

АНОТАЦІЯ

Грек О.С. «Розробка технології одержання заліза твердофазним відновленням залізо-рудно-вугільних брикетів в умовах індукційного нагріву.» – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії PhD за спеціальністю 136 – «Металургія». – Український державний університет науки і технологій. - Дніпро, 2026.

Дисертаційна робота присвячена комплексному дослідженню теплових процесів і кінетики відновлення залізо-рудно-вугільних брикетів в умовах індукційного нагріву, а також розробці технологічної схеми отримання відновленого заліза та виплавки сталі в індукційній печі.

В аналітичній частині роботи виконано огляд сучасних технологій прямого відновлення заліза, показано їхні переваги та обмеження, зокрема: обмеження інтенсивності процесів відновлення через опір дифузійних та теплових потоків у частках шихтових матеріалів; обмеження температур газів у реакційній зоні шахтних реакторів а також відсутність ефективних рішень для покриття теплових дефіцитів ендотермічних реакцій у реакторах у разі підвищення частки водню у потоці газів-відновників.

Спираючись на проведений аналіз літературних джерел запропоновано нову схему процесу твердофазного відновлення оксидів заліза та подальшого виробництва високоякісної сталі з первородної залізної руди в одному металургійному агрегаті – індукційній печі. Для реалізації такого процесу запропоновано новий склад брикетів що мають у своєму складі первинну залізорудну складову, вугілля та складову з металізованого заліза. Такі брикети є само-відновлювальними оскільки мають в своєму складі відновник у стехіометричному співвідношенні до кисню оксидів заліза рудної складової усього брикету та само-розігріваючими в умовах змінного електромагнітного поля оскільки містять у своєму складі металеву складову, геометричні розміри

якої підбираються у відповідності до параметрів електромагнітного поля індукційної печі та забезпечують ефективний розігрів усього брикету.

У запропонованому брикеті виключаються обмеження що присутні у сучасних технологіях прямого відновлення. По-перше, теплова енергія вивільняється у всьому об'ємі всередині брикету через рівномірний розподіл металеві (нагрівальної) складової у шихті таким чином по всьому об'єму брикету створюється рівномірне температурне поле без формування значних градієнтів. Це підвищує рівномірність нагріву шихти та інтенсивність процесу.

По-друге, рівномірний розподіл дрібнодисперсними частинками відновника (вугілля), і оксидів залізної руди (залізородного концентрату) у шильному шарі в об'ємі брикету, а також із інтенсивним та достатнім притоком теплоти від металеві нагрівальної складової, формує умови для інтенсивного протікання ендотермічних хімічних реакцій газифікації вуглецю вугілля та відновлення оксидів заліза брикету.

По-третє, наявність металеві складової у складі брикетів дає змогу для покриття дефіцитів теплових балансів ендотермічних реакцій усіх ланок процесу газифікації вуглецю та відновлення заліза, що відкриває широкі можливості до збільшення використання водню у процесах прямого відновлення заліза.

Важливо відзначити що використання водню у поєднанні із запропонованими брикетами дає змогу використовувати водень лише в якості відновника оскільки покриття теплових потреб ендотермічних реакцій відновлення відбувається за рахунок ефективного перетворення енергії електромагнітного поля індукційної печі на джоулеву теплоту всередині матеріалу що відновлюється.

Проведено аналіз механізмів нагріву металевих частинок у змінному електромагнітному полі, встановлено закономірності та граничні умови ефективного нагріву металевих часток сферичної форми в умовах індукційного впливу, розраховано параметри геометричних розмірів частинок та наведено залежності частки заліза в шихті від частоти змінного струму в

індукторі індукційної печі для матеріалу окатишів DRI. Зокрема показано що важливим чинником ефективного нагріву металевого тіла провідника сферичної форми є відповідність його діаметру до частоти змінного струму індуктора печі.

Виходячи з аналізу літературних джерел визначено що умовам ефективного нагріву металевих часток сферичної форми відповідатимуть співвідношення діаметру таких часток до товщини скін-шару у межах від 2 до 4. Встановлено що для індукційних печей середньої частоти змінного струму від 0,5 до 10 кГц є доцільним використання металізованих окатишів DRI з радіусом від 5 до 8 мм у якості нагрівачів у складі залізо-рудно-вугільних брикетів.

Виходячи із сформованих уявлень та висновків щодо максимальної ефективності процесу прямого відновлення оксидів заліза у дрібнодисперсній формі в безпосередньому контакті із відновником (вуглецем вугілля також у дрібнодисперсній формі) у щільному шарі у складі брикетів із одночасним інтенсивним джерелом теплоти всередині брикету було побудовано математичну модель та проведено чисельне моделювання процесу нагріву та відновлення оксидів заліза у складі рудно-вугільної суміші брикету сферичної форми із металевим ядром.

У математичному моделюванні було враховано індукційний нагрів металевого ядра брикету в умовах індукційного нагріву та розподіл теплоти як всередині цього ядра так і назовні у процесі нагріву та розподілу теплоти в шарі рудно-вугільної суміші брикету. Враховано нерівномірність нагріву всередині металевого ядра внаслідок нерівномірного розподілу щільності вихрових струмів у шарах сферичного провідника (ядра). У рудно-вугільних шарах враховано кінетичні та термодинамічні умови послідовного протікання хімічних реакцій відновлення оксидів заліза та газифікації вуглецю. Враховано вплив теплових ефектів хімічних реакцій та кінетику реакцій відновлення.

Адекватність математичної моделі було перевірено на основі відкритих експериментальних даних та було досягнуто максимальної похибки

розрахункових значень температур на рівні 5-8% для температурного діапазону 500-1200°C. Результати чисельного моделювання дозволили зробити висновки про необхідність контролю температури ядра оскільки саме в ньому спостерігається найшвидше зростання температури в умовах індукційного нагріву. Тривалість нагріву всього об'єму рудно-вугільної суміші брикету від металевого ядра може дорівнювати від 10 до 30 хвилин в залежності від докладеної електричної потужності індукційної печі, геометричних розмірів металевого ядра та всього брикету. При цьому лімітуючим фактором швидкості нагрівання брикету і як наслідок швидкості процесу твердофазного відновлення буде саме температура центру металевого ядра. Наведено результати математичного моделювання значення теплової потужності індукційного поля печі протягом часу нагріву брикету з металевим ядром за умови зберігання твердофазного стану усіх компонентів залізо-рудно-вугільного брикету.

Дані моделювання показують, що у процесі нагріву та твердофазного відновлення найближчі до металевого ядра шари рудно-вугільної суміші брикету будуть відновлюватись до металічного стану швидше через більшу швидкість нагріву цих шарів. Свіжевідновлене залізо таким чином буде утворювати нові зовнішні шари металевого ядра збільшуючи його діаметр та теплову потужність. Це робить процес нагріву в такому брикеті автокатолітичним та вимагає зменшення теплової потужності індуктора печі через зміну або напруження магнітної індукції на 0-30% або частоти змінного струму на 0-50% від початкового значення.

Наведені в роботі данні стосуються процесу відновлення оксидів заліза у складі брикетів що проходить в умовах впливу електромагнітного поля індукційної печі. Було проведено аналіз літературних джерел та результатів експериментальних досліджень щодо вивчення впливу змінного електромагнітного поля промислової та середньої частоти (0,05-50 кГц) на процес відновлення оксидів заліза в умовах газового та карботермічного твердофазного відновлення. Наявні літературні дані свідчать про

інтенсифікуючий вплив на процеси газового та карботермічного відновлення оксидів заліза змінного електромагнітного поля високої частоти (>100 кГц), однак вплив електромагнітного поля промислових та середніх частот на сьогодні досліджено доволі обмежено.

На базі аналізу кінетичних даних результатів експериментальних досліджень, спираючись на положення фізики твердого тіла та теорії магнетизму, висунуто уявлення про механізм впливу змінного електромагнітного поля на швидкість твердофазного відновлення оксидів заліза газами та вуглецем: вплив електромагнітного поля переважно обумовлений феромагнітними властивостями кристалічних фаз, виникненням контактної різниці потенціалів між оксидами заліза, та ін. В результаті цього форсується зовнішньо- та внутрішньо-дифузійний газообмін у ході відновлення, що випливає з результатів окремих експериментів. Під впливом електромагнітного поля відбувається «розхитування» кристалічної решітки твердих реагентів, утворюються додаткові структурні дефекти, що у свою чергу послаблює зв'язки Fe–O, полегшуючи зародження нових фаз та розвиток реакційної дифузії. Сукупність зазначених ефектів призводить до диспергування твердих продуктів відновлення, утворення розвиненої мережі транспортних каналів і збільшення поверхні, доступної газам.

Виконано експериментальне дослідження процесів нагріву та твердофазного відновлення оксидів заліза вуглецем у сипучій дрібнодисперсній формі та у формі залізо-рудно-вугільного брикету. Доведено якісну можливість отримання відновленого заліза в індукційній печі в обох формах. Отримані експериментальні данні свідчать про вплив вмісту металеві складової у залізо-рудно-вугільному брикеті на швидкість нагріву та інтенсивність процесу твердофазного відновлення. Засвідчено зменшення температури початку реакцій відновлення оксидів заліза у присутності твердого вуглецю на $100-120^{\circ}\text{C}$ в умовах зниження тиску у тиглі індукційної печі до $5 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$ мбар. Експериментально показана можливість проведення інтенсивного нагріву та твердофазного відновлення рудного матеріалу у складі

залізо-рудно-вугільного брикету з металевим ядром маса якого складала 5-10% від загальної маси брикету.

Спираючись на експериментальні данні, результати аналітичних та математичних досліджень в роботі запропоновано ряд технологічних рішень для інтенсифікації існуючих процесів газового та карботермічного твердофазного відновлення оксидів заліза із застосуванням індукційного нагріву шихтових матеріалів, а також брикети для використання у таких рішеннях.

Також запропоновано технологічні схеми процесу виплавляння високоякісної сталі, який об'єднує твердофазне відновлення та розплавлення свіжевідновленого заліза, його легування та модифікування в індукційній печі. Перевагами такого процесу є:

- використання первинної рудної сировини;
- можливість повного використання фізичної теплоти свіжевідновленого заліза (відмова від проміжного охолодження продуктів відновлення), фізичної та хімічної енергії газів що утворюються у процесі відновлення а також залишкового відновлювального потенціалу цих газів;
- висока швидкість та об'ємний характер нагріву залізо-рудно-вугільних брикетів в змінному електромагнітному полі індукційної печі, що забезпечує інтенсифікацію процесу загалом;
- зменшення об'ємів обладнання як із причин, наприклад, відсутності потреби у зовнішньому нагріві газів-відновників що використовуються у процесі так і з огляду на те що процеси нагріву, твердофазного відновлення та плавлення свіжевідновленого заліза відбуваються в єдиному металургійному агрегаті.

Результати числових та експериментальних досліджень наведених у роботі свідчать про високий потенціал запропонованих технологічних рішень та процесів.

Ключові слова: екологія, викиди CO₂, губчасте залізо, газове відновлення, карботермічне відновлення, твердофазне відновлення оксидів заліза, окатиші, металізація, композитний рудно-вугільний брикет, залізорудна сировина, електромагнітне поле, електричний режим, рудотермічна індукційна піч, математична модель, теплопередача, газифікація вуглецю.

ABSTRACT

Grekh O.S. Development of a technology for obtaining iron by solid-phase reduction of iron-ore-coal briquettes under induction heating conditions. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy PhD in the specialty 136 – ‘Metallurgy’. – Ukrainian State University of Science and Technology. – Dnipro, 2026.

The thesis is devoted to a comprehensive study of thermal processes and kinetics of iron-ore-coal briquette reduction under induction heating conditions, as well as the development of a technological scheme for obtaining reduced iron and smelting steel in an induction furnace.

The analytical part of the work provides an overview of modern technologies for direct iron reduction, showing their advantages and limitations, in particular: limitations on the intensity of reduction processes due to the resistance of diffusion and heat flows in charge materials; limitations on gas temperatures in the reaction zone of shaft reactors, as well as the lack of effective solutions for covering the heat deficits of endothermic reactions in reactors in the event of an increase in the proportion of hydrogen in the flow of reducing gases.

Based on the analysis of literature sources, a new scheme for the solid-phase reduction of iron oxides and the subsequent production of high-quality steel from primary iron ore in a single metallurgical unit – an induction furnace – has been proposed. To implement this process, a new composition of briquettes has been proposed, consisting of primary iron ore, coal and metallised iron. Such briquettes are self-reducing because they contain a reducing agent in a stoichiometric ratio to the oxygen of iron oxides of the ore component of the entire briquette, and are self-heating in conditions of an alternating electromagnetic field because they contain a metal component, whose geometric dimensions are selected in accordance with the parameters of the electromagnetic field of the induction furnace and ensure effective heating of the entire briquette.

The proposed briquette eliminates the limitations present in modern direct reduction technologies. Firstly, thermal energy is released throughout the entire volume inside the briquette due to the uniform distribution of the metal (heating) component in the charge, thus creating a uniform temperature field throughout the entire volume of the briquette without the formation of significant gradients. This increases the uniformity of charge heating and the intensity of the process.

Secondly, the uniform distribution of finely dispersed particles of the reducing agent (coal) and iron ore oxides (iron ore concentrate) in the core layer within the volume of the briquette, as well as the intense and sufficient heat flow from the metal heating component, creates conditions for the intensive flow of endothermic chemical reactions of coal gasification and reduction of iron oxides in the briquette.

Thirdly, the presence of a metal component in the composition of briquettes makes it possible to cover the heat balance deficits of endothermic reactions of all stages of the carbon gasification and iron reduction process, which opens wide opportunities for increasing the use of hydrogen in direct iron reduction processes.

It is important to note that the use of hydrogen in combination with the proposed briquettes allows hydrogen to be used only as a reducing agent, since the thermal requirements of endothermic reduction reactions are covered by the efficient conversion of the electromagnetic field energy of the induction furnace into Joule heat inside the material being reduced.

An analysis of the mechanisms of heating metal particles in an alternating electromagnetic field was carried out, the regularities and boundary conditions for the effective heating of spherical metal particles under the influence of induction were established, calculated the parameters of the geometric dimensions of the particles, and presented the dependence of the iron content in the charge on the frequency of the alternating current in the inductor of the induction furnace for DRI pellets. It is shown that an important factor in the effective heating of a spherical metal conductor is the correspondence of its diameter to the frequency of the alternating current of the furnace inductor.

Based on an analysis of the literature, it has been determined that the conditions for effective heating of spherical metal particles will correspond to a ratio of the diameter of such particles to the thickness of the skin layer in the range from 2 to 4. It has been established that for induction furnaces with an average alternating current frequency of 0.5 to 10 kHz, it is advisable to use metallised DRI pellets with a radius of 5 to 8 mm as heaters in iron-ore-coal briquettes.

Based on the formed ideas and conclusions regarding the maximum efficiency of the process of direct reduction of iron oxides in a finely dispersed form in direct contact with the reducing agent (coal carbon also in a finely dispersed form) in a dense layer in briquettes with a simultaneous intense heat source inside the briquette, a mathematical model was constructed and numerical modelling of the process of heating and reduction of iron oxides in an ore-coal mixture briquette of spherical shape with a metal core was carried out.

The mathematical modelling considered the induction heating of the metal core of the briquette under induction heating conditions and the distribution of heat both inside this core and outside during the process of heating and heat distribution in the layer of the ore-coal mixture of the briquette. The unevenness of heating inside the metal core due to the uneven distribution of eddy current density in the layers of the spherical conductor (core) was considered. In the ore-coal layers, the kinetic and thermodynamic conditions of the sequential flow of chemical reactions of iron oxide reduction and carbon gasification are considered. The influence of the thermal effects of chemical reactions and the kinetics of reduction reactions is considered.

The adequacy of the mathematical model was verified based on open experimental data, and a maximum error of 5-8% was achieved for the calculated temperature values in the temperature range of 500-1200°C. The results of numerical modelling allowed conclusions to be drawn about the need to control the temperature of the core, since it is there that the fastest temperature rise is observed under induction heating conditions. The duration of heating of the entire volume of the ore-coal mixture of the briquette from the metal core can be from 10 to 30 minutes, depending on the applied electrical power of the induction furnace.

geometric dimensions of the metal core and the entire briquette. In this case, the limiting factor for the briquette heating rate and, as a result, the rate of the solid-phase reduction process will be the temperature at the centre of the metal core. The results of mathematical modelling of the thermal power of the induction field of the furnace during the heating of the briquette with a metal core are presented, assuming that all components of the iron-ore-coal briquette remain in a solid state.

The modelling data show that during the heating and solid-phase reduction process, the layers of the ore-coal mixture of the briquette closest to the metal core will be reduced to a metallic state faster due to the higher heating rate of these layers. Freshly reduced iron will thus form new outer layers of the metal core, increasing its diameter and thermal power. This makes the heating process in such a briquette autocatalytic and requires a reduction in the thermal power of the furnace inductor by changing the magnetic induction voltage by 0-30% or the alternating current frequency by 0-50% from the initial value.

The data presented in the work relate to the process of iron oxide reduction in briquettes under the influence of the electromagnetic field of an induction furnace. An analysis of literature sources and the results of experimental studies on the influence of an alternating electromagnetic field of industrial and medium frequency (0.05-50 kHz) on the process of iron oxide reduction under conditions of gas and carbothermic solid-phase reduction was carried out. The available literature data indicate an intensifying effect on the processes of gas and carbothermic reduction of iron oxides by a high-frequency alternating electromagnetic field (>100 kHz), but the effect of industrial and medium-frequency electromagnetic fields has been studied rather limitedly to date.

Based on the analysis of kinetic data from experimental studies and relying on the principles of solid-state physics and magnetism theory, a hypothesis has been put forward regarding the mechanism of the effect of an alternating electromagnetic field on the rate of solid-phase reduction of iron oxides by gases and carbon: the influence of the electromagnetic field is mainly due to the ferromagnetic properties of crystalline phases, the emergence of a contact potential difference between iron

oxides, etc. As a result, external and internal diffusion gas exchange is forced during reduction, as evidenced by the results of individual experiments. Under the influence of an electromagnetic field, the crystal lattice of solid reagents is 'shaken up,' additional structural defects are formed, which in turn weakens the Fe–O bonds, facilitating the nucleation of new phases and the development of reaction diffusion. The combination of these effects leads to the dispersion of solid reduction products, the formation of a developed network of transport channels, and an increase in the surface area accessible to gases.

An experimental study of the processes of heating and solid-phase reduction of iron oxides with carbon in a loose, finely dispersed form and in the form of iron-ore-coal briquettes has been carried out. The qualitative possibility of obtaining reduced iron in an induction furnace in both forms has been proven. The experimental data obtained indicate the influence of the metal content in the iron-ore-coal briquette on the heating rate and intensity of the solid-phase reduction process. A decrease in the temperature at which the reduction of iron oxides begins in the presence of solid carbon by 100-120°C has been confirmed under conditions of reduced pressure in the crucible of the induction furnace to $5 \cdot 10^{-3}$ – $3 \cdot 10^{-2}$ mbar. The possibility of intensive heating and solid-phase reduction of ore material in the composition of iron-ore-coal briquettes with a metal core weighing 5-10% of the total weight of the briquette has been experimentally demonstrated.

Based on experimental data and the results of analytical and mathematical studies, the paper proposes several technological solutions for intensifying existing processes of gas and carbothermic solid-phase reduction of iron oxides using induction heating of charge materials, as well as briquettes for use in such solutions.

Technological schemes for the smelting of high-quality steel are also proposed, combining solid-phase reduction and melting of freshly reduced iron, its alloying and modification in an induction furnace. The advantages of this process are:

- use of primary ore raw materials;

- possibility of full utilisation of the physical heat of freshly reduced iron (no intermediate cooling of reduction products), the physical and chemical energy of gases formed during the reduction process, and the residual reduction potential of these gases;
- high speed and volumetric nature of heating iron-ore-coal briquettes in the alternating electromagnetic field of an induction furnace, which ensures the intensification of the process as a whole;
- reduction in the volume of equipment, both because there is no need for external heating of the reducing gases used in the process and because the processes of heating, solid-phase reduction and melting of freshly reduced iron take place in a single metallurgical unit.

The results of numerical and experimental studies presented in the paper indicate the high potential of the proposed technological solutions and processes.

Keywords: ecology, CO₂ emissions, sponge iron, gas-based reduction, carbothermal reduction, solid-phase reduction of iron oxides, pellets, metallisation, composite ore-coal briquette, iron ore raw materials, electromagnetic field, electrical mode, ore-thermal induction furnace, mathematical model, heat transfer, carbon gasification.