

АНОТАЦІЯ

Щербачов В.Р. Вдосконалення управління завантаженням доменної печі багатокomпонентною шихтою на основі інформації про параметри пластичної зони. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю спеціальністю 136 – «Металургія». Дніпровський металургійний інститут Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, 2026.

Метою роботи є підвищення ресурсо- та енергоефективності технології доменної плавки за рахунок наукового обґрунтування управляючих впливів на хід печі шляхом вибору та корегування параметрів режиму завантаження шихтових матеріалів, що реалізують формування раціональної структури стовпа шихти у доменній печі.

В основу дисертації покладені результати наукових досліджень, що отримані у ході виконання науково-дослідних робіт за тематичними планами Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України:

Виконано аналіз відомих методів визначення форми та положення пластичної зони в доменній печі та заснованих на цій інформації способів управління доменною плавкою, який показав, що найбільшу перспективу подальшого використання для вирішення задач підвищення ефективності плавки шляхом управління формуванням пластичною зоною має розробка нових методів оперативного визначення її параметрів із застосуванням різних засобів контролю розподілу шихти та газового потоку на доменних печах. Показано, що одним з основних способів впливу на основні параметри пластичної зони доменної печі є режим завантаження шихтових матеріалів, який визначає величину площі поверхні плавлення залізовмісних матеріалів (нижню поверхню пластичної зони) та товщину «коксових вікон».

Удосконалена математична модель визначення площі поверхні плавлення пластичної зони. Запропонований підхід передбачає розрахунково - аналітичне визначення тепла, яке утворюється у нижній зоні доменної печі, на відміну від відомого, згідно з яким ця величина задається константою та не враховує особливості поточної технології.

Запропоновано новий метод визначення параметрів пластичної зони (форми, товщини та положення) у доменній печі, оснащених термовимірювальними зондами над поверхнею засипу або іншими засобами контролю розподілу температури газового потоку та/або поверхні засипу. Метод базується на систематизованій сукупності математичних моделей:

- комплексної математичної моделі завантаження компонентів в бункер завантажувального пристрою, вивантаження з нього, руху по тракту ЗП та розподілу на поверхні засипу;
- математичних моделей визначення температур плавлення та розм'якшення залізовмісних компонентів шихти в зонах печі;
- математичної моделі визначення площі поверхні плавлення, удосконаленої шляхом розрахунку тепла у нижній зоні печі, які поєднуються з новим способом визначення меж пластичної зони поверхонь розм'якшення та плавлення.

Виконано аналіз технологічних показників роботи доменної печі у чотирьох дослідних періодах, які відрізняються технологічними умовами плавки, зокрема використанням різних видів паливних добавок: робота без паливних добавок у дутті, з природним газом у дутті, з природним газом та пиловугільним паливом, з пиловугільним паливом. Вибір базових режимів здійснено шляхом визначення найбільш економічного та стабільного інтервалу роботи доменної печі в межах кожного із чотирьох досліджуваних періодів за допомогою запропонованого показника ефективності плавки.

На основі розрахунку показників розподілу мас та хімічного складу суміші компонентів шихти в кільцевих зонах колошника при роботі печі у чотирьох

досліджуваних періодах, за допомогою моделей прогнозування високотемпературних властивостей залізовмісних матеріалів, визначені температури початку їх розм'якшення та плавлення. Виконані розрахункові дослідження щодо визначення загального тепла у нижній частині доменної печі та площі поверхні плавлення, а також визначені координати положення ліній розм'якшення і плавлення та виконано візуалізацію розрахованих меж пластичної зони у доменній печі для чотирьох досліджуваних періодів її роботи.

Для підтвердження адекватності запропонованого методу визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі, оснащених термовимірювальними зондами над поверхнею засипу шихти, виконано факторний аналіз впливу технологічних умов доменної плавки на положення пластичної зони у доменній печі. Результати факторного аналізу дозволили зробити висновок, що наявні зв'язки досліджених величин, які характеризуються отриманими факторними навантаженнями, підтверджують обґрунтованість та достовірність визначення положення пластичної зони в доменній печі за допомогою запропонованого методу.

Розроблено критерій оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі, оснащених термовимірювальними зондами над поверхнею засипу шихти. Відсутність технологічних параметрів у складі розробленого критерію дозволила підтвердити достовірність його оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі шляхом аналізу та встановлення зв'язків критерію з основними технологічними параметрами процесу плавлення. Виконані розрахункові дослідження показали, що запропонований критерій може бути використаний для оцінки раціональності форми та положення пластичної зони доменної печі в технологічних умовах плавки, що склалися.

Виявлені взаємозв'язки вертикальних координат точок лінії плавлення з температурою газу над поверхнею засипу та рудним навантаженням у рівних за площею кільцевих зонах доменної печі, що свідчить про можливість розробки методів контролю положення та форми пластичної зони з використанням даних

термовимірювальних зондів, а також про можливості корегування параметрів цієї зони шляхом зміни розподілу рудного навантаження по радіусу колошника доменної печі. Встановлено, що зв'язок вертикальної координати лінії плавлення у кільцевій зоні з рудним навантаженням у цій зоні характеризується достатньо високими значеннями коефіцієнтів достовірності апроксимації, які знаходяться в діапазоні від 0,5 до 0,58. Згідно з отриманими результатами встановлено, що зміна рудного навантаження на одну й ту ж величину у різних зонах доменної печі може обумовлювати зміщення лінії плавлення, яке відрізняється у 3 – 5 рази: для заданої зміни вертикальної координати лінії плавлення в осьовій та приосьовій зонах потрібна, як правило, значно менша зміна рудного навантаження, ніж у проміжній та периферійній зонах.

Встановлено зв'язки значень вертикальних координат точок перетину середніх ліній кільцевих зон з лініями розм'якшення та Коефіцієнт достовірності апроксимації зв'язків відношення вмісту окатишів до вмісту агломерату та різниці вертикальних координат поверхонь (товщини) пластичної зони у кільцевих зонах доменної печі лінійною функцією складає 0,52. Встановлено взаємозв'язки різності температур розм'якшення та плавлення з вказаним відношенням, які характеризуються високим коефіцієнтом достовірності апроксимації, який складає не менше ніж 0,96. Отримані результати свідчать про можливість використання зміни співвідношення основних залізовмісних компонентів у кільцевій зоні для корегування геометричних параметрів пластичної зони.

Управління параметрами пластичної зони, вибір напрямку та величини управляючого впливу у кожному конкретному випадку повинні ґрунтуватися на результатах математичного моделювання розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника, визначенні складу сумішей компонентів шихти у різних зонах печі та прогнозуванні їх високотемпературних властивостей та тенденцій зміни цих властивостей при зміні компонентного складу суміші. Для регулювання розподілу конкретного компонента змішаної залізородної порції по

радіусу колошника у якості управляючого параметру може бути використана установка розташування дози цього компонента на конвеєрі або у скіпі. Отримані формули для визначення цієї величини при заданих вмісті компонента у кільцевій зоні та вмісті його у шихті для доменних печей з різною структурою системи завантаження.

На основі встановлених зв'язків параметрів пластичної зони з показниками розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника доменної печі (рудне навантаження та вміст компонентів шихти в зонах колошника) розроблено спосіб обґрунтованого корегування характеристик режиму завантаження шихти, який забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі. Розроблено блок - схему вирішення задачі обґрунтування вибору управляючих впливів корегуванням параметрів режиму завантаження шихти з метою забезпечення формування раціональної пластичної зони в доменній печі.

Новий спосіб має перспективу використання у складі експертних систем підтримки прийняття рішень з управління ходом доменної плавки.

Ключові слова: доменна піч, розподіл компонентів шихти, суміш, хімічний склад, температура, відновлення оксидів заліза, математична модель, структура стовпа шихти, когезія, пластична зона, пиловугільне паливо, корегування характеристик, термовимірювальні зонди, режим завантаження.

ABSTRACT

Shcherbachov V.R. **Improvement of control of loading of a blast furnace with a multicomponent burden based on information about the parameters of the cohesive zone.** – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 136 – Metallurgy.

Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2026.

The aim of the work is to increase the resource and energy efficiency of blast furnace smelting technology through the scientific substantiation of control influences on the furnace operation by selecting and adjusting the parameters of the burden charging regime, which ensure the formation of a rational burden column structure in the blast furnace.

The dissertation is based on the results of scientific research obtained during the implementation of research works according to the thematic plans of the Z.I. Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine.

An analysis of known methods for determining the shape and position of the cohesive zone in the blast furnace and of the blast furnace control methods based on this information was carried out. It was shown that the most promising direction for further application in solving the problems of increasing smelting efficiency through control of cohesive zone formation is the development of new methods for the operational determination of its parameters using various means of monitoring the distribution of burden and gas flow in blast furnaces. It was shown that one of the main methods of influencing the key parameters of the cohesive zone is the burden charging regime, which determines the area of the melting surface of iron-containing materials (the lower boundary of the cohesive zone) and the thickness of the “coke windows”.

An improved mathematical model for determining the melting surface area of the cohesive zone was developed. The proposed approach предусматривает a calculation and analytical determination of the heat generated in the lower zone of the blast furnace, in contrast to known approaches in which this value is set as a constant and does not take into account the features of the current smelting technology.

A new method for determining the parameters of the cohesive zone (shape, thickness, and position) in a blast furnace equipped with thermometric probes above the burden surface or other means of monitoring the temperature distribution of the gas flow and/or the burden surface is proposed. The method is based on a systematized set of mathematical models:

- a complex mathematical model of the charging of components into the hopper of the charging device, their discharge, movement along the charging path, and distribution on the burden surface;
- mathematical models for determining the melting and softening temperatures of iron-containing burden components in furnace zones;
- a mathematical model for determining the melting surface area, improved by calculating heat in the lower furnace zone, which are combined with a new method for determining the boundaries of the cohesive zone at the softening and melting surfaces.

An analysis of technological indicators of blast furnace operation was carried out for four experimental periods characterized by different smelting conditions, including operation without fuel additives, with natural gas injection, with combined natural gas and pulverized coal injection, and with pulverized coal injection. The selection of base operating modes was performed by determining the most economically efficient and stable operating interval of blast furnace operation within each of the four studied periods using the proposed smelting efficiency indicator.

Based on the calculation of mass distribution indicators and the chemical composition of the mixture of burden components in the annular zones of the furnace top during operation in the four studied periods, and using models for predicting the high-temperature properties of iron-containing materials, the temperatures of the beginning of their softening and melting were determined. Computational studies were carried out to determine the total heat in the lower part of the blast furnace and the melting surface area. The coordinates of the softening and melting lines were determined, and visualization of the calculated boundaries of the cohesive zone in the blast furnace for the four studied periods was performed.

To confirm the adequacy of the proposed method for determining the shape and position of the cohesive zone in a blast furnace equipped with thermometric probes above the burden surface, a factor analysis of the influence of technological conditions of blast furnace smelting on the position of the cohesive zone was carried out. The

results of the factor analysis made it possible to conclude that the identified relationships between the studied variables, characterized by the obtained factor loadings, confirm the validity and reliability of determining the position of the cohesive zone in the blast furnace using the proposed method.

A criterion for evaluating the shape and position of the cohesive zone in a blast furnace equipped with thermometric probes above the burden surface was developed. The absence of technological parameters in the composition of the developed criterion made it possible to confirm the reliability of its assessment by analyzing and establishing relationships between the criterion and the main technological parameters of the smelting process. The performed studies showed that the proposed criterion can be used to evaluate the rationality of the shape and position of the cohesive zone under given smelting conditions.

Relationships between the vertical coordinates of the points of the melting line and the gas temperature above the burden surface, as well as the ore burden in annular zones of equal area of the blast furnace, were established. This indicates the possibility of developing methods for controlling the position and shape of the cohesive zone using data from thermometric probes, as well as the possibility of adjusting the parameters of this zone by changing the distribution of the ore burden along the furnace radius. It was established that the relationship between the vertical coordinate of the melting line in an annular zone and the ore burden in this zone is characterized by sufficiently high values of approximation reliability coefficients in the range from 0.5 to 0.58. It was found that a change in ore burden by the same value in different zones of the blast furnace can cause a displacement of the melting line differing by a factor of 3–5: for a given change in the vertical coordinate of the melting line, a significantly smaller change in ore burden is generally required in the central and near-central zones than in the intermediate and peripheral zones.

Relationships between the vertical coordinates of the intersection points of the mean lines of annular zones with the softening and melting lines were established. The approximation reliability coefficient of the relationship between the pellet-to-sinter

ratio and the difference in vertical coordinates of the cohesive zone surfaces (its thickness) in annular zones, described by a linear function, is 0.52. Relationships between the difference in softening and melting temperatures and the specified ratio were also established, characterized by a high approximation reliability coefficient of not less than 0.96. The obtained results indicate the possibility of using changes in the ratio of the main iron-containing components in an annular zone to adjust the geometric parameters of the cohesive zone.

Control of the cohesive zone parameters, as well as the selection of the direction and magnitude of control influences in each specific case, should be based on the results of mathematical modeling of burden distribution along the furnace radius, determination of the composition of mixtures of burden components in different furnace zones, and prediction of their high-temperature properties and trends in their changes when the component composition of the mixture varies. To regulate the distribution of a specific component of a mixed iron ore portion along the furnace radius, the setpoint of the location of the dose of this component on the conveyor belt or in the skip can be used as a control parameter. Formulas were obtained for determining this value for given component content in an annular zone and in the total burden for blast furnaces with different charging system structures.

Based on the established relationships between cohesive zone parameters and indicators of burden material distribution along the furnace radius (ore burden and component content in the furnace top zones), a method for justified adjustment of the characteristics of the burden charging regime was developed, which ensures the formation of rational cohesive zone parameters in the blast furnace. A block diagram for solving the problem of substantiating the selection of control influences by adjusting the parameters of the burden charging regime was developed in order to ensure the formation of a rational cohesive zone in the blast furnace.

The proposed method has the potential for use in expert decision support systems for blast furnace operation control.

Keywords: blast furnace, burden distribution, mixture, chemical composition, temperature, reduction of iron oxides, mathematical model, burden column structure, cohesion, cohesive zone, pulverized coal fuel, adjustment of characteristics, thermometric probes, charging regime.