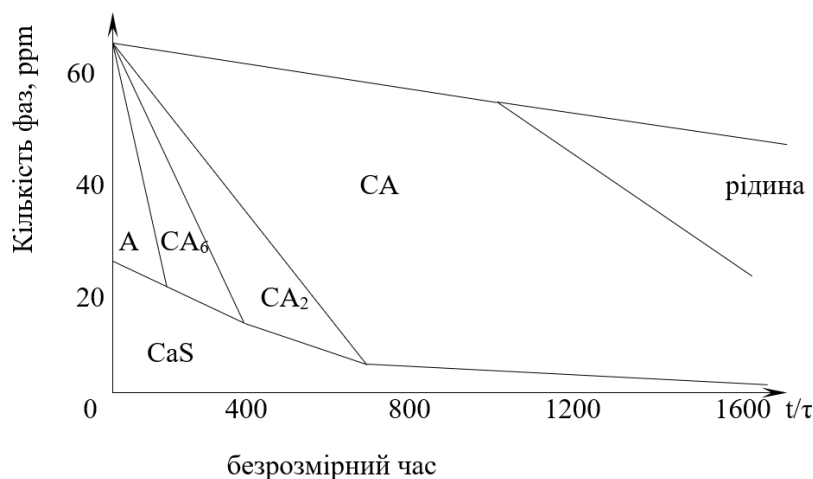


Рис. 3 – Розрахункова зміна кількості фаз включень для реакції, що контролюється масопереносом в об'ємі сталі з включеннями, що початково склалися з Al_2O_3 та CaS

Результати розрахунків наведено на рис. 3. У відповідності реакції (1) реакція модифікації включень напряму залежить від ступеня витрати твердого CaS . Для кожної стадії реакції перетворення включень швидкість має сталі значення, що підтверджується сталою швидкістю видалення CaS . З рисунка 3 випливає, що маса CaS лінійно зменшується на кожному етапі реакції (кожний окремий крок визначається фазами, що присутні у рівновазі Al_2O_3 - CA_6 - CaS – перший крок, за яким слідує CA_6 - CA_2 - CaS і т.п.).

Отже, проведені розрахунки свідчать, що швидкість реакції є сталою для кожного окремого кроку, оскільки модифікація контролюється швидкістю переносу розчиненого Al та S і фазами включень. Концентрації Al та S у локальній рівновазі з частково зміненими включеннями залишається сталою, в той час як оксидні фази врівноважуються з CaS та розчиненими Al та S .

Тобто одна пара рівноважних концентрацій Al та S у сталі у контакті з Al_2O_3 , CA_6 та CaS за температури 1550°C становить $0,16\%$ Al та $0,28\%$ S , що значно перевищує їх об'ємну концентрацію. Оскільки концентрації Al та S у реакційному об'ємі навколо включень набагато вищі, ніж об'ємні концентрації, що змінюються повільно, існує стала різниця концентрацій Al та S між реакційним об'ємом та об'ємним розплавом сталі. Отже, з цих даних можна зробити висновок, що процес відбувається в дифузійній області і контролюється масопереносом, оскільки швидкість хімічної реакції значно більша.

Висновки

З використанням програмного забезпечення FactSage 8.3 було вивчено кінетику модифікування та морфологію зміни включень в процесі модифікування рідкої сталі кальцієм. В результаті проведених досліджень було встановлено, що гетерогенний процес модифікації включень перебігає у дифузійній області і контролюється масопереносом, а час модифікації включень у середньому становить 26 мс.

Перелік використаних джерел:

1. Xi Z., Li C., Wang L. A kinetic model for the modification of Al_2O_3 inclusions during calcium treatment in high-carbon hard wire steel. *Materials*. 2021. Vol. 14(5), Pp. 2-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14051305>.
2. Li X. D., Deng S., Yang Y. B. Production practice of plasticity control of inclusions in $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system of SWRH82B hard wire steel. *Metall. China*. 2018. Vol. 28. Pp. 61-66.
3. Behaviour of Sulphide and Non-alumina-Based Oxide Inclusions in Ca-Treated High-Carbon Steel / Y. Tanaka et al. *Metallurgical and Materials Transaction A*. 2020. Vol. 51. Pp. 1384-1394. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01872-2>.

4. Handoko W., Anurag A., Pahlevani F. Effect of selective-precipitations process on the corrosion resistance and hardness of dual-phase high-carbon steel. *Scientific reports*. 2019. Vol. 9. Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52228-z>.
5. Wang G. D., Lv Y. W. Research on inclusion control and rolling process optimization of 82B hard wire steel. *Metall. China*. 2012. Vol. 22. Pp. 15-17.
6. Finite element simulation of cold rolling of thin strip / Z. Jiang et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 140. Pp. 542-547. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00832-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00832-X).
7. Abraham S., Bodnar R., Raines J. Inclusion engineering and metallurgy of calcium treatment. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2018. Vol. 1. Pp. 1243-1257. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s42243-018-0017-3>.
8. Transient Inclusion Evolution During Modification of Alumina Inclusions by Calcium in Liquid Steel: Part I. Background, Experimental Techniques and Analysis Methods / N. Verma et al. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 2011. Vol. 42. Pp. 711-719. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-011-9517-2>.
9. Yang G. W., Wang X. H., Huang F. X. Influence of Calcium Addition on Inclusions in LCAK Steel with Ultralow Sulfur Content. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 2015. Vol. 46. Pp. 145-154. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-014-0181-1>.
10. Zhang L., Liu Y., Zhang Y. Transient Evolution of Nonmetallic Inclusions During Calcium Treatment of Molten Steel. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 2018. Vol. 49. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1289-5>.
11. Sa'nchez G., Hidalgo C., Donoso P. Kinetic studies of calcium-Induced calcium release in cardiac sarcoplasmic reticulum vesicles. *Biophysical Journal*. 2003. Vol. 84. Pp. 2319-2330. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(03\)75037-1](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(03)75037-1).

References:

1. Z. Xi, C. Li, and L. Wang, «A kinetic model for the modification of Al₂O₃ inclusions during calcium treatment in high-carbon hard wire steel», *Materials*, vol. 14(5), pp. 2-16, 2021. **doi: 10.3390/ma14051305**.
2. X.D. Li, S. Deng, and Y.B. Yang, «Production practice of plasticity control of inclusions in CaO–Al₂O₃–SiO₂ system of SWRH82B hard wire steel», *Metall.China*, vol. 28, pp. 61-66, 2018.
3. Y. Tanaka, F. Pahlevani, S.-Y. Kitamura, K. Privat, and V. Sahajwalla, «Behaviour of Sulphide and Non-alumina-Based Oxide Inclusions in Ca-Treated High-Carbon Steel», *Metallurgical and Materials Transaction A*, vol. 51, pp. 1384-1394, 2020. **doi: 10.1007/s11663-020-01872-2**.
4. W. Handoko, A. Anurag, and F. Pahlevani, «Effect of selective-precipitations process on the corrosion resistance and hardness of dual-phase high-carbon steel», *Scientific reports*, vol. 9, pp. 1-16, 2019. **doi: 10.1038/s41598-019-52228-z**.
5. G.D. Wang, and Y.W. Lv, «Research on inclusion control and rolling process optimization of 82B hard wire steel», *Metall. China*, vol. 22, pp. 15-17, 2012.
6. Z. Jiang, A. Tieu, X. Zhang, C. Lu, and W. Sun, «Finite element simulation of cold rolling of thin strip», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 140, pp. 542-547, 2003. **doi: 10.1016/S0924-0136(03)00832-X**.
7. S. Abraham, R. Bodnar, and J. Raines, «Inclusion engineering and metallurgy of calcium treatment», *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 1, pp. 1243-1257, 2018. **doi: 10.1007/s42243-018-0017-3**.
8. N. Verma, P.C. Pistorius, R.J. Fruehan, M. Potter, M. Lind, and S. Story, «Transient Inclusion Evolution During Modification of Alumina Inclusions by Calcium in Liquid Steel: Part I. Background, Experimental Techniques and Analysis Methods», *Metallurgical and Materials Transaction B*, vol. 42, pp. 711-719, 2011. **doi: 10.1007/s11663-011-9517-2**.
9. G.W. Yang, X.H. Wang, and F.X. Huang, «Influence of Calcium Addition on Inclusions in LCAK Steel with Ultralow Sulfur Content», *Metallurgical and Materials Transaction B*, vol. 46, pp. 145-154, 2015. **doi: 10.1007/s11663-014-0181-1**.
10. L. Zhang, Y. Liu, and Y. Zhang, «Transient Evolution of Nonmetallic Inclusions During Calcium Treatment of Molten Steel», *Metallurgical and Materials Transaction B*, vol. 49, pp. 1-19, 2018. **doi: 10.1007/s11663-018-1289-5**.

11. G. Sa'nchez, C. Hidalgo, and P. Donoso, «Kinetic studies of calcium-Induced calcium release in cardiac sarcoplasmic reticulum vesicles», *Biophysical Journal*, vol. 84, pp. 2319-2330, 2003. doi: 10.1016/S0006-3495(03)75037-1.

Стаття надійшла 11.11.2024

Стаття прийнята 20.11.2024

УДК 669.141.245

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321265

© Вовк А.О.¹, Похвалітій А.А.²

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ФОРМУВАННЯ ГАЗОРІДИННОГО ПОТОКУ ПРИ ВИПУСКУ ПЛАВКИ З КОНВЕРТЕРА

Дослідження умов формування газорідинного потоку при випуску плавки з конвертера базується на низькотемпературному моделюванні, спрямованому на аналіз впливу конструктивних характеристик сталевипускного каналу. Використання інертного газу (аргону) забезпечило створення захисної газової оболонки, що зменшує контакт металу з атмосферним киснем, знижуючи його вміст у потоці до 1-3%. На основі експериментів розроблено класифікацію режимів продувки та емпіричні залежності для опису взаємодії газу і рідини. Встановлено, що мінімальна концентрація кисню у газовій фазі (1-3%) досягається за витрати аргону 10-20% від максимальної. Це дозволяє підтримувати ефективність захисної оболонки на рівні 95%. Подальше збільшення витрати аргону призводить до розширення кута розкриття потоку, що негативно впливає на його організацію. Збільшення кількості продувних сопел підвищує стабільність потоку: при шести соплах концентрація кисню залишається нижчою за 10,5% навіть за високої витрати газу. Експерименти на плоскій моделі льотки виявили залежність між витратою газу, рівнем рідини та глибиною вирви. Підвищення витрати газу за умов високого рівня рідини сприяє стабільності міжфазної поверхні, тоді як зниження рівня рідини викликає збільшення глибини вирви та погіршення організації потоку. Експерименти виконувалися на лабораторному стенді, що відтворював процес випуску плавки з урахуванням геометричної та динамічної подібності. Використовувався технічно чистий аргон із вмістом кисню до 0,7%. Основними параметрами для аналізу стали витрата газу, рівень рідини, відносна глибина вирви та кут розкриття потоку. Для оцінки ефективності газової оболонки застосовувався аналіз концентрації кисню за допомогою газоаналізатора. Запропоновані оптимальні умови включають контроль витрати аргону, рівня рідини та кількості сопел. Встановлено, що витрата аргону 0,05-0,125 м³/хв забезпечує ефективний захист розплаву, а оптимальний кут розкриття потоку до 3° сприяє ефективності на рівні 92-99%. Отримані результати мають важливе практичне значення для вдосконалення процесу випуску плавки, покращення рафінування та зниження окислення сталі. Розроблені залежності дозволяють точніше визначати параметри продувки та оптимізувати конструкцію випускного каналу, підвищуючи ефективність металургійних процесів.

Ключові слова: конвертер, моделювання, випуск розплаву, газорідинний потік, аргон, захисна оболонка, глибина вирви.

¹ аспірантка, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: 0009-0007-7692-0232, alyonkamax.vovk@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: 0000-0002-9652-767X, artemmslp@gmail.com