

ЧУПРИНОВ ЄВГЕН

Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій <https://orcid.org/0000-0001-8605-3434>
e-mail: chuprynov_yv@duet.edu.ua

КОРЕНКО МАРИНА

Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій <https://orcid.org/0000-0002-4582-1756>
e-mail: korenko_mg@duet.edu.ua

КАССИМ ДАР'Я

Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій <https://orcid.org/0000-0002-1750-1237>
e-mail: kassim@duet.edu.ua

РЕКОВ ЮРІЙ

Технічний університет «Метінвест Політехніка»

<https://orcid.org/0009-0006-0318-0168>e-mail: yuriy.rekov@mipolytech.education

ЛЯХОВА ІРИНА

Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій <https://orcid.org/0000-0001-7589-8351>
e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua

МАЛІЙ ХРИСТИНА

Технічний університет «Метінвест Політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-9046-4268>e-mail: kristina.maliy@mipolytech.education

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ УКРАЇНСЬКИХ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ПРИКЛАДІ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ». ЧАСТИНА 1. АГЛОДОМЕННЕ ВИРОБНИЦТВО

Показано, що незважаючи на значні виклики, українська металургійна галузь має потенціал для відновлення та розвитку. Впровадження сучасних технологій, використання вітчизняної сировини та оптимізація виробничих процесів є ключовими факторами успіху. Проаналізовано можливості модернізації аглодоменного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» шляхом впровадження двошарової шихти з різним вмістом вуглецю та його реакційною здатністю, встановлено оптимальні параметри процесу спікання двошарової шихти з вищезазначеними показниками. Дослідженнями показано, що використання палива з високою та низькою реакційною здатністю відповідно до розробленої технології дозволяє підвищити якість агломерату, знизити питому витрату палива та збільшити продуктивність агломераційного процесу. Розглянуте питання використання бентонітових глин українського походження для виробництва окатишів, проаналізований вплив вологості шихти та типу використаного бентоніту на фізико-механічні властивості окатишів. Виявлено, що збільшення вологості шихти перед огрудуванням призводило до змін властивостей отриманих окатишів, незалежно від типу використаного бентоніту. Показано, що застосування бентонітової глини Черкаського родовища має перспективи для впровадження в технологічний процес виробництва окатишів на українських підприємствах. Запропонована технологія отримання нового типу залізорудної сировини для доменної плавки, який поєднує в собі переваги агломерату та окатишів. Поєднання традиційного завантаження антрациту з використанням розроблених локальних спеків з високим вмістом заліза та залишковим вуглецем відкриває нові можливості для оптимізації доменного виробництва.

Ключові слова: українська металургія, ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», аглодоменне виробництво, окатиші, бентоніт, доменна плавка, модернізація, енергоефективність.

CHUPRYNOV YEVHEN

Educational and Scientific Technological Institute State University of Economics and Technology

KORENKO MARYNA

Educational and Scientific Technological Institute State University of Economics and Technology

KASSIM DARIA

Educational and Scientific Technological Institute State University of Economics and Technology

REKOV YURIY

Technical University «Metinvest Polytechnic», Zaporizhzhia

LIAKHOVA IRYNA

Educational and Scientific Technological Institute State University of Economics and Technology

MALII KHRYSTYNA

Technical University «Metinvest Polytechnic», Zaporizhzhia

ANALYSIS OF WAYS TO INCREASE COMPETITIVENESS UKRAINIAN METALLURGICAL ENTERPRISES ON THE EXAMPLE OF PJSC "ARCELORMITTAL KRYVIY RIH". PART 1. SINTERING AND BLAST FURNACE PRODUCTION

It has been demonstrated that, despite significant challenges, the Ukrainian metallurgical industry has the potential for recovery and development. The implementation of modern technologies, the use of domestic raw materials, and the optimization of production processes are key factors for success. The article analyzes the possibilities of modernizing the sinter plant at PJSC ArcelorMittal Kryviy Rih through the introduction of a two-layer charge with different carbon content and reactivity. Optimal parameters for sintering a two-layer charge with the

aforementioned indicators have been established. Studies have shown that the use of fuel with high and low reactivity according to the developed technology allows improving the quality of sinter, reducing specific fuel consumption, and increasing the productivity of the sintering process. The issue of using Ukrainian bentonite clays for the production of pellets has been considered, and the influence of charge moisture content and the type of bentonite used on the physicochemical properties of pellets has been analyzed. It was found that increasing the moisture content of the charge before pelletizing led to changes in the properties of the obtained pellets, regardless of the type of bentonite used. It has been shown that the use of bentonite clay from the Cherkasy deposit has prospects for implementation in the technological process of pellet production at Ukrainian enterprises. A new type of iron ore raw material for blast furnace smelting has been proposed, combining the advantages of sinter and pellets. The combination of traditional anthracite charging with the use of developed local sinters with a high iron content and residual carbon opens up new possibilities for optimizing the blast furnace process.

Keywords: Ukrainian metallurgy, PJSC ArcelorMittal Kryvyi Rih, sinter plant, pellets, bentonite, blast furnace, modernization, energy efficiency

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Українська металургія сьогодні стикається з низкою серйозних викликів. Повномасштабне вторгнення з боку РФ призвело до руйнування виробничих потужностей, логістичних мереж та енергетичної інфраструктури, що суттєво скоротило обсяги виробництва чавуну, сталі та готового металопрокату. Додатковими проблемами є дефіцит робочої сили, зростання вартості енергоносіїв та сировини, а також посилення конкуренції на світовому ринку. Все це створює значні перешкоди для відновлення та розвитку української металургійної галузі.

Найбільш конкурентоспроможним підприємством в Україні, на думку авторів статті, є ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Це пояснюється рядом важливих факторів: близьке розташування ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» до сировинної бази (родовищ залізної руди), має підрозділи з видобутку та збагачення залізородної сировини, що входять до його складу, а також потужні коксохімічне, доменне та сталеплавильне виробництва. Комбінат має в своєму розпорядженні успішно працюючі дрібносортні та дровові стани, з яких три стани (дрібносортно-дротовий стан 250/150, дрововий стан 150 і дрібносортний стан 250-4) можна вважати бути сучасними, а решта (дрібносортні прокатні стани першого та другого покоління) – за своїм технічним рівнем істотно поступаються закордонним аналогам. У нових умовах більш жорсткої світової конкуренції вони можуть стати неконкурентоспроможними.

Враховуючи, що найбільшим недоліком ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є велика частка зливкового переділу, неминучим є перехід на використання безперервної заготовки збільшеного поперечного перерізу (150×150 мм) з модернізацією діючих прокатних станів та подальшого розвитку комбінату у бік розширення сортаменту продукції. Крім того, суттєве вдосконалення технологічних процесів має відбутись і на інших ланках – аглодоменній та сталеплавильній.

Формулювання цілей статті

Метою цього дослідження є аналіз можливих шляхів для вдосконалення аглодоменного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з метою покращення якості продукції та зниження її собівартості.

Виклад основного матеріалу

агломераційного шару (близько 40-50 %) та надлишок теплоти у нижньому (до 70 %) призводять до зниження середніх металургійних характеристик агломерату та підвищення питомої витрати вартісного палива [1-6]. З метою розробки оптимальної технології спікання агломерату спеціалістами Державного університету економіки і технологій та Технічного університету «Метінвест Політехніка» було проведено дослідження на двошарових шихтах з різним вмістом та реакційною здатністю твердого палива в кожному шарі [7]. Досліди здійснювали на лабораторних установках, що дозволяли моделювати реальні умови виробництва, а саме: аглочасі ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (300×300 мм і висотою 500 мм) та установці ННТІ ДУЕТ (діаметром 100 мм і висотою шару 300 мм).

На початку досліджень було здійснено спікання однорідної базової шихти, до складу якої вводилося тверде паливо з середньою реакційною здатністю $CRI = 36,7 \%$ та фракцією 0-3 мм. Режими спікання відповідали типовим для сучасних аглофабрик. Для підвищення достовірності результатів кожен дослід повторювали тричі, при цьому відхилення отриманих даних були незначними. В шихту за новою технологією додавали 10-30% від загальної необхідної кількості вуглецю у вигляді високореакційного твердого палива ($CRI > 37 \%$). Далі, під час формування агломераційного шару, верхню його половину збагачували додатково високореакційним паливом (на 5-15 % більше середнього значення), а нижню – паливом з низькою реакційною здатністю ($CRI < 37 \%$) у кількості на 10-20 % менше середнього значення.

В результаті проведених досліджень встановлено оптимальні параметри процесу спікання двошарової шихти з різним вмістом вуглецю та його реакційною здатністю. Використання палива з високою та низькою реакційною здатністю відповідно до розробленої технології дозволяє підвищити якість агломерату, знизити питому витрату палива та збільшити продуктивність агломераційного процесу. Враховуючи те, що впровадження даної схеми складання агломераційної шихти можливо без суттєвої реконструкції та капітальних вкладень на будь-яких аглофабриках України, перспективним напрямком подальших досліджень є промислова апробація запропонованої технології.

Будівництво фабрик огрудкування є важливим кроком для модернізації металургійної галузі та зниження її впливу на довкілля. Процес виробництва окатишів дозволяє знизити пиловиділення та викиди шкідливих речовин у атмосферу порівняно з агломерацією. Крім того, вміст заліза в окатишах в середньому

на 10 % вище, ніж в агломераті, а їх міцність суттєво перевищує аналогічний показник агломерату. Враховуючи це, протягом останніх років ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» зупинив агломераційний цех металургійного виробництва, який був технологічно застарілим та не відповідав сучасним екологічним стандартам, залишивши аглофабрику №2, на котрій за останні роки було проведено ряд модернізацій – встановлена нова система електрофільтрів сухого типу та запроваджена рециркуляція пилу електрофільтрів, розроблена схема використання теплоти гарячого звороту в ході агломерації, виконана заміни спікальних візків на повністю литі, модернізований лінійний охолоджувач і елементи ексгаустерів. Також було заплановано будівництво фабрики огрудкування, яке довелось відкласти через воєнні дії.

Основним сполучним при виробництві залізорудних окатишів є бентонітова глина [8-13]. У СРСР всі вітчизняні фабрики з виробництва окатишів використовували лужний бентоніт з єдиного великого родовища, розділеного між АрмРСР та АзРСР. З розпадом СРСР і припиненням видобутку на цьому родовищі, підприємства переорієнтувалися на імпорتنі лужноземельні бентоніти індійського та грецького походження, модифіковані кальцінованою содою. Паралельно досліджувалися можливості використання вітчизняного лужноземельного бентоніту з Черкаського родовища, проте технологія модифікації обмежувала його застосування.

Стандартні методи визначення реологічних властивостей бентонітів передбачають використання дистильованої води. Проте, на виробництві застосовується технологічна вода з різним рівнем мінералізації. Дослідження показали, що збільшення жорсткості води суттєво знижує здатність бентонітів з лужним обмінним комплексом до набухання та поглинання води. Натомість, на бентоніти з лужноземельним комплексом цей фактор впливає незначно. Зокрема, зростання жорсткості води на Північному ГЗК призвело до значного зниження цих показників, що негативно позначилося на якості сирих окатишів.

Враховуючи, що українські бентонітові глини є саме лужноземельними, пошук правильної технології їх підготовки та застосування в процесах виробництва окатишів без втрати якісних характеристик готової продукції стає досить актуальним питанням. Це дозволить використовувати українську сировину, покращити імпортно-експортний баланс та залучить в національну економіку додаткові інвестиції та робочі місця.

Були проведені дослідження [14, 15], які дозволили детально проаналізувати вплив вологості шихти та типу використаного бентоніту на фізико-механічні властивості окатишів. Для експериментів були обрані два види бентоніту: лужний (саригохський) та лужноземельний (черкаський).

Виявлено, що збільшення вологості шихти перед огрудкуванням призводило до змін властивостей отриманих окатишів, незалежно від типу використаного бентоніту. Спостерігалось зростання таких показників, як динамічна міцність, пористість та температура «шоку». Це пояснюється тим, що збільшення кількості води в шихті сприяє більш ефективному диспергуванню бентоніту та утворенню міцніших структурних зв'язків між частинками руди.

Однак, при подальшому підвищенні вологості понад оптимального значення, спостерігалось зниження статичної міцності окатишів, що пов'язано з тим, що надмірна кількість води призводить до розрідження пульпи, утворення великих пор та зниження міцності структурних зв'язків. Порівняння впливу лужного та лужноземельного бентонітів показало, що загальна тенденція зміни властивостей окатишів при зміні вологості була схожою для обох типів бентоніту. Однак, окатиші, отримані з використанням черкаського бентоніту, як правило, мали дещо вищу пористість. Це може бути пов'язано з особливостями мінерального складу та дисперсності цього типу бентоніту.

Проведені дослідження показали, що застосування бентонітової глини Черкаського родовища має перспективи для впровадження в технологічний процес виробництва окатишів на відповідних підприємствах. Переваги від цього вже були наведені вище.

Традиційно в доменній плавці в якості залізовмісних компонентів шихти використовують агломерат та окатиші. Кожен з них має свої переваги та недоліки. Однак, сучасний стан галузі та прагнення до підвищення ефективності виробництва висувають нові вимоги до якості залізорудної сировини. Існуючі матеріали, незважаючи на довгу історію застосування, мають ряд недоліків [16]. Це впливає на їхні металургійні властивості та може обмежувати можливості покращення технології доменної плавки [17].

Для проведення технологічних випробувань з розробки нового типу залізорудної сировини була використана напівпромислова установка, що складалася з бункерів з дозаторами для компонентів шихти, змішувача та огрудкувача шихти. Обпалювання шихти здійснювалося у футерованій чаші корисним діаметром 300 мм та висотою 500 мм. Завдяки універсальній схемі газопотоків теплоносія, була можливість точно регулювати температуру та вміст кисню в оброблюваному шарі матеріалу. Технологія обпалення, схема складання шихти та види офлюсованої моносировини, яка отримується в результаті, представлені в роботах [17, 18].

Розроблений продукт для доменної плавки поєднує в собі найкращі властивості агломерату та окатишів. Цей матеріал містить підвищений вміст заліза та залишкового вуглецю, що забезпечує підвищення техніко-економічних показників доменної плавки. Крім того, розроблена технологія дозволяє виготовляти таку сировину в існуючих цехах з виробництва окатишів з мінімальними модифікаціями обладнання та технологічного процесу.

Хоча технологія доменної плавки з вдунанням пиловугільного палива (ПВП) теоретично здатна забезпечити найвищі техніко-економічні показники, практичне впровадження часто супроводжується

протилежними результатами. Це пов'язано з низкою факторів, таких як недостатня кваліфікація персоналу, невідповідність шихтових матеріалів та іншими. Натомість, потенціал використання антрациту для покращення економічних показників доменних печей залишається недооціненим.

Збільшення витрати кускового антрациту було обмежене через його низьку міцність при високих температурах. Дрібні частинки антрациту, утворюючись при руйнуванні шматків, погіршували газодинаміку в доменній печі, забиваючи "коксіві вікна" і захаращували горн. Це призводило до зниження пропускної здатності зони в'язко-пластичного стану матеріалів та погіршення загальних показників плавки. Хоча антрацит є більш дешевим видом палива, його використання потребує додаткових заходів для підвищення міцності та оптимізації процесу завантаження [19].

Для досягнення максимальної ефективності від використання антрациту в доменному процесі необхідно істотно збільшити його масу, завантажуючи одночасно з залізородною частиною шихти. Такий підхід не лише виключає "засмічення" коксових шарів дрібними частинками вугілля, що утворюються при руйнуванні, а й забезпечує практично повну газифікацію цієї дрібниці киснем шихти, забезпечуючи при цьому оптимальне розподілення антрациту по радіусу печі. Проведений аналіз наочно продемонстрував, що використання технології вдування пиловугільного палива в кількості меншій за 200 кг/т не лише не перевищує за ефективністю використання шматкового антрациту та природного газу, а й, з урахуванням необхідності постійних капітальних ремонтів, є менш вигідним [20].

Поєднання технологій завантаження кускового антрациту та використання локальних спеків із підвищеним вмістом заліза та залишкового вуглецю відкриває нові перспективи для оптимізації доменного процесу. Зокрема, аналітичні розрахунки для доменної печі об'ємом 5000 м³ демонструють, що при завантаженні 70 кг/т антрациту, вдуванні до 60 м³/т природного газу та використанні офлюсованих спеків із 2,85 % залишкового вуглецю та 70,45 % заліза можна досягти значного скорочення витрати коксу до 322,68 кг/т і підвищення продуктивності до 12733 тонн на добу. Ці показники цілком порівнянні з кращими світовими результатами, досягнутими при використанні вдування пиловугільного палива, але без значних капіталовкладень.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Найбільш конкурентоспроможним підприємством в Україні є ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", завдяки його близькості до сировинної бази, потужному виробництву та можливостям модернізації. Одним з можливих шляхів для вдосконалення аглодоменного виробництва ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" є впровадження технології спікання двошарової шихти. Будівництво фабрик огрудкування є важливим кроком для модернізації металургійної галузі та зниження її впливу на довкілля. Використання українських бентонітових глин для виробництва окатишів може сприяти покращенню імпорто-експортного балансу, залученню додаткових інвестицій та робочих місць. Розробка нового типу залізородної сировини для доменної плавки, що поєднує в собі переваги агломерату та окатишів, може підвищити техніко-економічні показники доменної плавки. Використання спільної технології завантаження кускового антрациту і локальних спеків із підвищеним вмістом заліза та залишкового вуглецю дозволить вивести доменні печі на показники, що відповідають показникам найкращих світових практик при використанні вдування пиловугільного палива.

Література

1. Liang, X.; Liu, X.J.; Xia, D. Numerical investigation of the gas–solid heat transfer characteristics of packed multi-size particles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020, 149, 119237. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119237>
2. Yang, W.; Choi, S.; Choi, E.S.; Ri, D.W.; Kim, S. Combustion characteristics in an iron ore sintering bed-evaluation of fuel substitution. *Combustion and Flame*, 2006, 145, 447-463.
3. Hou, P.; Choi, S.; Yang, W.; Choi, E.; Kang, H. Application of Intra-Particle Combustion Model for Iron Ore Sintering Bed. *Materials Sciences and Applications*. 2011, № 2, 370-380.
4. Blast Furnace Ironmaking: Analysis, Control, and Optimization / I. Cameron et al. Elsevier, 2019. 828 p.
5. Zhao, J.P.; Loo, C.E.; Dukino, R.D. Modelling fuel combustion in iron ore sintering. *Combustion and Flame*, 2015, 162, 1019-1034.
6. Toda, H.; Senzaki, T.; Isozaki, S.; Kato, K. Relationship between heat pattern in sintering bed and sinter properties. *The Iron and Steel Institute of Japan*, 1984, 24, 187-196.
7. Удосконалення процесу двошарового спікання агломераційної шихти / Є.В. Чупринов, Ф.М. Журавльов, Д.О. Кассім, А.К. Тараканов, Ю.В. Реков // Вісник Криворізького національного університету. – 2022. – № 55. – С. 127-131. doi.org/10.31721/2306-5451-2022-1-55-127-131.
8. Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder / S. P. E. Forsmo et al. *Powder Technology*. 2006. Vol. 169, no. 3. P. 147–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.08.008>.
9. Forsmo S. P. E., Vuori J. P. The determination of porosity in iron ore green pellets by packing in silica sand. *Powder Technology*. 2005. Vol. 159, no. 2. P. 71–77. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.032>.
10. Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder / S. P. E. Forsmo et al. *Powder Technology*. 2006. Vol. 169, no. 3. P. 147–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.08.008>.

11. Kawatra S. K., Ripke S. J. Effects of bentonite fiber formation in iron ore pelletization. *International Journal of Mineral Processing*. 2002. Vol. 65, no. 3-4. P. 141–149. URL: [https://doi.org/10.1016/s0301-7516\(01\)00062-x](https://doi.org/10.1016/s0301-7516(01)00062-x).
12. Ripke S. J., Kawatra S. K. Bentonite binder effective strength (BEST) test for unfired iron ore pellets. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2004. Vol. 21, no. 2. P. 65–70. URL: <https://doi.org/10.1007/bf03403305> (date of access: 17.07.2024).
13. Desai R. R., Erwin Desa J. A., Aswal V. K. Hydration studies of Bentonite clay. SOLID STATE PHYSICS: Proceedings of the 56th DAE Solid State Physics Symposium 2011, SRM University, Kattankulathur, Tamilnadu, India. 2012. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4709948>.
14. The potential of using of alkaline earth bentonite clays of Ukraine in the production of iron ore pellets / E.V. Chuprinov, V.P. Lyalyuk, F.M. Zhuravlev, D.O. Kassim, I.A. Lyakhova // Theory and practice of metallurgy (Теорія і практика металургії). – 2020. – №1. – С. 36-43.
15. Study of the influence of different types of bentonite clays on the quality indicators of pellets / E.V. Chuprinov, V.P. Lyalyuk, F.M. Zhuravlev, D.O. Kassim, I.A. Lyakhova // Theory and practice of metallurgy (Теорія і практика металургії). – 2020. – №2. – С. 38-43.
16. Офлюсовані локальні спеки – огрудкована залізорудна моносировина для сучасної доменної плавки / С.В. Чупринов, Ф.М. Журавльов, В.П. Лялюк, Д.О. Кассім, К.О. Шмельцер // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2020. – № 41. – С. 60-70. – (Серія: Технічні науки). <https://doi.org/10.31498/2225-6733.41.2020.226183>.
17. Technology of receiving fluxed iron material for blast furnace with the raised content of iron, combining the best metallurgical characteristics of sinter and pellets / Chuprynov Ye. V., Zhuravlev F. M., Rekov Yu.V., Kassim D. O., Liakhova I. A. // In «Findings of modern engineering research and developments : Scientific monograph». Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2022. 554 p (pp. 480-495). <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-207-4-18>
18. Розробка технології виробництва залізорудної моносировини для доменної плавки (Development of technology for the production of iron ore monoraw for blast furnace smelting) / E.V. Chuprinov, V.P. Lyaluk, F.M. Zhuravlev, D.A. Kassim, I.A. Lyakhova // «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35. – P. 69-77.
19. Lyalyuk, V.P. (2021, a). Diameter Selection of Blast Furnace Tuyeres Based on the Rate and Energy of the Fuel-Enriched Blast and Tuyere Gas Flows with the Injection of the Pulverized Coal. *Steel Transl.* 51, 627–639. <https://doi.org/10.3103/S0967091221090072>
20. Chuprynov, Y., Kassim, D., Shmeltser, K., Lykhova, I., & Renkas, O. (2023). Increasing the efficiency of the furnace depending on the operating conditions of the furnaces. Part 1. Technology of loading of lumped anthracite and natural gas injection. *Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"*, 1(1), 134–146. <https://doi.org/10.62911/ete.2023.01.01.11>
21. Chuprynov, Y., Kassim, D., Shmeltser, K., Lykhova, I., & Renkas, O. (2024). Increasing the efficiency of the furnace depending on the operating conditions of the furnaces. Part 2. The technology of joint loading of lumpy anthracite and fluxed local specs. *Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"*. Vol. 2 No. 1 (2024), 107–118. <https://doi.org/10.62911/ete.2024.02.01.09>

References

1. Liang, X.; Liu, X.J.; Xia, D. (2020). Numerical investigation of the gas–solid heat transfer characteristics of packed multi-size particles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (149), 119237. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119237>
2. Yang, W.; Choi, S.; Choi, E.S.; Ri, D.W.; Kim, S. (2006). Combustion characteristics in an iron ore sintering bed-evaluation of fuel substitution. *Combustion and Flame*, (145), 447-463.
3. Hou, P.; Choi, S.; Yang, W.; Choi, E.; Kang, H. (2011). Application of Intra-Particle Combustion Model for Iron Ore Sintering Bed. *Materials Sciences and Applications*. (2), 370-380.
4. Cameron I. et al. (2019). *Blast Furnace Ironmaking: Analysis, Control, and Optimization*. Elsevier, 828.
5. Zhao, J.P.; Loo, C.E.; Dukino, R.D. (2015). Modelling fuel combustion in iron ore sintering. *Combustion and Flame*, (162), 1019-1034.
6. Toda, H.; Senzaki, T.; Isozaki, S.; Kato, K. (1984). Relationship between heat pattern in sintering bed and sinter properties. *The Iron and Steel Institute of Japan*, (24), 187-196.
7. Chuprynov Ye.V., Zhuravlov F.M., Kassim D.O., Tarakanov A.K., Rekov Yu.V. (2022). Improvement of the two-layer sintering process of the sintering charge. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, (55), 127-131. doi.org/10.31721/2306-5451-2022-1-55-127-131.
8. Forsmo S. P. E. et al. (2006). Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder. *Powder Technology*, 169(3), 147–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.08.008>.
9. Forsmo S. P. E., Vuori J. P. (2005). The determination of porosity in iron ore green pellets by packing in silica sand. *Powder Technology*, 159(2), 71–77. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.032>.
10. Forsmo S. P. E. et al. (2006). Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder /. *Powder Technology*, 169(3), 147–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.08.008>.

11. Kawatra S. K., Ripke S. J. (2002). Effects of bentonite fiber formation in iron ore pelletization. *International Journal of Mineral Processing*, 65(3-4), 141–149. URL: [https://doi.org/10.1016/s0301-7516\(01\)00062-x](https://doi.org/10.1016/s0301-7516(01)00062-x).
12. Ripke S. J., Kawatra S. K. (2004). Bentonite binder effective strength (BEST) test for unfired iron ore pellets. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 21(2), 65–70. URL: <https://doi.org/10.1007/bf03403305> (date of access: 17.07.2024).
13. Desai R. R., Erwin Desa J. A., Aswal V. K. Hydration studies of Bentonite clay. *SOLID STATE PHYSICS: Proceedings of the 56th DAE Solid State Physics Symposium 2011, SRM University, Kattankulathur, Tamilnadu, India. 2012.* URL: <https://doi.org/10.1063/1.4709948>.
14. Chuprinov E.V., Lyalyuk V.P., Zhuravlev F.M., Kassim D.O., Lyakhova I.A. (2020). The potential of using of alkaline earth bentonite clays of Ukraine in the production of iron ore pellets. *Theory and practice of metallurgy*, (1), 36-43.
15. Chuprinov E.V., Lyalyuk V.P., Zhuravlev F.M., Kassim D.O., Lyakhova I.A. (2020). Study of the influence of different types of bentonite clays on the quality indicators of pellets. *Theory and practice of metallurgy*, (2), 38-43.
16. Chuprynov Ye.V., Zhuravlov F.M., Lialiuk V.P., Kassim D.O., Shmeltser K.O. (2020). Fluxed local heats - lumped iron ore mono-raw material for modern blast furnace smelting. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, (41), 60-70. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.41.2020.226183>.
17. Chuprynov Ye. V., Zhuravlev F. M., Rekov Yu.V., Kassim D. O., Liakhova I. A. (2022). Technology of receiving fluxed iron material for blast furnace with the raised content of iron, combining the best metallurgical characteristics of sinter and pellets. In «Findings of modern engineering research and developments : Scientific monograph». Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 480-495. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-207-4-18>
18. Chuprinov E.V., Lyaluk V.P., Zhuravlev F.M., Kassim D.A., Lyakhova I.A. (2021). Development of technology for the production of iron ore monoraw for blast furnace smelting. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, (35), 69-77.
19. Lyalyuk, V.P. (2021). Diameter Selection of Blast Furnace Tuyeres Based on the Rate and Energy of the Fuel-Enriched Blast and Tuyere Gas Flows with the Injection of the Pulverized Coal. *Steel Transl.* 51, 627–639. <https://doi.org/10.3103/S0967091221090072>
20. Chuprynov, Y., Kassim, D., Shmeltser, K., Lykhova, I., & Renkas, O. (2023). Increasing the efficiency of the furnace depending on the operating conditions of the furnaces. Part 1. Technology of loading of lumped anthracite and naturalgas injection. *Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"*, 1(1), 134–146. <https://doi.org/10.62911/ete.2023.01.01.11>
21. Chuprynov, Y., Kassim, D., Shmeltser, K., Lykhova, I., & Renkas, O. (2024). Increasing the efficiency of the furnace depending on the operating conditions of the furnaces. Part 2. The technology of joint loading of lumpy anthracite and fluxed local specs. *Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"*, 2(1), 107–118. <https://doi.org/10.62911/ete.2024.02.01.09>