

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ РАФІНУВАННЯ МЕТАЛІВ

Надригайло Т.Ж.¹, Моргун Є.М.²

¹Дніпровський державний технічний університет, к.т.н., доцент, Україна

²Дніпровський державний технічний університет, аспірант, Україна

Анотація. Рафінування металу є ключовим етапом у виробництві якісних металевих матеріалів, під час якого видаляються домішки відповідно до встановлених галузевих норм. Цей процес включає складні хімічні, фізичні та термодинамічні взаємодії, що відбуваються на різних стадіях, зокрема плавленні, окисленні та відновленні. Використання ефективних технологій переробки не лише сприяє покращенню якості кінцевого продукту, а й забезпечує зниження рівня відходів, зменшення негативного впливу на довкілля і оптимізацію енергоспоживання.

Через високу складність цих процесів традиційних емпіричних методів часто недостатньо для їх оптимізації. Тому як у наукових дослідженнях, так і в промисловій практиці зростає потреба в точних прогностичних моделях. Для імітації процесів рафінування було розроблено різні методи моделювання, кожен із яких має свої переваги та обмеження. Такі моделі допомагають глибше зрозуміти поведінку металів і домішок за різних умов, що дозволяє покращити контроль над параметрами рафінування та підвищити ефективність процесу.

Дана робота містить огляд основних методів та засобів, які використовуються для моделювання процесу рафінування металу.

Ключові слова: рафінування металу, домішки, очистка, математичне моделювання, оптимізація і ефективність виробництва.

Для підвищення якості сталі її піддають рафінуванню, тобто очищенню сталі від домішок, які погіршують її якість. Очищати сталь можна в сталеварних агрегатах і поза ними. Це два шляхи рафінування сталі. Кожний із них по-різному впливає на техніко-економічні показники сталеварних агрегатів.

У процесі рафінування сталі в агрегатах продовжується час перебування розплавів у них, що спричинює збільшення собівартості сталі та зменшення продуктивності агрегатів.

Впровадження позаагрегатного рафінування сталі потребує спеціального обладнання, яке може бути різної складності: ковші, печі, установки та ін. Рафінують сталь одразу після випуску з агрегату, тобто розплавлену, або після

кристалізації, тобто тверду. У процесі рафінування розплавленої сталі її вакуумують, продувають інертними газами, перемішують із синтетичними флюсами тощо.

Тверду сталь переплавляють електрошлаковим, вакуумно-дуговим, вакуумно-індукційним способами тощо. Після закінчення варіння сталь випущена у ківш продовжує вбирати гази з довкілля. Отже, щоб ізолювати сталь від повітря, а також зменшити кількість домішок, розчинених у ній, сталь вакуумують [1].

Існує кілька методів рафінування (очищення) металів, які застосовуються залежно від типу металу та бажаного ступеня чистоти. Основними з них є:

1. Пірометалургійні методи.

Ці методи ґрунтуються на використанні високих температур для видалення домішок.

- Плавка – основний метод рафінування, де метал розплавляється, а домішки або випаровуються, або осідають в шлак.

- Окислювальна плавка – використовується для видалення домішок, таких як вуглець або сірки, за рахунок окислення у присутності кисню.

- Зонна плавка – метал повільно плавиться у певній зоні, і домішки концентруються в одній частині зливка, що дозволяє поступово їх видалити.

2. Електролітичне рафінування.

Цей метод використовується для отримання дуже чистих металів, таких як мідь чи алюміній.

- Електроліз – процес, при якому метал розчиняється на аноді та осаджується на катоді. Домішки залишаються в електроліті або утворюють анодний шлам.

3. Гідрометалургійні методи.

Засновані на розчиненні металів у рідких розчинах та подальшому осадженні чи виділенні чистого металу.

- Легування – процес розчинення руди в кислоті або лузі з наступним виділенням чистого металу через електроліз або хімічне осадження.

- Амальгамування – використання ртуті для вилучення благородних металів, таких як золото чи срібло.

4. Хімічні способи.

Використовуються для поділу металів та домішок на основі їх різної хімічної активності.

- Хлорування – метал реагує з хлором, утворюючи леткі з'єднання, які потім поділяються.

- Солянки – домішки переводять у розчин з використанням спеціальних реагентів, після чого чистий метал залишається у твердому стані.

5. Вакуумна дистиляція.

Цей метод застосовується для металів із низькою температурою кипіння, таких як цинк чи магній. Метал випаровується у вакуумі, після чого пара конденсується у чисту форму.

Кожен із цих методів може бути адаптований для конкретних типів металів та домішок, а також для вимог до їхньої чистоти.

Математичне та комп'ютерне моделювання процесу рафінування металів, зокрема сталі, є важливим інструментом для оптимізації виробництва та підвищення якості продукту. Ці методи дозволяють прогнозувати поведінку металу та домішок на різних стадіях рафінування, оцінювати вплив параметрів процесу та розробляти ефективні способи управління виробництвом.

1. Математичне моделювання.

Математичні моделі засновані на законах фізики, хімії та термодинаміки. У процесі рафінування металів моделюються такі явища, як теплопередача, дифузія домішок, реакція з киснем, фазові переходи та динаміка потоків рідини і газу [2].

Основні види математичних моделей:

- Термодинамічні моделі: дозволяють розрахувати енергетичний баланс системи та оцінити умови, за яких можливі фазові переходи (наприклад, плавлення або випаровування домішок).

- Кінетичні моделі: описують швидкості хімічних реакцій між металом та навколишнім середовищем (наприклад, киснем або шлаком), а також дифузію домішок.

- Гідродинамічні моделі: моделюють рух рідкого металу та шлаку в плавильних печах, що важливо для рівномірного розподілу температури та перемішування.

- Моделі перенесення мас: описують, як домішки видаляються з металу шляхом дифузії чи хімічних реакцій із газовою фазою.

Приклади:

- Модель плавлення сталі: враховує дифузію вуглецю, марганцю, сірки та інших домішок у розплавленій сталі, а також їхню реакцію з киснем для визначення найкращих умов плавки.

- Теплові моделі: допомагають керувати температурою на різних стадіях плавки, щоб уникнути перегріву або недостатньої температури.

2. Комп'ютерне моделювання.

Комп'ютерні моделі використовуються для симуляції реальних процесів у віртуальному середовищі. Вони дозволяють відтворювати складні системи та процеси, які неможливо повністю описати аналітичними формулами [3].

Інструменти та методи моделювання:

- Метод кінцевих елементів (FEM): використовується для моделювання теплопередачі, напруги та деформації у твердому тілі при його плавленні та кристалізації. FEM особливо корисний щодо формування структури та властивостей сталі при охолодженні.

- Метод кінцевих об'ємів (FVM): застосовується для моделювання течії рідин та газів, а також перенесення тепла та маси у розплаві. Це важливо для моделювання процесів перемішування рідкого металу та видалення домішок.

- Мультифізичні моделі: включають комбінацію різних фізичних процесів, таких як теплопередача, хімічні реакції та механіка рідини. Це дає можливість аналізувати взаємодію між ними та знаходити оптимальні параметри для рафінування сталі.

Програми для моделювання:

- ANSYS Fluent і COMSOL Multiphysics — програми, які широко використовуються для моделювання процесів теплопередачі, перебігу рідин і хімічних реакцій.

- Thermo-Calc – програма для термодинамічного моделювання фазових діаграм та вивчення стабільності фаз залежно від температури та складу.

3. Оптимізація процесу.

Моделювання дозволяє проводити віртуальні експерименти, змінюючи параметри процесу (температура, тиск, склад шлаку, кількість кисню, що вводиться і ін.) і знаходити оптимальні умови для виробництва високоякісної сталі [4].

Приклади оптимізації:

- Зниження кількості домішок: моделі показують, як зміни температури та тиску впливають на видалення сірки та фосфору, що покращує механічні властивості сталі.

- Економія ресурсів: оптимізація параметрів плавки дозволяє знизити витрати енергії, сировини та допоміжних матеріалів, таких як кисень та флюси.

- Підвищення продуктивності: правильне налаштування процесу за допомогою моделей може скоротити час плавки, прискорити видалення домішок та зменшити втрати металу.

4. Застосування штучного інтелекту.

Сучасні методи машинного навчання та штучного інтелекту (AI) також знаходять застосування у моделюванні процесів рафінування металів. AI допомагає аналізувати великі обсяги даних та прогнозувати результати експериментів або виробничих процесів.

Приклади використання AI:

- Прогнозування якості сталі: на основі даних про параметри процесу, штучні нейронні мережі можуть прогнозувати кінцеву якість продукту та пропонувати коригування в реальному часі.

- Оптимізація управління процесом: AI може автоматично регулювати параметри, такі як подача кисню та температура для досягнення найкращого результату.

Таким чином, математичне та комп'ютерне моделювання процесу рафінування стали відігравати ключову роль у покращенні якості продукції, зниженні витрат та підвищенні ефективності виробництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чернега Д. Ф., Богушевський В. С., Готвянський Ю. Я. та ін. Основи металургійного виробництва металів і сплавів. К., 2006. – 503 с.
2. Смірнов О. М., Зборщик О. М. Позапічне рафінування чавуну і сталі: навчальний посібник. Донецьк :Ноулідж, 2013. – 179 с.
3. Khan, M. A. A., & Sheikh, A. K. (2018). A comparative study of simulation software for modelling metal casting processes. International Journal of Simulation Modelling, vol. 17, Iss. 2, pp. 197-209.
4. Металургія (проблеми, теорія, технологія, якість) : підручник / Харлашин П.С. та ін. Донецьк : ТОВ «Норд-комп'ютер», 2005. – 724 с

METHODS AND MEANS FOR MODELING METAL REFINING

Tetiana Nadryhailo, Yevhenii Morhun

Abstract. *Metal refining is a key stage in the production of high-quality metal materials, during which impurities are removed in accordance with established industry standards. This process involves complex chemical, physical, and thermodynamic interactions that occur at various stages, including melting, oxidation, and reduction. The use of efficient refining technologies not only improves the quality of the final product but also reduces waste levels, minimizes environmental impact, and optimizes energy consumption.*

Due to the high complexity of these processes, traditional empirical methods are often insufficient for their optimization. As a result, the demand for accurate predictive models is growing in both scientific research and industrial practice. Various modeling methods have been developed to simulate refining processes, each with its own advantages and limitations. These models provide a deeper understanding of the behavior of metals and impurities under different conditions, allowing for better control of refining parameters and improved process efficiency.

This paper presents an overview of the main methods and means used for modeling the metal refining process.

Keywords: *metal refining, impurities, cleaning, mathematical modeling, optimization and production efficiency.*

REFERENCE

1. Cherniha D. F., Bohushevs'kyi V.S., Hotvyans'kyi Yu. Ya. ta in. Osnovy metalurhiynoho vyrobnytstva metaliv i splaviv. K., 2006 . – 503 s. [inUkrainian]
2. Smirnov O.M., Zborshchik O.M. Pozapichne rafinuvannya chavunu i stali: navchal'nyy posibnyk. Donets'k: Noulidzh, 2013. – 179 s. [inUkrainian]
3. Khan, M. A. A., & Sheikh, A. K. (2018). A comparative study of simulation software for modeling metal casting processes. International Journal of Simulation Modelling, vol. 17, iss. 2, pp. 197-209.
4. Metalurhiya (problemy, teoriya, tekhnolohiya, yakist'): pidruchnyk / Kharlashyn P.S. ta in. Donets'k: TOV «Nord-komp'uter», 2005. – 724 s. [in Ukrainian]