

Бойко М.М., Єфименко В.В., Журавльова С.В., Полякова Н.В., Подушко К.А.,  
Круглов А.М.

## Дослідження впливу різних видів біопалив на міцність сирих гранул при виробництві залізородних окатишів

Boyko M.M., Yefimenko V.V., Zhuravlova S.V., Polyakova N.V., Podushko K.A., Kruhlov A.M.  
Study of the influence of various types of biofuels on the raw pellets  
strength in the production of iron ore pellets

**Мета.** Одним зі шляхів зниження викидів CO<sub>2</sub> при виробництві окуюваної залізородної сировини є використання біопалив, які також дозволяють зекономити більш дороге викопне паливо. Особливо економічний ефект досягається при використанні біопалив при обпалі окатишів, що дозволяє зменшити витрату природного газу. Окатиші з додаванням біопалива повинні відповідати мінімальним вимогам до механічної міцності в вологому та сухому стані для можливості подальшої термічної обробки, а в обпаленому сталі - для можливості використання доменної печі. В роботі розглянуто особливості застосування біопалив в якості твердого палива в шихті для виробництва окатишів. Метою даного дослідження є встановлення можливості використання лушпиння соняшнику, пшеничної соломи, деревини та деревного вугілля у якості твердого палива в шихті окатишів, а саме визначення впливу додавання біопалив на міцність сирих та сухих окатишів. **Методика.** Для дослідження було обрано чотири види палива рослинного походження: лушпиння соняшника, пшенична солома, деревина, а також деревне вугілля. Для дослідження можливості використання палив рослинного походження при обпалі окатишів була підготовлена шихта наступного складу: залізородний концентрат, бентоніт, а також один із чотирьох видів палива рослинного походження що досліджується. Витрата кожного з біопалив складала від 0 до 1 %. Для зменшення впливу форми, розмірів та умов формування з кожного з отриманих зразків шихти були сформовані брикети циліндричної форми однакових розмірів. Формування брикетів проводили на гідравлічному пресі з зуциллям, яке відповідає огрудкуванню окатишів на промислових огрудкувачах. **Результати.** Встановлено, що при додаванні соломи відбувається значне зниження міцності окатишів, яке можна пояснити тим, що пшенична солома має високу концентрацію гідрофобних восків на своїй поверхні. Ці воски утворюють гідрофобний шар, що складається з кутинового покриття та воскових частинок. Гідрофобні воски створюють межі між частинками соломи, що призводить до зниження міцності окатишів. Найкращі показники міцності сирих та сухих окатишів досягнуті при додаванні лушпиння соняшнику. При аналізі властивостей лушпиння соняшника можна помітити що лушпиння соняшнику має нижчий вміст лігніну порівняно з деревними видами біомаси. Лігнін забезпечує гідрофобну поверхню, яка перешкоджають взаємодії вологи з целюлозою. Натомість вміст целюлози та геміцелюлози у лушпинні соняшнику загалом може перевищувати 80 %. Целюлоза та геміцелюлоза містять значну кількість гідроксильних ОН груп, які є гідрофільними групами і можуть підвищувати водоутримувальну здатність сирих окатишів. Деревинне вугілля має основним компонентом своєю складу вуглець, тому як і кокс та кам'яне вугілля, воно, у порівнянні з залізородними матеріалами, гірше змочується водою та знижує міцність сирих окатишів. **Наукова новизна.** Встановлено механізм впливу різних видів біоматеріалів на міцність сирих окатишів. Визначено зв'язок між складом поверхневих шарів біопалива та можливістю його застосування при огрудкуванні залізородних окатишів. **Практична значущість.** З отриманих в роботі результатів визначено, що в якості палива при обпалі окатишів в кількості до 0,5% можливе використання лушпиння соняшнику, шляхом введення його в шихту для виробництва окатишів. Використання інших видів біопалив, з розглянутих у дослідженні, потребує їх попередньої підготовки.

**Ключові слова:** залізородні окатиші, біопалива, огрудкування, міцність на роздавлювання, поверхневі властивості.

**Purpose.** One of the ways to reduce CO<sub>2</sub> emissions from pelletized iron ore production is to use biofuels, which also save more expensive fossil fuels. A particularly cost-effective effect is achieved when biofuels are used in pellet firing, which reduces natural gas consumption. Pellets with the addition of biofuels must meet the minimum requirements for mechanical strength in the wet and dry state for the possibility of further heat treatment, and in the annealed steel - for the possibility of using a blast furnace. The paper considers the peculiarities of using biofuels as solid fuels in the charge for pellet production. The purpose of this study is to determine the possibility of using sunflower husk, wheat straw, wood, and charcoal as solid fuels in pellet charge, namely to determine the effect of adding biofuels on the strength of raw and dry pellets. **Methodology.** Four types of plant-based fuels were selected for the study: sunflower husk, wheat straw, wood, and charcoal. To investigate the possibility of using plant-based fuels in pellet firing, a charge of the following composition was prepared: iron ore concentrate, bentonite, and one of the four types of plant-based fuels under study. The consumption of each biofuel ranged from 0 to 1 %. To reduce the influence of the shape, size, and molding conditions, cylindrical briquettes of the same size were formed from each of the obtained charge samples. The briquettes were formed on a hydraulic press with a force that corresponds to pelletizing pellets on industrial pelletizers. **Findings.** It has been found that the addition of straw causes a significant decrease in pellet strength, which can be explained by the fact that

© Бойко М.М. – к.т.н., доц. УДУНТ  
Єфименко В.В. – аспірант УДУНТ  
Журавльова С.В. – к.т.н., доц. УДУНТ  
Полякова Н.В. – к.т.н., доц. УДУНТ  
Подушко К.А. – аспірант УДУНТ  
Круглов А.М. – аспірант УДУНТ

© Boyko M. – c.t.s., docent USUST  
Yefimenko V. – PhD student at USUST  
Zhuravlova S. – c.t.s., docent USUST  
Polyakova N. – c.t.s., docent USUST  
Podushko K. – PhD student at USUST  
Kruhlov A. – PhD student at USUST



wheat straw has a high concentration of hydrophobic waxes on its surface. These waxes form a hydrophobic layer consisting of a corner coating and wax particles. The hydrophobic waxes create boundaries between the straw particles, which leads to a decrease in pellet strength. The strength characteristics of wet and dry pellets are achieved when sunflower husk is added. When analyzing the properties of sunflower husk, it can be seen that sunflower husk has a lower lignin content compared to woody biomass. Lignin provides a hydrophobic surface that prevents moisture from interacting with cellulose. Instead, the cellulose and hemicellulose content of sunflower husk can generally exceed 80%. Cellulose and hemicellulose contain a significant amount of hydroxyl OH groups, which are hydrophilic groups and can increase the water retention capacity of raw pellets. Charcoal has carbon as its main component, so, like coke and hard coal, it is less wettable with water than iron ore materials and reduces the strength of raw pellets. **Originality.** The mechanism of influence of different types of biomaterials on the strength of raw pellets has been established. The relationship between the composition of the surface layers of biofuels and the possibility of their use in pelletizing iron ore pellets was determined. **Practical value.** From the results obtained in the work, it was determined that sunflower husk can be used as a fuel for pelletizing in an amount of up to 0.5% by introducing it into the charge for the production of pellets. The use of other types of biofuels considered in the study requires their preliminary preparation.

**Keywords:** iron ore pellets, biofuels, pelletization, crushing strength, surface properties.

## Вступ

Виробництво сталі відіграє важливу роль у світовій економіці. Збільшення видобутку залізної руди призводить до зростання витрат енергії на її переробку, що підвищує рівень викидів CO<sub>2</sub> та інших шкідливих речовин [1]. Основними залізородними матеріалами для доменної печі є агломерат і окатиші, що становить до 98% усієї окускованої залізородної сировини. Одним зі шляхів зниження викидів CO<sub>2</sub> при виробництві окускованої залізородної сировини є використання біопалив, які також дозволяють зекономити більш дороге викопне паливо. Особливо економічний ефект досягається при використанні біопалив при обпалі окатишів, що дозволяє зменшити витрату природного газу [2].

Можливі три основні напрямки використання твердого палива для обпалу окатишів[3]:

- 1) шляхом його газифікації повітрям або киснем з одержанням газоподібного палива;
- 2) безпосереднім спалюванням пилоподібного палива в спеціальних виносних топках з отриманням високотемпературних димових газів, а також при спалюванні його в пальниках;
- 3) шляхом добавки твердого палива в шихту для огрудкування.

Окатиші з додаванням біопалива повинні відповідати мінімальним вимогам до механічної міцності в вологому та сухому стані для можливості подальшої термічної обробки, а в обпаленому сталі - для можливості використання доменної печі.

## Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Використання біопалива в металургійних процесах стикається з низкою проблем. Одним з головних є низька теплота згоряння, висока вологість і значна частка летких компонентів у сировинній біомасі, низька температура початку розкладання біомаси, що робить її менш ефективною в порівнянні з традиційним вугіллем. Для вирішення проблеми низької теплоти згоряння необхідна попередня обробка біомаси, зокрема торефікація або піроліз. Після цих процесів вміст фіксованого вуглецю може збільшитися до 50 % і більше, що покращує її придатність для використання [2].

Проблемою летких речовин є те, що під час обпалу леткі речовини, що містяться в біомасі утворюють мікротріщини в окатишах і зменшують холодну міцність окатишів. При обпалі офлюсованих

окатишів ця проблема може вирішуватися при вищих відсотках додавання біомаси завдяки злиттю частинок, але зниження холодної міцності початковому додаванню біомаси залишається помітною проблемою [4]. Використання біомаси, збільшує загальну пористість що обмежує можливий відсоток заміни викопного палива.

Також проблемою збільшення відсотку заміни викопного палива біомасою є те, що палива з вищим вмістом летких речовин можуть передчасно розкладатися, створюючи тріщини в окатишах [5]. Тому важливим є збереження міцності сирих та сухих окатишів.

Додавання біоматеріалів може негативно впливати на процес огрудкування та міцність сирих та сухих окатишів. Поверхня органічних залишків може мати гідрофобні покриття, тому така поверхня не буде змочуватись водою в процесі огрудкування та знизить міцність сирих окатишів [2].

Загалом аналіз досліджень щодо заміни викопного палива при виробництві окатишів паливом рослинного походження показав перспективність цієї технології та необхідність її подальшого розвитку.

## Мета і завдання досліджень

В роботі розглянуто особливості застосування біопалив в якості твердого палива в шихті для виробництва окатишів. Метою даного дослідження є встановлення можливості використання лушпиння соняшника, пшеничної соломи, деревини та деревного вугілля у якості твердого палива в шихті окатишів. Це дасть можливість знизити витрати викопного палива, що має вищу вартість та негативний вплив на довкілля. Перший етап дослідження – визначення впливу додавання біопалив на міцність сирих та сухих окатишів.

## Матеріали та методи дослідження

Для дослідження було обрано чотири види палива рослинного походження що актуальні для умов України: лушпиння соняшника, пшенична солома, тирса (залишки від обробки деревини), а також деревне вугілля. Склад біоматеріалів наведено в таблиці 1. Кожен вид палива рослинного походження був подрібнений до фракції максимальним розміром 0,1 мм. Потім паливо сушилося у сушильній шафі за температурою 105 °C протягом доби. Для дослідження можливості використання палив рослинного походження при обпалі окатишів була підготовлена шихта наступного складу:

залізорудний концентрат, бентоніт, а також один із чотирьох видів палива рослинного походження що досліджується. Склад концентрату та бентоніту наведено в таблиці 2. Витрата кожного з біопалив складала від 0 до 1 %. Зволоження сумішей проводили понад 100 % маси сухих матеріалів, шляхом додавання 5 % води від маси суміші. Бентоніт додавався у кількості 0,5 % у всі види шихти. Для

зменшення впливу форми, розмірів та умов формування з кожного з отриманих зразків шихти були сформовані брикети циліндричної форми з діаметром 10 мм, висотою 10 мм, масою 3,8 грам. Формування брикетів проводили на гідравлічному пресі «МС-1000» зусиллям 1 т/брикет, яке відповідає зусиллям, що отримує окатиш при огрудкуванні на промислових огрудкувачах.

Таблиця 1 - Хімічний склад біоматеріалів, що використовувались у дослідженні

Матеріал	C, %	H, %	N, %	S, %	O, %	Зола, %	Вища теплота згоряння, МДж/кг
Лушпиння соняшнику	45.82	6.32	2.61	0.14	38.31	6.81	19.31
Пшенична солома	46.06	5.00	0.53	0.11	48.30	5	17.60
Тирса	44.75	6.31	1.68	0.05	42.94	0.34	18.3
Деревне вугілля	84.18	2.405	0.8025	0.015	9,1525	3.445	30.0865

Частину отриманих брикетів сушили у сушильній шафі за температури 105 °С протягом двох діб. Міцність сирих брикетів визначали роздавлюванням зразків на вагах, таким же чином визначали міцність сухих брикетів.

Таблиця 2 - Хімічний склад металургійного концентрату та бентоніту

Матеріали	Fe <sub>зар</sub> , %	FeO, %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	SiO <sub>2</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	CaO, %	MgO, %	Втрати при прокалюванні, %
Концентрат залізної руди	65.88	28.27	62.71	6.44	0.30	0.17	0.26	1.85
Бентоніт	4,1	0	6,08	62,28	13,56	1,7	1,94	10,34

Міцність сирих брикетів визначали роздавлюванням зразків на вагах, таким же чином визначали міцність сухих брикетів. Для отримання міцності окатишів на основі міцності брикетів була використана експериментальна залежність:

$$F_{ок} = 0.45 \times F_6 \quad (1)$$

де  $F_{ок}$  – міцність окатиша,  $F_6$  – міцність брикету.

Отримана міцність розраховується для окатишів діаметром 12 мм.

### Результати дослідження

Залежність міцності сирих окатишів на роздавлювання від вмісту біопалив наведена на рисунку 1.

На рисунку 2 наведено залежність міцності сухих окатишів на роздавлювання від вмісту біопалив.

В більшості випадків додавання біопалив значно знижує показники міцності як сирих так і сухих окатишів. Найкращі показники міцності окатишів досягнуто при додавання лушпиння соняшнику.

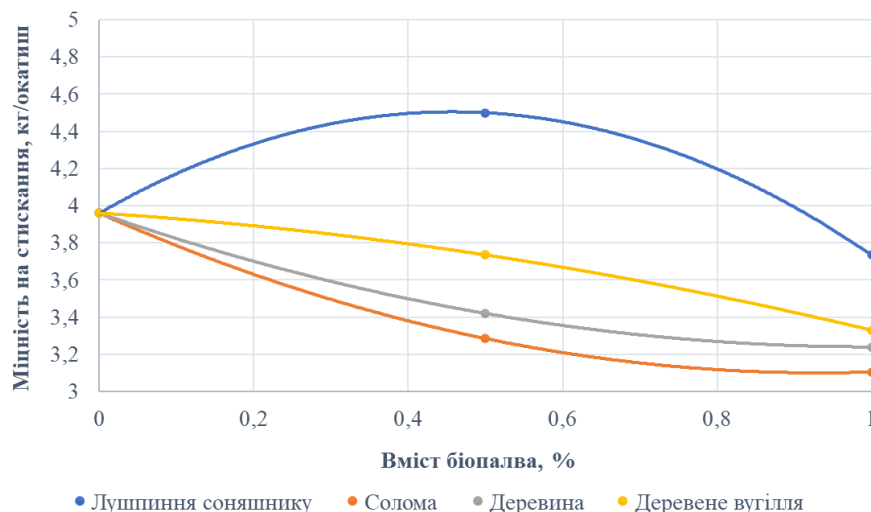
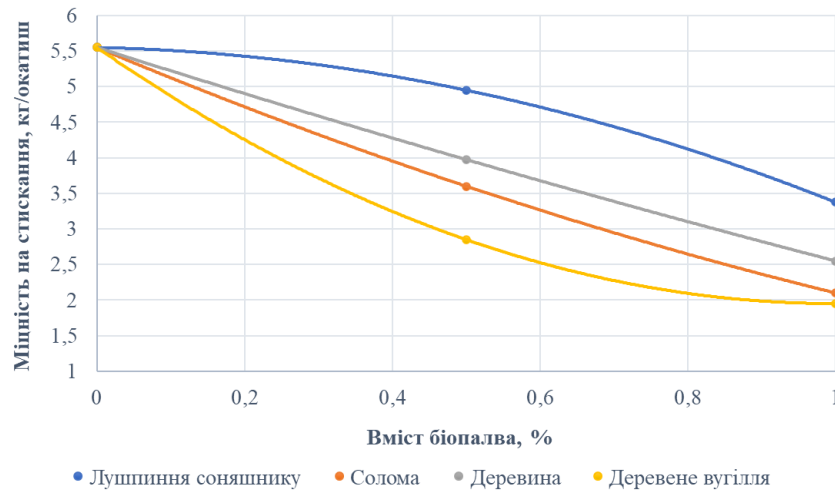


Рисунок 1. - Залежність міцності сирих окатишів на роздавлювання від вмісту біопалив



Рисунки 2. - Залежність міцності сухих окатишів на роздавлювання від вмісту біопалив

Введення в шихту лушпиння соняшнику в кількості до 0,5% залишає показники міцності сирих та сухих окатишів на базовому рівні.

#### Обговорення результатів

Отримані залежності відповідають особливостям біоматеріалів. Так зниження міцності окатишів при додаванні соломи можна пояснити тим, що пшенична солома має високу концентрацію гідрофобних восків на своїй поверхні. Ці воски утворюють гідрофобний шар, що складається з кутинового покриття та воскових частинок. Гідрофобні воски створюють межі між частинками соломи, що призводить до зниження міцності окатишів. Ці воскові шари перешкоджають утворенню міцних міжчасткових зв'язків, обмежуючи взаємодію через водневі зв'язки та утворення твердих містків [6]. Можна зробити припущення, що наявність кутинового покриття стало причиною значного зниження міцності сирих окатишів у порівнянні з іншими біопаливами, які не мають подібних воскових оболонки. Можливі шляхи подолання такого негативного ефекту є використання дрібніших фракцій, що дозволяє покращити її взаємодію з іншими компонентами суміші та збільшити площу контакту між частинками. Також можна застосовувати різні методи видалення гідрофобних восків із її поверхні.

Найкращі показники міцності сирих та сухих окатишів досягнуті при додаванні лушпиння соняшнику. При аналізі властивостей лушпиння соняшнику можна помітити, що лушпиння соняшнику має нижчий вміст лігніну порівняно з деревними видами біомаси, що пояснює різну ефективність застосування таких видів палив у якості компонента шихти окатишів. За даними [7], вміст лігніну у лушпинні соняшнику становить 15,5 %, в той час як вміст лігніну у групі голонасінних дерев, яка становить близько 80 % світового виробництва пиломатеріалів [8], сягає 40 % [9]. Лігнін забезпечує гідрофобну поверхню, яка дозволяє деревам транспортувати воду на висоту і сприяє механічній міцності, яка дозволяє підтримувати велику вагу дерева [10]. Також слід зауважити, що окрім того, що лігнін є гідрофобною

речовиною сам по собі, складна структура лігніну перешкоджають взаємодії гідрофільних хімікатів із целюлозою [10]. Слід зауважити, що у роботі де спостерігалось підвищення міцності на сирих окатишів з додаванням палива рослинного походження, паливо що додавалось, а саме рисове лушпиння, також має низький відсоток лігніну – 7 % [11].

Натомість вміст целюлози та геміцелюлози у лушпинні соняшнику становить 56,5 % і 28 % відповідно [11]. Целюлоза та геміцелюлоза містять значну кількість гідроксильних ОН груп. Гідроксильні групи є гідрофільними групами і можуть підвищувати водоутримувальну здатність сирих окатишів [12]. Це призводить до збільшення негативного заряду на монтморилоніті та поліпшення його дисперсії, а також зменшення розміру частинок бентоніту та збільшення площі поверхні [13].

Деревинне вугілля має основним компонентом свого складу вуглець, тому як і кокс та кам'яне вугілля, воно, у порівнянні з залізородними матеріалами, гірше змочується водою та знижує міцність сирих окатишів.

#### Висновки

1. В результаті проведення дослідження встановлені закономірності впливу додавання біопалив у шихту на міцність сирих та сухих залізородних окатишів.

2. Встановлено, що додавання пшеничної соломи значно знижує показники міцності сирих і сухих окатишів, що пов'язано з наявністю гідрофобних восків на її поверхні. Для можливості використання соломи при виробництві окатишів необхідна попередня її підготовка з видаленням воскових включень з поверхні.

3. Додавання лушпиння соняшнику у кількості до 0,5% забезпечує міцність сирих і сухих окатишів на допустимому рівні. Це забезпечується наявністю у складі лушпиння значної кількості целюлози та геміцелюлози і низьким вмістом лігніну. Наявність вказаних з'єднань інтенсифікують взаємодію поверхні часточок лушпиння соняшника з водою.

## Перелік посилань

1. Muslemeni H. et al. Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for 'green steel' products // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Т. 315. – С. 128127.
2. Kieush L. et al. A comprehensive review of secondary carbon bio-carriers for application in metallurgical processes: utilization of torrefied biomass in steel production // *Metals*. – 2022. – Т. 12. – №. 12. – С. 2005. <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/12/2005>
3. Sahu S. N., Biswal S. K. Alleviating dependency on fossil fuel by using cow-dung during iron ore pelletization; Assessment of pellet physical and metallurgical properties // *Powder technology*. – 2021. – Т. 381. – С. 401-411. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.027>
4. Praes G. E. et al. Assessment of iron ore pellets production using two charcoals with different content of materials volatile replacing partially anthracite fines // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Т. 8. – №. 1. – С. 1150-1160. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.09.003>
5. Törres Filho A. et al. Pyrolysis of chromium rich tanning industrial wastes and utilization of carbonized wastes in metallurgical process // *Waste management*. – 2016. – Т. 48. – С. 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.046>
6. Stelte, W., Clemons, C., Holm, J.K. et al. Fuel Pellets from Wheat Straw: The Effect of Lignin Glass Transition and Surface Waxes on Pelletizing Properties. *Bioenerg. Res.* 5, 450–458 (2012). <https://doi.org/10.1007/s12155-011-9169-8>
7. Vassilev S. V. et al. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass // *Fuel*. – 2012. – Т. 94. – С. 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.030>
8. Howard J. L. US Timber Production, Trade, Consumption, and Price Statistics, 1965-2005. – US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2007. – №. 637. [https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=zB2UzzGl1bsC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Timber+Production,+Trade,+Consumption,+and+Price+Statistics&ots=73Z3SShcCx&sig=doXe4Oj\\_JD0uEBIpeKZTbPXLBI4&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Timber%20Production%2C%20Trade%2C%20Consumption](https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=zB2UzzGl1bsC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Timber+Production,+Trade,+Consumption,+and+Price+Statistics&ots=73Z3SShcCx&sig=doXe4Oj_JD0uEBIpeKZTbPXLBI4&redir_esc=y#v=onepage&q=Timber%20Production%2C%20Trade%2C%20Consumption)
9. Novaes E. et al. Lignin and biomass: a negative correlation for wood formation and lignin content in trees // *Plant physiology*. – 2010. – Т. 154. – №. 2. – С. 555-561 DOI:10.1104/pp.110.161281
10. Hua Q. et al. Aqueous dispersions of esterified lignin particles for hydrophobic coatings // *Frontiers in Chemistry*. – 2019. – Т. 7. – С. 515. DOI:10.3389/fchem.2019.00515
11. Gupta P. K. et al. An update on overview of cellulose, its structure and applications // *Cellulose*. – 2019. – Т. 201. – №. 9. – С. 84727. DOI:10.5772/intechopen.84727
12. Ma Y. et al. A novel polymer-type binder to decrease bentonite dosage during iron ore pelletizing: Performance and mechanisms // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Т. 27. – С. 6900-6911. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.134>

## References

1. Muslemeni, H. et al. (2021). Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for 'green steel' products. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128127
2. Kieush, L. et al. (2022). A comprehensive review of secondary carbon bio-carriers for application in metallurgical processes: utilization of torrefied biomass in steel production. *Metals*, 12(12), 2005. <https://doi.org/10.3390/met12122005>
3. Sahu, S. N., & Biswal, S. K. (2021). Alleviating dependency on fossil fuel by using cow-dung during iron ore pelletization; Assessment of pellet physical and metallurgical properties. *Powder Technology*, 381, 401-411. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.027>
4. Praes, G. E. et al. (2019). Assessment of iron ore pellets production using two charcoals with different content of materials volatile replacing partially anthracite fines. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1150-1160. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.09.003>
5. Törres, F. A. et al. (2016). Pyrolysis of chromium rich tanning industrial wastes and utilization of carbonized wastes in metallurgical process. *Waste Management*, 48, 448-456
6. Stelte, W. et al. (2012). Fuel pellets from wheat straw: The effect of lignin glass transition and surface waxes on pelletizing properties. *Bioenergy Research*, 5, 450-458
7. Vassilev, S. V. et al. (2012). An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*, 94, 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.030>
8. Howard, J. L. (2007). US Timber Production, Trade, Consumption, and Price Statistics, 1965-2005. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2007. Research Paper FPL-RP-637. <https://surl.lu/ldrhua>
9. Novaes, E. et al. (2010). Lignin and biomass: a negative correlation for wood formation and lignin content in trees. *Plant physiology*, 154(2), 555-561. <https://doi.org/10.1104/pp.110.161281>
10. Hua, Q. et al. (2019). Aqueous dispersions of esterified lignin particles for hydrophobic coatings. *Frontiers in Chemistry*, 7, 515. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00515>
11. Gupta, P. K., Raghunath, S. S., Prasanna, D. V., Venkat, P., Shree, V., Chithanathan, C., Choudhary, S., Surender, K., & Geetha, K. (2019). An Update on Overview of Cellulose, Its Structure and Applications. In A. R. Pascual & M. E. E. Martín (Eds.), *Cellulose*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.84727>
12. Ma Y. et al. (2023). A novel polymer-type binder to decrease bentonite dosage during iron ore pelletizing: Performance and mechanisms. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 6900-6911. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.134>

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 09.02.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.05.2024