

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ННІ/факультет	Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра	Хімічних технологій та інженерії
Спеціальність	161 Хімічні технології та інженерія
Форма навчання	денна

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Скуратова Владислава Андрійовича

на тему Використання біопалива у виробництві коксу для
доменної плавки

науковий
керівник

к.т.н.


(підпис)

Шмельцер К.О.

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 14.01.2025 р. № 8

Завідувач кафедри


(підпис)


к.т.н., доцент

К.О. Шмельцер

ДУЕТ – 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
 НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
 Кафедра Хімічних технологій та інженерії

Рівень вищої освіти магістр
 Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри **Хімічних технологій та інженерії**

(підпис) доцент, к.т.н.
 Шмельцер К.О.
(посада, вчене звання, прізвище ініціали)
 « 15 » січня 2025 року

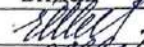
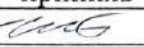


ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Скуратову Владиславу Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи магістра Використання біопалива у виробництві коксу для доменної плавки
 керівник кваліфікаційної роботи магістра Шмельцер Катерина Олегівна, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом вищого навчального закладу №796-ст від «21» листопада 2024 р.
2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 15.01.2025 р.
3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи магістра Техніко-економічні показники роботи вуглепідготовчого цеху КХВ ПАТ «АМКР»
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
 - 4.1 Аналітична частина: Аналіз вугільної сировинної бази на прикладі КХВ ПАТ «АМКР»; вимоги до якості коксу для доменної плавки; основні технологічні операції при підготовці вугілля для коксування; шляхи оптимізації технології вуглепідготовки. Актуальні аспекти використання біопалива в коксохімічному та металургійному виробництві
 - 4.2 Основна частина: Якісні характеристики біококсу. Дослідження технології отримання біококсу, переваги, недоліки. Вибір кількісної та якісної характеристики добавки біомаси при виробництві біококсу з металургійними властивостями. Порівняння виробництва біококсу та традиційного коксу з точки зору вуглецевого сліду
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Завданням графічний матеріал не передбачений

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Аналітична частина	Шмельцер К.О., зав.каф.		
2 Основна частина	Шмельцер К.О., зав.каф.		

7. Дата видачі завдання «15» листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	29.11.2024	
2.	Основна частина	20.12.2024	
3.	Оформлення пояснювальної записки	27.12.2024	
4.	Подання роботи до кафедри	15.01.2025	
5.	Захист роботи в ЕК	21.01.2025	

Здобувач


(підпис)

Скуратов В.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи


(підпис)

Шмельцер К.О.

(прізвище та ініціали)

*Примітка. Бланк друкується з обох сторін на одному аркуші.

АНОТАЦІЯ

Скуратов В.А. Використання біопалива у виробництві коксу для доменної плавки. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія». Державний університет економіки і технологій. Кривий Ріг, 2025.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці методу використання біомаси в якості компоненту вугільної шихти для синтезу біококсу, що задовольняє вимоги сучасної доменної плавки.

В роботі зазначено, що перспективними напрямками в металургії та коксохімічному виробництві є запровадження «зелених технологій», заміна викопного палива, що споживається в процесі виробництва чавуну, на біомасу здатна підтримувати як запаси вуглецю, необхідні для відновлення, так і енергію, необхідну для плавлення, і водночас призводить до зменшення кількості викидів парникових газів.

Проаналізовано перспективні напрямки використання деревного вугілля для різних галузей промисловості (у якості сорбенту, палива, відновника в металургійній промисловості, компонента вугільних шихт коксування, біокомпозитів, модифікації вибухових речовин тощо).

Показано, що використання сирової необробленої деревної біомаси як в металургійних процесах, так в технології виробництва металургійного коксу не є ефективним, а потребує її переробки перед використанням. Отже, існує потреба в ефективних технологіях переробки біомаси перед її використанням з метою зменшення вологості та отримання продуктів з високим вмістом вуглецю, низьким вмістом кисню для використання в якості відновлювачів.

Зазначено, що включення органічних добавок до коксівних шихт є вигідним з точки зору зменшення впливу на навколишнє середовище, що вимірюється вуглецевим слідом.

В кваліфікаційній роботі на основі досліджених літературних джерел та аналізу даних лабораторних та дослідно-промислових випробувань

запропоновано технологію використання термічнообробленої біомаси в якості компонента вугільних шихт для коксування.

Встановлено, що з досліджених зразків біококсів найкращі термохімічні властивості за показниками CSR та CRI демонструє біококс з суміші вугілля з паливом зі шкаралупи кокосового горіха у співвідношенні 95:5 мас. (CSR=58,6% та CRI =23,5%).

Надано рекомендації щодо кількісних характеристик та параметрів процесу внесення добавки біопалива (біомаси після карбонізації при 500 0C) у вугільні шихти для виробництва біококсу.

Ключові слова: вугілля, шихта, біококс, біомаса, вуглецевий слід, термохімічні характеристики біококсу.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Екологічні аспекти доменного виробництва	10
1.2 Основні технологічні показники вугільної сировини	14
1.3 Актуальні аспекти використання біопалива в коксохімічному та металургійному виробництві	23
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	37
2.1 Якісні характеристики біококсу	37
2.2 Дослідження технології отримання біококсу, переваги, недоліки	39
2.3 Вибір кількісної та якісної характеристики добавки біомаси при виробництві біококсу з металургійними властивостями	56
2.4 Порівняння виробництва біококсу та традиційного коксу з точки зору вуглецевого сліду	61
ВИСНОВКИ	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68

ВСТУП

Інтенсифікація роботи доменних печей обумовлює необхідність дотримання високої і постійної якості доменного коксу при виплавці чавуну. Значні коливання якості доменного коксу призводять до розладу ходу доменної печі, втрати продуктивності, перевитрати коксу, викликають необхідність коригування складу і властивостей доменних шихт для зниження негативного впливу цих коливань.

З огляду на викладене, в сучасних умовах, одним з найбільш ефективних способів поліпшення стабільності роботи доменних печей є забезпечення високого ступеня рівномірності в часі показників якості коксу [1].

Глобальна зміна клімату ініціювала величезні зусилля зі скорочення викидів вуглекислого газу. Європейський Союз (ЄС) став лідером у боротьбі зі зміною клімату, розробивши політику переходу до низьковуглецевої економіки [1-3].

Металургійна промисловість є одним з найбільших промислових джерел викидів вуглекислого газу, на який припадає 4-7% світових викидів [4] і аналогічний діапазон в Європі [5]. Для зменшення цього показника необхідним є як поступовий розвиток існуючих, так і впровадження нових, інноваційних технологій.

Використання біомаси у виробництві чавуну та сталі визнано одним з можливих рішень для скорочення викидів CO₂ від викопних джерел. Технологічні вимоги визначають обмеження щодо фізичних, хімічних і металургійних властивостей відновників, яким повинні відповідати відновники на основі біомаси. Тому розробка раціонального кваліфікованого використання біопалива у виробництві металургійного коксу є актуальним напрямком досліджень. Особлива увага повинна приділятися економічній та екологічній доцільності використання біомаси та порівнянню з іншими технологіями радикального скорочення викидів CO₂.

У світі, що стикається з проблемами зміни клімату, вкрай важливо визначити пріоритетність пошуку стійких технічних рішень.

Біококс, отриманий із суміші коксівного вугілля, збагаченого біомасою, має більший екологічний потенціал, ніж традиційний кокс, завдяки меншій частці невідновлюваної сировини. Сталеливарна та коксохімічна промисловість є значними джерелами викидів двоокису вуглецю. Комплексна оцінка впливу біодобавок на навколишнє середовище, враховуючи постачання сировини, процес коксування, застосування в металургії та утилізацію продуктів наприкінці терміну експлуатації свідчить, що використання добавок з біомаси призводить до зниження викидів парникових газів порівняно з виробництвом коксу без біодобавок.

Враховуючи нагальність вирішення проблеми глобального потепління та зростаючий попит на стійкі джерела енергії, розробка технологічних рішень по використанню біококсу як більш екологічно чистої альтернативи традиційному коксу є дуже перспективними.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Екологічні аспекти доменного виробництва

Металургійний завод — підприємство чорної металургії, що випускає чавун, сталь і здійснює їх прокат. Металургійний завод може бути з повним металургійним циклом (виробляє два основні види продукції: сталь, прокат) і з неповним циклом (виробляє один або обидва види цієї продукції) [6-9].

До основних цехів металургійного заводу з повним металургійним циклом належать доменний, сталеплавильний, кілька прокатних, до допоміжних цехів належать ремонтні й енергетичні, а також цех залізничного транспорту і автотранспортний цех або управління. На металургійному заводі може налічуватись до кількох десятків різноманітних цехів і служб. На деяких заводах є ще й агломераційна фабрика, цехи, де виготовляють вогнетриви, металеві вироби тощо. Транспортування продукції з металургійного заводу до споживачів здійснюється переважно залізничним транспортом, рідше — автотранспортом. Близько 90 % міжцехових перевезень на металургійному заводі здійснюється засобами залізничного транспорту.

Початковим виробничим процесом на заводі з повним металургійним циклом є доменний — виплавлення чавуну. В доменному цеху металургійного заводу розміщують кілька доменних печей. На доменних печах з металургійної сировини (обкотиші, агломерат, залізна руда) виплавляють переробний, ливарний та спеціальні чавуни, або феросплави. У виробництві переважають переробні чавуни. Отриманий у доменному цеху переробний чавун зливається у чавуновозні ковши і у рідкому стані транспортується або до розливних машин, де його зливають у спеціальні форми — мульди — з нього отримують невеличкі зливки (чушки), або транспортується у сталеплавильні цехи.

Побічним продуктом доменного процесу є шлак, який зливається у шлаковозні ковши і транспортується до шлакових відвалів, де проходить

незначну обробку, наприклад, грануляцію і потім може використовуватись, наприклад, для виготовлення будівельних матеріалів.

У сталеплавильних цехах у мартенівських печах або у конверторах чавун переробляють на сталь, яку розливають у сталеві зливки, що потім використовуються у прокатних цехах. На мартенівських печах окрім чавуну використовуюється також металобрухт.

Отримані сталеві зливки транспортують у обтискний цех, де нагріті зливки на обтискних (блюмінги або слябінги) і заготовочних станах прокатують у заготовки (блюми або сляби). Заготовки транспортують у прокатні цехи, де на сортових, листових, дротових і трубопрокатних станах з них роблять готові вироби — сортопрокат, листопрокат, трубопрокат тощо.

Кінцевим виробничим процесом на металургійному заводі є прокатування сталевих злиwkів — пластична деформація їх між обертовими валками прокатних станів у прокатних цехах.

Цей цикл в основному базується на використанні вугілля та коксу як джерела тепла та відновників, тоді як агломерат та окатиші використовуються як джерело заліза. Більшість сучасних доменних печей працюють на 70-80% агломерату, 20-30% окатишів і 10-20% кускової залізної руди [1]. У Швеції та Фінляндії доменні печі працюють майже на 100% окатишів. Ці металургійні заводи підтримуються брикетувальними установками для переробки дрібної фракції та вторинних матеріалів [7].

Виробництво однієї тонни гарячекатаного прокату супроводжується приблизно 1,8 тонни викидів CO_2 , як показано на рис. 1.1 [1]. Процеси виробництва чавуну: агломерація, коксування та доменна піч разом складають близько 90% цієї кількості. Використання енергії в доменній печі та пов'язані з цим викиди CO_2 є найвищими в процесі виплавки сталі від доменної печі до конвертера і становлять 12,31 ГДж/т чавуну та 1,22 т CO_2 /т чавуну, відповідно.

печі відновлене залізо одночасно плавиться, капає і збирається у вигляді рідкого чавуну. Рідкий чавун і розплавлений шлак потім відводяться при температурі близько 1500 °С.

Більшість сучасних доменних печей працюють сьогодні з витратою коксу в діапазоні 286-320 кг/т у.п. і вдуванням пиловугільного палива (ПВП) при 170-220 кг/т у.п. [1-3]. Інші матеріали, що впорскуються, включають природний газ і в деяких випадках коксовий газ, конвертерний газ і відходи пластмас [2]. Вприскування нафти в доменні печі широко практикувалося в минулому, але в даний час воно суттєво скоротилося через високу ціну. Типовий склад твердих та рідких відновників, що використовуються у доменній печі, наведено в таблиці 1.1.

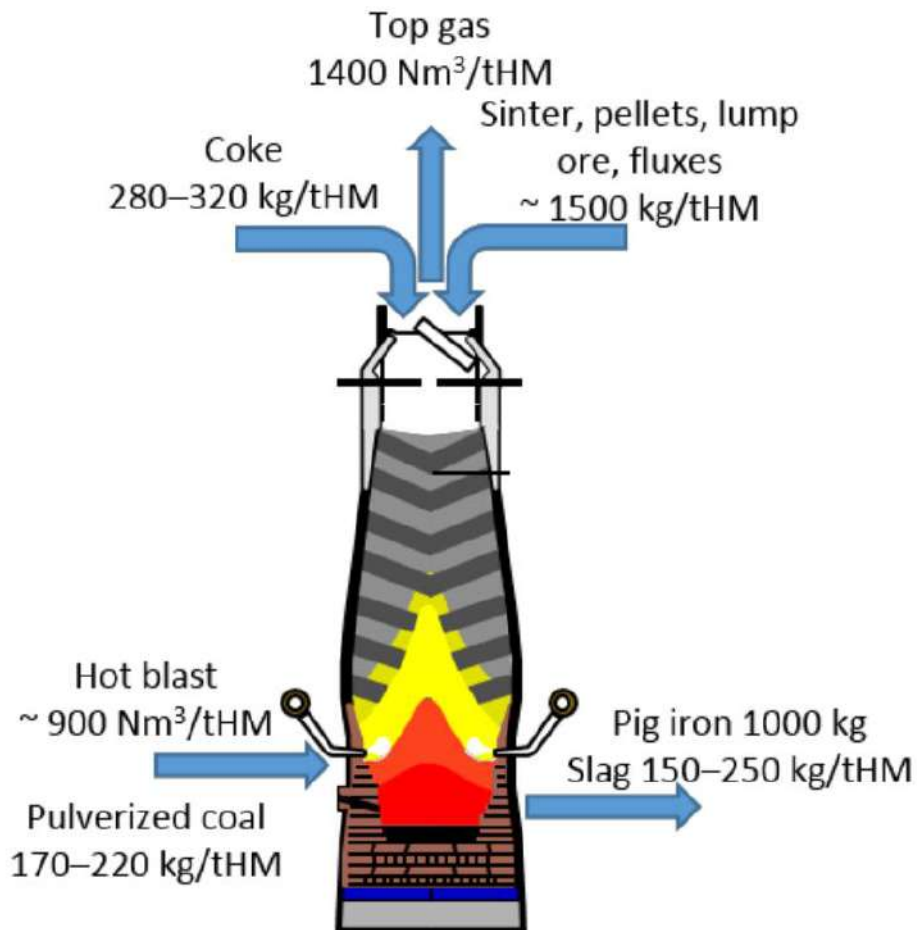


Рис.1.2. Доменна піч

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Вміст вуглецю та теплота згоряння відновників повинні бути високими для забезпечення ефективної роботи доменної печі. В доменній печі кокс є відновником елементів, які входять у склад чавуну (на кокс приходить більше 90% відновлювальної роботи); джерелом тепла (покриває потреби процесу в теплі на 80%); крім того забезпечує оптимальну газопроникність стовпа шихтових матеріалів для раціонального розподілення газового потоку по перетину печі.

Таблиця 1.1

Основні властивості відновників в доменній плавці

Показник	Кокс	Пиловугільне паливо	Пластикові відходи	Важкі оливи
Елементний аналіз, %				
C	87-92	80-85	61-61,7	84-88
H	0,4	3,5-5	14,0-18,2	10-10,5
O	0,5	3-8	9,1-17,8	-
N	0,4	1,5	0,5-1,5	-
S	0,6-0,8	0,4	<0,01	0,3-0,2
Технічний аналіз, %				
C_{fix}	87-92	57-76	6-7	-
V^{daf}	0,2-0,5	8-38	80-89	-
A	8-10	5-11	6-12	0,02

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

1.2 Основні технологічні показники вугільної сировини

Для характеристики твердих паливних копалин, що використовуються як сировина для термічної переробки, застосовують показники, кожний з яких кількісно описує певну ознаку, що відрізняє дане паливо від інших. По сукупності показників, що в цілому характеризують якість палива, судять про його можливість поведінки в умовах термічної переробки, придатності до

використання в певному технологічному процесі і прогнозують вихід, склад і властивості одержуваних продуктів залежно від умов процесу.

Вугілля, як сировина для коксування, повинне володіти властивостями при нагріванні без доступу повітря перетворюватися на кокс.

Технологічними показниками коксівного вугілля, що характеризують його якість є:

1) Технічний аналіз:

Вихід летких речовин (V^{daf}) – це продукти за винятком води, що виділяються з вугілля у вигляді газу і парів. Утворюються при розкладанні вугілля в умовах нагріву без доступу повітря. У сукупності зі спікливістю він визначає придатність вугілля для коксування. Саме цей показник є ключовим при складанні вугільної шихти та розгляді можливості заміщення вугілля в шихті. Вихід летких речовин є показником структурних особливостей складових частин вугілля, оскільки характеризує кількість термічно нестабільних атомних угруповань, які відщепляються при даній температурі. Визначення виходу летких речовин є необхідним для оцінки практичної цінності різних видів вугілля. Саме цей показник, на думку провідних науковців, є одним з основних, що дозволяють прогнозувати вихід коксу та хімічних продуктів коксування. Так в роботі [2] в ході проведених експериментальних дослідів визначено, що збільшення показника виходу летких речовин на 1% обумовлює зниження виходу валового коксу від маси сухої шихти на 0,8% (при коксуванні шихт з $V^{daf} = 28\div 30,5\%$ вихід сухого валового коксу змінювався з 81,3 до 79,2%).

Зольність (A^d) - вміст негорючого неорганічного матеріалу у вугіллі. Визначається як залишок, що утворюється при нагріванні вугілля в результаті згоряння горючої маси. Золюю називають твердий продукт повного окиснення і термохімічних перетворень мінеральної і органо-мінеральної частини. Зольність вугілля визначається спаленням в стандартних умовах наважки в муфельній печі при температурі 800-830 °C. Оскільки при озоленні твердих горючих копалин відбувається зміна хімічного складу мінеральної частини,

внаслідок її розкладення і окиснення, то зольність вугілля відрізняється від вмісту мінеральної частини вугілля. Тому необхідно визначати крім зольності і вміст в них мінеральних компонентів. Для цього проби вугілля обробляють розбавленою соляною кислотою, а потім плавиковою кислотою, в яких розчиняється значна частина мінеральних компонентів, що містяться в вугіллі. Випробування проводять за міжнародним стандартом ISO 602-74 [2]. З прикладу, приведенного в цьому стандарті, видно, що різниця між зольністю вугілля і масовою часткою мінеральних речовин у високозольному вугіллі може досягати 5% [6-9]. Зольність вугілля, як і вихід летких речовин, має значний вплив на вихід коксу. Це підтверджують в роботі [2] автори, які визначили, що збільшення показника A^d на 1% викликає зниження виходу металургійного коксу від маси сухої шихти на 2,8%.

Сірка (S) - вміст сірки у вугіллі. Міститься у вигляді сульфідів, сульфатів, органічних сполук і елементарної сірки. Визначається на сухий стан (S^d). Згідно ДСТУ 8606-72, і ДСТУ 2050-75 прийнято три методи визначення масової частки загальної сірки у вугіллі: гравіметричний, алкаліметричне і йодометричне титрування. У приладах фірми Лесо автоматично протягом 1-2 зміни визначається вміст сірки у вугіллі, коксі за допомогою детектора інфрачервоного випромінювання і електронного мікропроцесора для обробки сигналу детектора. Разовий аналіз триває 1-2 хв.

2) Петрографічний склад, що включає вміст окремих петрографічних компонентів (у відсотках) і показник відбиття вітриніту (R_0 , у відсотках);

3) Показники що характеризують ступінь метаморфізму, наприклад вміст вуглецю (C^{daf}), теплота згорання, перерахована на одиницю сухої беззольної маси, вихід летючих речовин (V^{daf}).

4) Показники, що характеризують хімічну структуру вугілля:

- елементний склад, вміст функціональних груп, який визначається хімічними або фізико-хімічними методами (наприклад, шляхом інфрачервоної спектроскопії), вміст різних фрагментів структури (подвійних зв'язків, ароматичний ядер);

- рентгеноструктурний аналіз (розміри кристалічних, упорядкованих формувань і ступінь впорядкованості структури та ін.).

5) Показники, що характеризують фізичні властивості палива:

- уявну щільність і дійсну (істинну), тобто щільність самого матеріалу речовини;
- пористість;
- механічну міцність.

б) Показники, що характеризують спікливість вугілля, (зміна об'єму вугільного завантаження, що нагрівається, – пластометрична усадка «х», мм і товщина пластичного шару – «у», мм), індекс Рогу, що характеризує фактично міцність спікання; спучування вугілля, текучість, яка їх характеризує, щільність контакту у стадії спікання.

Товщина пластичного шару для вугілля України характеризуються наступними значеннями, наведеними в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Товщина пластичного шару для вугілля України

№ п/п	Марка	Товщина пластичного шару (у мм)
1	ДГ	6-10
2	Г	10-16
3	Ж	16-25
4	К	13-20
5	ПС	7-12
6	Т	0-5

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [6-9]

7) Вихід первинних продуктів термічної деструкції палив (смола, газів, твердого залишку – напівкоксу), який визначається методом Фішера.

Споживча цінність та вартість вугілля, окрім показників якості (зольності, масової частки вологи, сірки, виходу летючих речовин) залежить від генетичних та технологічних властивостей. Загальною характеристикою цих властивостей являється марка вугілля, а в міжнародній - код. Марки вугілля України встановлюються по ДСТУ 3472-96 приведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Марки вугілля України відповідно ДСТУ 3472-96

Марка вугілля	Позначення марки	Класифікаційні показники			
		Середній показник відображення вітриніту $R_0, \%$	Вихід летючих речовин	Товщина пластичного шару $u, \text{мм}$	Індекс Рога $RI, \text{од.}$
Довгополум'яне газове	ДГ	0,50-0,80	35-48	від 6 до 9	-
Газове	Г	0,50-1,00	33-46	10-16**	-
Жирне	Ж	0,85-1,20	28-36	17-38	-
Коксове	К	1,21-1,60	18-28	13-28	-
Піснувато-спікливе	ПС	1,30-1,90	14-22	6-12	від 13
Піснувате	П	1,60-2,59	8-18***	менше 6	менше 13

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [2]

Шихта вугільна для коксування КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ СТІЛ КРИВИЙ РІГ» показникам якості шихта вугільна повинна відповідати нормам та вимогам, указаним у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Показники якості шихти вугільної відповідно вимогам

ТУ У 10.1-00190443-032

Найменування показника	Норма	Метод випробування
1 Зольність A^d , %, не більше	9,7	По ГОСТ 11022
2 Масова частка загальної сірки S_t^d , %, не більше	2,0	По ДСТУ 3528 або ГОСТ 2059
3 Масова частка загальної вологи W_t^r , %, не більше	13,0	По ГОСТ 11014 або ГОСТ 27314
4 Вихід летючих речовин V^{daf} , %, не більше	34,0	По ГОСТ 6382
5 Товщина пластичного шару y , мм, не менше	13,0	По ГОСТ 1186

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [2]

Аналіз різних джерел [2, 6-9] дозволяє визначити основні фактори, що мають значний вплив на вихід коксу та хімічних продуктів коксування (табл. 1.5):

Таблиця 1.5

**Чинники, що обумовлюють вихід коксу
та хімічних продуктів коксування**

Сировинні чинники (властивості вугільної шихти)	Технологічні чинники
1	2
1. Марочний склад та спікливості вугільної шихти	1. Режим роботи коксових печей
2. Петрографічні показники вугілля	2. Підвищення температури коксування сприяє: - збільшенню виходу коксового газу; аміаку, ціаністого водню; - зменшенню виходу смоли;

3. Вихід летких речовин (залежить від складу вугільної шихти, її якості та технологічних умов коксування)	3. Тиск в коксовій камері
4. Вологість вугільної шихти (чим вище вологість, тим більше вихід аміаку)	4. Швидкість коксування та кінцева температура впливають на додатковий вихід коксу «припік» (6-7 %)
5. Елементний склад вугілля	5. Величина підсклепінного простору
6. Ступінь окиснення вугілля	6. Величина разового завантаження вугільної шихти: - зі збільшенням завантаження зменшується величина підсклепінного простору, що, в свою чергу, призводить до зниження температури і часу перебування парогазових продуктів в зоні вторинного піролізу; - недовантаження печей призведе до зворотних наслідків - до поглиблення процесів піролізу.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [2, 6-9]

Фахівці вважають, що якісні характеристики коксу на 70-80% обумовленні впливом сировинних факторів.

В останні роки значно погіршилася якість коксу (різко зменшилася частка коксівного вугілля, збільшилася тривалість коксування), і зросла частка його в доменній шихті, що призвело до порушення (при стабільній якості коксу) закономірностей розвитку фізико-хімічних процесів плавки і різкого погіршення техніко-економічних показників роботи доменної печі. Це викликало необхідність уточнити вплив металургійних властивостей коксу на параметри роботи доменної печі в сформованих умовах.

Фахівці вважають, що вплив мають наступні властивості коксу: зольність, сірчистість, механічна міцність, стиранистість, вміст фракції + 80 мм, CSR та CRI. Для визначення того, які властивості мають найбільший вплив визначимо взаємозв'язок якості коксу (технічний аналіз та фізичні властивості) та техніко-економічних показників доменної плавки (табл. 1.6).

Таблиця 1.6

Вплив властивостей коксу на роботу доменної печі

Найменування показника	Визначення показника	Вплив показника на доменний процес	Величина показника
1	2	3	4
Технічний аналіз:			
Вологість коксу	W^x - характеризується вмістом води у товарній пробі.	Волога коксу є баластом, який надходить в доменну піч. Потребує додаткової витрати тепла на випаровування. Внаслідок цього витрата коксу зростає, а продуктивність доменної печі зменшується.	2-4% для коксу мокрого гасіння
Зольність коксу	A^d - зольність коксу характеризує вміст в ньому мінеральних речовин, баластних або шкідливих для доменного процесу.	Кожен відсоток збільшення золи в коксі знижує продуктивність печі від 1,0 до 1,8% і збільшує витрату коксу від 1,2 до 2,0%.	10-13%
Сірчистість	S_k^d - характеризується вмістом у ньому суми всіх сірчистих сполук у перерахунку на сірку	Призводить до червоноламкості металевих виробів. Збільшення сірчистості коксу на 0,1% призводить до зростання його витрати на 0,3% та до зменшення на таку ж величину продуктивності домни. Крім того, погіршується якість чавуну.	0,4-0,8%
Вихід легких речовин	V^{daf} - характеризує його ступінь готовності, тобто завершеності процесів коксоутворення.	Кокс з меншими значеннями виходу легких речовин має кращі технологічні властивості	0,8-1,2%
Вміст фосфору	У процесі коксування фосфор практично повністю переходить із вугілля в кокс, а в процесі доменної плавки - з коксу в чавун	Фосфор знижує міцність металу при низьких температурах, тобто робить його холодноламким	Не більше 0,015%
Фізичні та фізико-хімічні властивості коксу			
Гранулометричний склад коксу	- це розподіл його кусків по класах крупності, виражене у відсотках до маси вихідної проби	Фракція + 80 небажана. Збільшення фракції +80 на 1% призводить до збільшення питомої витрати коксу на 1,2%.	
CSR	Гаряча міцність (CSR) - визначається руйнуванням (стиранням) ослабленого газифікацією куска коксу	Високий показник CSR зменшує витрату коксу в доменній печі за рахунок появи можливості подавати в домну більшу кількість дуття з більш високою температурою	

Продовження таблиці 1.6

Фізичні та фізико-хімічні властивості коксу			
CRI	Реакційна здатність характеризує швидкість протікання процесу взаємодії коксу з газами	Чим менше реакційна здатність коксу, тим нижче його витрата на пряме відновлення	не вище 35%
M ₂₅	Механічна міцність - достатній опір коксу подрібнюючим зусиллям за показниками M ₂₅ дає можливість більшій частині коксу досягти, не руйнуючись, зони фурм, збільшити ступінь процесів непрямого відновлення	Підвищення міцності по індексу M ₂₅ на 1% викликає зниження витрати коксу 0,6%.	>88-90
M ₁₀	Підвищена стиранність коксу за показником M ₁₀ призводить до збільшення кількості дрібних зерен в засипу доменної шихти	Зменшення стиранності по індексі M ₁₀ на 1% викликає зниження витрати коксу 2,8%.	<6-7

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [6-9]

В роботі [2] автори, шляхом обробки великої кількості виробничих даних, також визначили вплив показників якості доменного коксу на параметри доменної печі (табл. 1.7). За результатами теоретичного аналізу та експериментальних даних показано, що погіршення якості коксу в умовах доменної плавки негативно впливає на техніко-економічні показники доменної плавки.

Таблиця 1.7

**Вплив показників якості коксу
на техніко-економічні показники доменної печі**

Фактори та одиниці виміру	Витрата коксу, %	Продуктивність доменної печі, %
1. Зменшення зольності на 1 %	-1,3	+1,3
2. Зменшення вмісту сірки в коксі на 0,1 %	-0,3	+0,3
3. Підвищення міцності коксу (M ₂₅) на 1 %	-0,6	+0,6
4. Зменшення стиранності (M ₁₀) на 1 %	-2,8	+2,8
5. Зменшення вмісту в коксі фракції +80 мм на 1 %	-0,2	+0,2
6. Збільшення показника гарячої міцності CSR на 1 %	-0,25	+0,63

Таким чином, якість доменного коксу значною мірою визначає роботу доменної печі, що впливає як на техніко-економічні показники доменної

плавки, так і на якість продукту доменної плавки – чавуну, при погіршенні фізико-механічних властивостей коксу ступінь їх впливу на основні техніко-економічні показники роботи доменної печі зростає (більш різко підвищується питома витрата коксу на виплавку чавуну і знижується продуктивність печі).

Використання викопного палива у виробництві енергії, промислових процесах та побуті є однією з основних причин прискореного глобального потепління та зміни клімату. При спалюванні викопних видів палива вивільняється вуглець, який накопичувався і зберігався в земній корі протягом тисяч і мільйонів років вивільняється в атмосферу у вигляді вуглекислого газу. Екосистема Землі не здатна поглинати цей додатковий вуглець, що призводить до чистого збільшення концентрації CO_2 в атмосфері. Перехід від використання викопних видів палива до використання палива на основі біомаси дозволяє уникнути чистого збільшення прямих викидів CO_2 , оскільки рослини будуть вловлювати CO_2 з атмосфери під час свого росту [5].

Для забезпечення сталого розвитку, що відповідає кліматичним цілям і цінам на енергоносії, підприємства чорної металургії повинні підвищувати свою енергоефективність і сприяти впровадженню екологічно чистих процесів. Було розроблено численні стратегії для заміни нестійких викопних видів палива на відновлювані види палива. Додавання біококсу до коксівного вугілля є чудовим рішенням обох проблем завдяки його відновлюваності та вуглецевій нейтральності, що забезпечує нульові викиди CO_2 .

1.3 Актуальні аспекти використання біопалива в коксохімічному та металургійному виробництві

Деревне вугілля (біовугілля) – тверде паливо, яке отримують з деревини (або біомаси) при нагріванні її до високих температур без доступу повітря або з дуже обмеженим доступом повітря. Виготовляється з непридатної для будівництва та механічної обробки деревної сировини листвяних порід, біомаси. Вихід деревного вугілля від маси абсолютно сухої деревини складає

35-40%. В промисловості деревне вугілля виробляється в ретортах або печах, в кустарному виробництві деревне вугілля випалюється в кучах (вогнищах). Теплота згорання залежить від кінцевої температури нагрівання та способу отримання: для пічного вугілля 6500 – 7400 ккал/кг, для випаленого в кучах 8100 ккал/кг. Деревне вугілля містить 65 – 70% нелеткого вуглецю, 30% летких речовин і менше 5% золи [6]. Зола деревного вугілля, отримана з біомаси, містить переважно окиди кремнію (SiO_2), алюмінію (Al_2O_3), заліза (Fe_2O_3), кальцію (CaO), магнію (MgO), натрію (Na_2O), калію (K_2O) і фосфору (P_2O_5).

В 19 столітті деревне вугілля було основним видом палива в металургійній промисловості. Приблизно з 1840 року американська металургійна промисловість почала переходити від деревного вугілля до вугілля чи коксу, але виробництво чавуну при використанні деревного вугілля фактично збільшувалося до 1890 року і залишалося високим протягом усього дев'ятнадцятого століття. Зменшення пропорційної частки деревного вугілля у виробництві чавуну відбулося через зміну технології (більші доменні печі зі збільшеною висотою та деревне вугілля не могли підтримувати більшу розкривну породу) та ціни (нові виробничі центри вимагали величезної кількості палива, яку місцеві ліси не могли витримати, що призвело до більшій витрати на транспортування палива).

Існує декілька джерел біомаси для виробництва енергії. Всесвітня біоенергетична асоціація класифікувала джерела біомаси для виробництва енергії за трьома різними основними секторами, а саме: сільське господарство, лісове господарство та органічні відходи. Очікується, що глобальний потенціал біомаси збільшиться в наступні десятиліття (таблиця 1.8). Глобальний техніко-економічний потенціал біомаси у 2035 році прогнозується в діапазоні 134-166 ЕДж, що в 2,4-3,0 рази більше, ніж використання біомаси як енергетичного ресурсу у виробництві енергії у 2012 році. Біомаса з сільського господарства представляє найбільшу можливість для збільшення використання біомаси.

Таблиця 1.8

**Глобальний техніко-економічний потенціал
біомаси у 2012 та 2035 роках**

Галузь	Підгалузь	Сучасний стан	Діапазон (2035)	Середнє (2035)
Сільське господарство	Спеціалізовані культури - основна продукція	3,5	26-34	30
	Побічна продукція	2,1	30-38	34
	Всього по сільському господарству	5,6	56-72	64
Лісництво		48,9	72-84	78
Органічні відходи		1,7	6-10	8
Всього		56,2	134-166	150

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Виробництво чавуну вимагає використання вуглецевих і водневмісних відновників, таких як кокс, вугілля та природний газ. Якість коксу є одним із головних параметрів, що визначають хід та результати доменної плавки. Враховуючи, що кокс являється найбільш дорогою складовою шихти для виплавки чавуну, то задача зменшення його витрати завжди актуальна. Вирішення її можливе при заміщенні коксу менш дорогими енергоносіями [6].

В останні роки знову виник інтерес до застосування деревного вугілля, отриманого з біомаси, в доменній плавці, що обумовлено як екологічними, так і економічними аспектами.

Серед різноманітних запропонованих стратегій використання біомаси потенційно здатне значно знизити викиди парникових газів у системі виробництва коксу й доменної печі в інтегрованому процесі виробництва сталі [7]. До того ж в дослідженні зазначається, що інтеграція біомаси в процес виробництва чавуну може знизити викиди вуглекислого газу на 31–57% [8].

Спалювання вуглецевого палива вивільняє в атмосферу CO_2 , парниковий газ. З точки зору викидів парникових газів, вирішальна різниця між викопним паливом і біомасою полягає в часовому проміжку, протягом якого виділяється CO_2 . Оскільки природний процес, який перетворює CO_2 з атмосфери на викопне паливо, займає мільйони років, CO_2 , що виділяється при згорянні цього типу палива, вважається «новим» парниковим газом. Таким чином, це сприяє збільшенню концентрації парникових газів в атмосфері. З іншого боку, спалювання біомаси вивільняє CO_2 , який врівноважується CO_2 , уловленим під час її зростання. Таким чином, аргумент полягає в тому, що біомаса вважається «нейтральною» щодо парникових газів [9,10]. За даними [11] заміна викопного палива, що споживається в процесі виробництва чавуну, на біомасу здатна підтримувати як запаси вуглецю, необхідні для відновлення, так і енергію, необхідну для плавлення, і водночас призводить до зменшення кількості викидів парникових газів.

Необроблена біомаса, будь то з дерев, трав чи водоростей, не може бути безпосередньо замінена традиційним викопним паливом, що використовується у виробництві чавуну, через високий вміст вологи, низький вміст вуглецю та низьку теплотворну здатність [12]. Сучасні процеси термохімічної конверсії можуть бути використані для виробництва твердих, рідких і газоподібних біовідновників із біомаси. Піроліз необхідний для отримання багатого вуглецем вугілля. Деревина - форма біомаси, яка найбільш часто використовується для виробництва палива. Так, випечена деревина виготовляється при піролізі до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, напіввугілля отримують при приблизно $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, різні види деревного вугілля при нагріванні сировини від 500 до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. До сировини придатної для отримання твердих відновників для

виробництва чавуну та сталі, відносять солому, відходи лісопильних заводів, рослинні породи деревини та лісові залишки, такі як рубки тріски, пні та коріння [13].

Верхнє (гравітаційне) завантаження біовугілля разом з шихтовими матеріалами безпосередньо в доменну піч ускладнене через його низьку механічну міцність. Практикується лише на малих доменних печах у Бразилії (внутрішній об'єм до 700 м³) та не може бути запроваджено на печах середнього та великого об'ємів [14].

Ефективне використання деревного вугілля в металургійній технології може бути реалізовано за допомогою наступних варіантів: залучення в якості палива при агломерації залізних руд або компоненту для отримання вуглецевих композитних агломератів (ССА) [15,16]; як складової брикетів [17]; використання біовугілля як компоненту вугільних шихт для виробництва біококсу; інжекція в нижню частину доменної печі, що дозволяє замінити значну частину пиловугільного палива [18-20].

Агломерація металевих руд та концентратів полягає в їх огрудкуванні шляхом спікання, яке відбувається завдяки спаленню палива в попередньо огрудкованому матеріалі - агломераційній шихті. Коксовий дрібняк, частка якого складає 3-5% від загальної маси аглошихти, повністю може бути частково або повністю замінений на паливо з біомаси (деревина різних порід у вигляді гранул та брикетів, або відходи сільськогосподарського виробництва, наприклад, переробки соняшника, соломи, волоського горіха, кукурудзи, рисова і гречана лузга, листя дерев, лушпиння соняшника) [21-24]. Додавання піролізованого біопалива в агломераційну шихту призводить до покращення газопроникності шару, що агломерується. Частки біоматеріалів розташовуються поміж гранул шихти достатньо рівномірно та збільшують пористість шару. Також при використанні піролізованої біомаси спостерігається вища вертикальна швидкість спікання, ніж при застосуванні виключно коксового дрібняку. Але біопаливо характеризується вищою реакційною здатністю, ніж коксовий дрібняк, що може зменшувати вихід та

негативно впливати на якість агломерату. За даними [25] використання крупнозернового або формованого біопалива, зменшує площу контакту, ускладнює дифузію O_2 та, як наслідок, поліпшує якість спікання.

Введення в доменну піч менш дорогого та дефіцитного твердого біопалива у складі огрудкованого залізородного матеріалу може бути дуже перспективним за умови збереження або поліпшення металургійних характеристик цього матеріалу. Перевагою такого матеріалу є те, що в процесі його термозміцнення він попередньо частково відновлюється зсередини за рахунок газифікації закатаного всередину вуглецю твердого палива, а потім при плавці відновлюється одночасно з поверхні відновними газами доменної печі і з центру шматка за рахунок газифікації залишкового вуглецю, що прискорює швидкість відновлення всього шматка і, відповідно, продуктивність доменної печі.

За даними досліджень [26] лігнін біомаси може бути використаний як сполучна речовина та відновник у складі брикетів для доменної плавки. Традиційні брикети складаються з різних залишків, що містять оксид заліза, для надання необхідної механічної міцності як сполучна речовина використовується цемент. Встановлено, що часткова заміна до 25 % цементу на лігнін забезпечує збільшення вмісту вуглецю та отримання механічно міцних брикетів.

Авторами роботи [27] досліджено можливість виробництва коксу із додаванням в якості компонентів шихти деревного вугілля та крафтового лігніту. Так, біококси готували шляхом додавання деревного вугілля, виробленого з молодого обрізаного стебла сосни, та крафт-лігніну, отриманого у процесі виробництва целюлози, до вугілля в кількості 2,5; 5,0; 7,5 та 10,0 мас. %. Бітумінозне коксівне вугілля використовувалося як основний спікливий компонент шихти, характеризувалося виходом летких речовин 23,1 мас.% на суху масу, максимальна текучість по Гізелеру становила 545 ddrpm і загальна волога – 10,9 мас.%. Коксівне та деревне вугілля дробили щоквою дробаркою і подрібнювали за допомогою кільцевої

шліфувальної машини. Після подрібнення, зразки просівали до бажаного розміру частинок. Розмір частинок коксівного вугілля був таким: 70 % мас. просівали до розміру 0,5–1,0 мм, а 30 % мас. – до розміру менше 0,5 мм. Найменший розмір частинок деревного вугілля становив 45–90 мкм, а найбільший – 1,0–2,0 мм. При цьому швидкість нагрівання була на рівні 3,5 °C /хв, кінцева температура процесу 1200 °C.

Порівняння характеристик складових шихти показало наступне: вміст вуглецю в деревному вугіллі значно вище, ніж у коксівному вугіллі. Зольність деревного вугілля і крафт-лігніну низька порівняно з коксівним вугіллям. Необхідно зазначити, що хімічний склад золи вугілля і деревного вугілля істотно відрізняється. Вугільна зола має високу частку кислотних компонентів SiO_2 та Al_2O_3 , тоді як зола деревного вугілля має високу частку лужних компоненти CaO і MgO . Хімічний склад золи біомаси значною мірою залежить від типу біомаси, її походження та забруднювачів від обробки. Більша частка лугів (Na_2O , K_2O) міститься у вугільній золі.

В дослідженні [28] для оцінки холодної міцності біококсів використовували випробування на стиснення за допомогою термомеханічного симулятора Gleeble 3800 [29].

Додавання деревного вугілля не знижує міцність біококсу порівняно з еталонними коксами. Висока міцність біококсів була отримана при додаванні деревного вугілля в кількості 5 % з розміром частинок 125–250 мкм. Результати оптичної мікроскопії показали, що м'яка коксівна маса в деяких випадках проникала всередину клітини деревного вугілля та запікалась там, таким чином сприяючи розвитку холодної міцності. За рахунок збільшення насипної щільності вугільної суміші від 634 до 750 $\text{кг}/\text{м}^3$ значно зросла і міцність біококсів.

Треба зазначити, що біококси з додаванням деревного вугілля показали вищу реакційну здатність порівняно з контрольними коксами.

Аналогічні висновки наведені в роботі [30]. Так, зазначається, що використання будь-якого виду матеріалу, отриманого з біомаси (відходи

лісового і сільського господарства, целюлозно-паперової промисловості), у вугільній суміші послаблює розвиток текучості під час пластичної фази, підвищує реакційну здатність коксу, а також може негативно впливати на його післяреакційну міцність [31]. Але це не обов'язково негативно для доменного процесу, так як використання більш високореакційного вуглецевого матеріалу знижує температуру теплової резервної зони і посилює відновлення оксиду заліза в металеве залізо, що знижує витрату відновників.

Вважається, що причиною підвищення реакційної здатності біококсу є більша площа поверхні і концентрація функціональних груп кисню, які обмежують розвиток текучості шляхом поглинання частини летких речовин вугілля та утворення перехресних зв'язків з киснем. Таким чином, ймовірно, найважливішим є контроль площі поверхні та вмісту кисню в складових біомаси, яка змішується з коксівним вугіллям [32].

Mathieson та ін. [33] узагальнили критерії якості деревного вугілля та показали, що для кожного застосування потрібні різні його властивості. Наприклад, деревне вугілля для спікання палива повинно мати низький вміст летючих речовин (<3%), високу щільність, низьку реакційну здатність та крупність в діапазоні 0,3–3 мм. Деревне вугілля для інжекції в доменну піч має характеризуватися більш високим виходом летких (10–20%), низьким вмістом золи та лугів.

Теоретично можна отримати вдосконалене деревне вугілля з біомаси, хімічно та фізично подібне до вугілля та коксу, але вартість такого палива не буде конкурентоспроможною. На практиці відносно легко досягти хімічної подібності, але отримання необхідного рівня фізичних властивостей, таких як щільність, механічна міцність і реакційна здатність, вимагає надмірної кількості обробки та недосяжне за розумну вартість.

Отже, необхідним є дослідження та вдосконалення методів переробки біомаси у деревне вугілля, що дасть можливість прогнозувати, впливати на його фізичні властивості, структуру та отримувати паливо встановленим набором характеристик. Майбутні дослідження повинні також зосередитися

на розумінні впливу компонентів біомаси лігніну, целюлози та геміцелюлози на пластичність вугілля та якість коксу.

Досвід використання деревного вугілля (CC) для інжекції на доменній печі Arcelor Mittal в Монлевадо, з продуктивністю приблизно 3000 тон чавуну/добу наведено в роботі [34]. Деревне вугілля CC та пиловугільне паливо подрібнювали окремо через суттєву різницю індексу розмолотості за Хардгровим (HGI). Природний газ подавали разом із подрібненим деревним вугіллям (CC) та пиловугільним паливом (ПВП), при цьому загальна швидкість інжекції становила до 165 кг/tons of hot metal (kg/tHM).

Успішні результати зазначеної технології використання деревного вугілля для заміни частини ПВП були отримані в рамках національного проекту в SSAB в Окселёсунді, Швеція. Так, показано, що добавка деревного вугілля (CC) можлива в кількості 10%. Встановлено, що внаслідок схожості хімічних та термічних властивостей деревного вугілля (CC) та пиловугільного палива (PC) можливим є заміщення у співвідношенні 1:1. З даними розрахунків [35] витрату коксу в ДП можна знизити на 23–30 кг/т чавуну (ЧМ), використовуючи деревне вугілля як інжектор для фурм, і на 4,5–9 кг/т чавуну, завантажуючи 5–10% деревного вугілля від кількості шихтових рудних матеріалів.

Заслуговує уваги технологія використання деревного вугілля для отримання паливних суспензій для дизельних двигунів. Перевагою суспензій з використанням деревного вугілля є суттєво нижча зольність, у порівнянні з вугіллям, що спричиняє набагато менший рівень абразивного зносу. У дослідженні [36] в якості сировини для карбонізації було обрано тополю жовту (*Liriodendron tulipifera*). Для отримання деревного вугілля з високою теплою згорання, щільністю та низьким вмістом кисню сировину піддавали піролізу при 700 °С. Потім деревне вугілля було оброблено за допомогою багатоетапного процесу помелу, в результаті якого отримали мікронізовані частинки палива. Так, 90% об'єму зразка складалось з частинок розміром менше 50 мкм. Аналіз фізичних і хімічних властивостей частинок деревного

вугілля показав, що абсолютна щільність частинок коливається в межах від 1525 кг/м^3 до 1667 кг/м^3 , а вища теплотворна здатність знаходиться в інтервалі від $52,0144 \text{ МДж/м}^3$ до $60,5604 \text{ МДж/м}^3$, що набагато перевищують якісні характеристики у дизельного палива № 2, яке має середню густину 851 кг/м^3 і вищу теплотворну здатність (ННВ) $38\,362,5 \text{ МДж/м}^3$. Паливна суспензія з використанням деревного вугілля може бути придатною для використання в середньошвидкісному та низькошвидкісному дизельних двигунах.

Останнім часом увага науковців зосереджена також на дослідженнях у галузі композитних матеріалів із застосуванням біомаси, яка є відновлювальним ресурсом, що забезпечує екологічну та економічну ефективність її використання. Це допомагає зменшити використання полімерів, які отримані із нафтопродуктів та забруднюють навколишнє середовище. Суттєвою перевагою біокомпозитів, що містять в складі продукти переробки вторинної сировини рослинного походження, є їх висока здатність розкладатися на безпечні компоненти порівняно з класичними полімерами, які потребують застосування спеціальних технологій переробки [36].

Дослідження [37] було спрямоване на оцінку дрібних частинок деревного вугілля в якості потенційних зміцнюючих (армуючих) агентів у біокомпозитах. В роботі було досліджено дрібні фракції деревного вугілля, отримані шляхом піролізу біомаси при 400 , 600 і $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Найкращий результат в якості наповнювача полімерної матриці отримали при використанні деревного вугілля, отриманого при $800 \text{ }^\circ\text{C}$, завдяки його високій пористості ($81,08\%$), вмісту фіксованого вуглецю ($96,77\%$) і гідрофобності, механічній стійкості. Встановлено, що зміна температури піролізу дрібних фракцій деревного вугілля суттєво вплинула на властивості при згині, модуль пружності та міцність виготовлених біокомпозитів. Так, зазначені характеристики закономірно зростали із збільшенням температури піролізу. Міцність на розрив підготовлених зразків, отриманих при 400 , 600 і $800 \text{ }^\circ\text{C}$, становила $15,8 \text{ МПа}$, 16 МПа і $23,5 \text{ МПа}$ відповідно. Зазначені властивості деревного вугілля дозволяють поліпшити його взаємодію та підвищити

сумісність з полімерними матрицями, можуть зменшити витрати, залежність від викопних джерел (пластику та інших нафтопродуктів) і, отже, зменшити викиди парникових газів.

Враховуючи особливості застосування біокомпозитів в різних галузях промисловості, виникла необхідність дослідження впливу на їх якісні характеристики УФ-опромінювання, яке може призвести до таких негативних наслідків як зміна кольору, механічних властивостей та рельєфу поверхні, втрата маси. Отже, розуміння того, як деревне вугілля впливає на опір біокомпозиту до УФ-деградації має першочергове значення, особливо коли ці матеріали призначені для зовнішнього застосування. Так, в роботі [38] наведено результати оцінки впливу УФ-опромінення на характеристики деревного вугілля в залежності від температури піролізу, при якій його було отримано. В якості біосировини використовували *Eucalyptus saligna*. Зразки цієї біомаси були подрібнені та попередньо висушені у сушильній шафі при 103 ± 2 °C. Зразки композиту містили добавку деревного вугілля у кількості 30 %. Піроліз проводився в муфельній печі при початковій температурі 30 °C та швидкості нагріву 10 °C/хв до досягнення кінцевої температури 400, 600 і 800 °C. Отримані зразки біокомпозиту піддавали УФ-опроміненню протягом 15 днів. Випробування проводилися в середовищі в контрольованих умовах з постійною температурою 22 °C і відносною вологістю 44%. Встановлено, що деревне вугілля, отримане при температурі 800 °C демонструє чудовий потенціал для біоармування в полімерних матрицях, за рахунок високої пористості (81,08%) і гідрофобних властивостей. Результати також показали зростання міцності на розрив на 69,24%, 68,98% і 54,38% після впливу УФ-опромінення для зразків біокомпозиту з додаванням деревного вугілля, отриманого при температурах 400, 600 і 800 °C відповідно. Отже, встановлено, що вуглецевий наповнювач є актуальним компонентом полімерних біокомпозитів завдяки своїм властивостям і його використання є вигідним для отримання більш структурно стійкого матеріалу, позитивно впливає на механічні властивості та стійкість біокомпозитів до факторів навколишнього

середовища. Захисний ефект біовуглецю можна пояснити антиоксидантною дією, за рахунок зв'язування вільних радикалів, які утворились при каталітичному розкладанні під впливом факторів навколишнього середовища.

Аналогічні висновки щодо використання дрібних фракцій деревного вугілля завдяки їх стійкості до УФ-випромінювання у біокомпозитах, що призводить до покращення їх механічних властивостей презентує робота [39]. Так, досліджували вплив добавки вугільного дрібняку до полімерної матриці біокомпозитів у кількості 10%, 20%, 30%. Полімерний композит без додавання вугільної дрібнодисперсної фракції показав суттєве зниження міцності після впливу УФ-випромінювання порівняно зі зразками, які містили 10 і 20% деревного вугілля. Отже, збільшення певної кількості вугільного дрібняку мінімізує втрату стійкості матеріалу та його фотодеградацію під впливом випромінювання. Поліпшення механічних характеристик показали зразки із вмістом 20% вугільного дрібняку, що може бути пов'язано з тим, що частинки наповнювача перешкоджають ковзанню полімерних ланцюгів матриці. Однак при додаванні більшої кількості наповнювача, наприклад, 30%, механічні характеристики погіршуються. Таке явище можна пояснити слабкою взаємодією полімер-волокно, пустотами та слабкою дисперсністю волокон у матриці та впливом таких факторів, як розмір, форма і тип наповнювача [40].

Біопаливо (PKSBc), отримане з відходів виробництва пальмової олії, може використовуватися в якості стійкого екологічно чистого біонаповнювача у гумових композитах та стати альтернативою канцерогенному технічному вуглецю (CB), який широко застосовується в якості армуючого наповнювача у гумовій промисловості. Автори розробили рецептури композитів, до складу яких входив карбоксильований нітрil-бутадієновий каучук (XNBR) та наповнювачі технічних вуглець/біопаливо у певних співвідношеннях. В роботі досліджували синергетичний ефект при використанні технічного вуглецю та біопалива в якості наповнювачей гуми, вивчали реологічні та фізико-механічні властивості кінцевого композиту. При додаванні 35 phr (г/100 г каучуку)

біопалива твердість композиту зросла приблизно на 18,8%, при додаванні суміші наповнювачів технічний вуглець/біопаливо у співвідношенні 30/5 phr, твердість композиту збільшилася на 31,6% у порівнянні з контрольним зразком. Висока твердість композиту карбоксильованого нітрил-бутадієновий каучуку (XNBR) зі змішаним наповнювачем СВ/PKSВс у співвідношенні 30/5 phr, пояснюється високою щільністю зшивання композиту. Пори на поверхні біопалива сприяють створенню 3D-мережі, яка робить композит жорстким. Так, результатами роботи доведено ефективність використання суміші технічного вуглецю з біопаливом для поліпшення експлуатаційних характеристик гумової композиції, та можливість зменшення екологічного навантаження за рахунок утилізації відходів виробництва пальмової олії та зменшення використання канцерогенного технічного вуглецю [41].

Автори роботи [42] досліджували можливість підвищення термічної стабільності та поліпшення балістичних властивостей бджолиного воску при введенні добавок етиленвінілового ацетату (EVA) і активованого вугілля (АС). Бджолиний віск ($C_{46}H_{92}O$) - речовина природного походження, яка може бути використана як тверде паливо для гібридних ракетних установок, і як заміна парафінового палива в гібридних ракетах. Бджолиний віск горить ефективніше, ніж парафін, завдяки молекулі кисню, що міститься в ньому. Але низька термостійкість і низькі механічні властивості обмежують його практичне використання. В результаті досліджень встановлено, що термічна стабільність бджолиного воску з добавками етиленвінілового ацетату (EVA) і активованого вугілля (АС) значно покращилася. Досліди для оцінки таких аспектів балістичних характеристик як швидкість регресії, характерна швидкість і ефективність горіння проводились при використанні лабораторного гібридного ракетного двигуна. Результати показали, що добавки EVA та АС до бджолиного воску збільшують експериментальну швидкість і ефективність горіння. Так, ефективність згорання палива на основі ВВ була покращена з 62% до 94% при додаванні у паливо 20% етиленвінілового ацетату і 2% активованого вугілля.

Ще одним напрямком використання деревного вугілля є його застосування для модифікації вибухових речовин, яке обговорювалося в дослідженнях [43-46] було вивчено вплив мікропорошків деревного вугілля на властивості аміачно-нітратного мазуту (ANFO). ANFO - це суміш аміачної селітри (NH_4NO_3) з мазутом (FO). Зазвичай в якості кисневого компонента використовують нітрат амонію (V) в таблетках (AN-PP) промислового класу, які виготовляються для використання в якості твердого окислювача у вибухових сумішах. На сьогоднішній день ANFO є однією з найпопулярніших вибухових речовин, що застосовуються в гірничодобувній промисловості в усьому світі, головним чином завдяки низькій вартості виготовлення, простоті виробництва, а також широким можливостям модифікації вибухових властивостей (не тільки шляхом регулюванням вмісту мазуту або селітри, але й шляхом застосування інших компонентів). Для досліджень використовували мікроструктуроване деревне вугілля у вигляді порошку, отримане шляхом деструктивної перегонки деревини. Порошки деревного вугілля характеризувалися розміром зерен 90 мкм (дрібнодисперсний порошок) і 1,5 мм (дрібнодисперсний порошок) та 1,18 мм (дрібні гранули). Мазут, який є горючим компонентом мав густину 800 кг/см^3 , а його кінетична в'язкість становила $13,6 \text{ мм}^2/\text{с}$. Процедура змішування тривала 20 хв. Для отримання вибухової речовини мікроструктуроване деревне вугілля додавали до ANFO на останніх 5 хвилинах процесу змішування. Було встановлено, що використання мікропорошків деревного вугілля призводить до зменшення швидкості детонації у порівнянні зі значеннями, отриманими з термодинамічних моделей. Також за результати дослідів зроблено висновок, що швидкість детонації залежить від крупності зерен вугільного порошку. Так, найвищі значення швидкості детонації були отримані при додаванні 1,0% порошку деревного вугілля з розміром зерен 90 мкм, що можна пояснити збільшенням зони хімічної реакції, а також підвищенням теплообміну. Отже, найкращі результати були отримані для складу вибухової суміші 94,5:4,5:1,0 (нітрат амонію:мазут:деревне вугілля).

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Якісні характеристики біококсу

Біококс - це біопаливо, отримане з карбонізованої біомаси. Це органічна речовина, що походить від живих організмів, таких як рослинні рештки та відходи тваринництва.

Біомаса є екологічно чистим джерелом енергії, яке може частково замінити викопні види палива безпосередньо або бути перетворена на газове, рідке та тверде паливо різними способами, а саме: термохімічним та біоконверсією. Спалювання, газифікація та піроліз - це методи отримання енергії з біомаси за допомогою термохімічної платформи [5]. Піроліз - це процес, який перетворює біомасу на біопаливо шляхом розкладання органічного вмісту матеріалів на більш легкі речовини в умовах неокислювальної атмосфери. Повільний процес піролізу називається карбонізацією: основними продуктами карбонізації є (а) біококс, що складається переважно з вуглецю; (б) гудрон, який містить воду і насичені киснем органічні речовини; і (в) гази, що складаються з оксидів вуглецю, легких вуглеводнів і водню. Вихід продуктів залежить від таких умов експлуатації, як тип біомаси, температура процесу, швидкість нагрівання та конструкція реактора [6]. Продукти карбонізації біомаси також сильно залежать від вмісту води в сировині через велику кількість водяного конденсату, що утворюється в гудроні.

Властивості викопних видів палива та біомаси за своєю природою відрізняються для різних джерел біомаси. З точки зору металургійного процесу найбільш придатною сировиною є деревна біомаса [10]. Основна причина полягає в тому, що в матеріалах на основі стовбурної деревини вміст золи і сірки низький, а кількість шкідливих елементів (таких як K, Na) в золі стовбурної деревини знаходиться на прийнятному рівні. Хімічний склад

деревної сировини представлений в таблиці 2.1, а хімічний склад золи деревного палива - в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1

Хімічний склад біосировини (мас. %, суха основа)

	C	H	N	O	S
Евкالیпт	51,22	5,86	<0,3	41,72	0,01
Тріска з цілого деревина	51,8	6,1	0,3	41,19	1-3
Тріска стовбурової деревини	48-52	5,4-6	0,3-0,5	різн.	<0,05
Лісові рештки	51,3	6,1	0,3	40,8	0,02
Пенькова тріска	47-54	5,6-6,5	0,1-1,1	різн.	<0,05
Соснова тирса	51,0	6,0	0,08	42,8	0
Соснова кора	52,5	5,7	0,4	39,7	0,03
Кора ялини	49,9	5,9	0,4	41,4	0,03
Крафт-лігнін	67,35	5,57	<0,5	22,35	2,81

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Таблиця 2.2

Хімічний склад золи деяких видів біосировини (мас. %)

Біопаливо	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅
Береста	0,3		1,0	60,3	5,9	4,1	0,7		4,8	3,5
Береза	3,8	-	-	57,8	7,7	11,5	7,7	-	3,8	7,7
Соснова тирса	8,3	2,0	1,8	41,8	11,8	12,3	0,3	0,12	2,0	4,8
Соснова кора	1,3	5,3	0,3	40,6	4,5	7,6	0,5	0,12	2,0	4,8
Кора ялини	6,13	0,68	1,9	72,39	4,97	7,22	2,02	0,12	1,88	2,69
Лісові рештки	20,63	2,99	1,42	47,55	7,2	10,23	1,6	0,4	2,91	5,05
Сосновий крафт- лігнін	3,0	1,2	0,3	1,0	1,0	4,7	38,5	-	-	-

Деревна сировина, наведена в таблиці 2.2, представляє різні тверді та м'які породи деревини, відходи лісозаготівель та лісопилок, а також побічні продукти виробництва целюлози (лігніни). У випадку трав'янистої біомаси, такої як солома та лушпиння, вміст золи може перевищувати 20%, а кількість шкідливих елементів перевищує критичну межу. Крафт-лігнін демонструє високий вміст S, що може обмежити його використання в металургійному виробництві. Тому необхідні подальші дослідження для мінімізації вмісту сірки в крафт-лігніні.

Вміст вуглецю в деревній сировині низький, а вміст кисню високий порівняно з вугіллям і коксом, що використовуються в металургійних процесах. Вихід летких речовин у деревній сировині є високим. Ці фундаментальні відмінності в хімічному складі означають, що використання сирової необробленої деревної біомаси як такої в металургійних процесах не є ефективним, а потребує її переробки перед використанням. Одним з критичних факторів є також вологість біомаси, яка може становити до 60 мас.% від свіжозрубаної деревини. Існує потреба в ефективних технологіях для зменшення вологості біомаси та отримання продуктів з високим вмістом вуглецю та низьким вмістом кисню для використання в якості відновлювачів.

Як альтернативний вид енергії, біококс може застосовуватися у великомасштабних промислових процесах [7], оскільки він має стабільне горіння при високих температурах [8].

2.2 Дослідження технології отримання біококсу, переваги, недоліки

В роботі [41] наведено дані вивчення технології виробництва біококсу. Кокс отримували з кам'яного вугілля, яке широко використовується в коксохімічному виробництві Дніпровського металургійного комбінату, м. Дніпро, Україна.

Характеристики коксівного вугілля та склад шихти наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Технологічні характеристики вугілля, склад вугільної шихти

Компонент	Частка в шихті, %	Технічний аналіз, %				Елементний аналіз, %				
		W ^a	A ^d	V ^d	S ^d _t	C ^d	H ^d	N ^d	O ^d	
Вугілля А	30	1,4	11,0	33,6	0,82	74,49	5,09	1,61	6,99	55,4
Вугілля В	25	1,5	11,0	30,3	0,68	75,38	4,77	1,54	6,63	58,7
Вугілля С	30	3,8	8,4	23,2	0,32	82,61	4,78	1,43	2,46	68,4
Вугілля Д	15	1,2	8,9	16,7	0,5	80,32	4,15	1,38	4,75	74,4
Шихта	100	2,1	9,9	27,1	0,58	78,02	4,78	1,50	5,22	63,0
Біопаливо	5-45	9,1	5,6	73,1	0,09	45,34	5,86	0,58	42,54	21,3

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

В якості добавки біомаси використовували українські промислові деревні гранули, оскільки деревна біомаса вважається високоякісним паливом [41] і найбільш придатною сировиною для металургійних процесів. Частинки біомаси були отримані шляхом подрібнення гранул біомаси до розміру частинок менше 3 мм. Петрографічний аналіз вугілля та вугільної шихти представлено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Петрографічні характеристики вугілля

Компонент	Частка в шихті, %	Показник відбиття вітриніту R ₀ , %	Вітриніт V _t , %	Інертиніт I, %	Ліптиніт L, %
Вугілля А	30	0,75	80	17	2
Вугілля В	25	0,93	87	10	2
Вугілля С	30	1,22	91	8	0
Вугілля Д	15	1,53	86	12	0
Шихта	100	1,05	86	12	1,1

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

Вугільна шихта була підготовлена з вугілля з високим вмістом вітриніту, значення якого варіюється в межах 80-91%, а випадковий коефіцієнт відбиття вітриніту коливається в межах 0,75-1,53%. Вугільна суміш характеризується випадковим значенням коефіцієнта відбиття вітриніту 1,05%. Повідомляється [11], що чим вищий показник відбиття вітриніту вугільної шихти, тим кращі міцнісні властивості отриманого коксу. Для досягнення хорошої міцності коксу коефіцієнт відбиття вітриніту повинен бути в межах 1,2-1,3% [32,33].

Для всіх сумішей підтримувався постійний гранулометричний склад вугілля, щоб мінімізувати його вплив на якість коксу, оскільки дослідження було зосереджено на впливі добавки. На рисунку 2.1 показано розподіл частинок вугілля за гранулометричним складом у сумішах, % мас. Ступінь подрібнення для еталонної шихти становив 82% вмісту класу <3 мм, при цьому вміст класу <0,5 мм становив 24%.

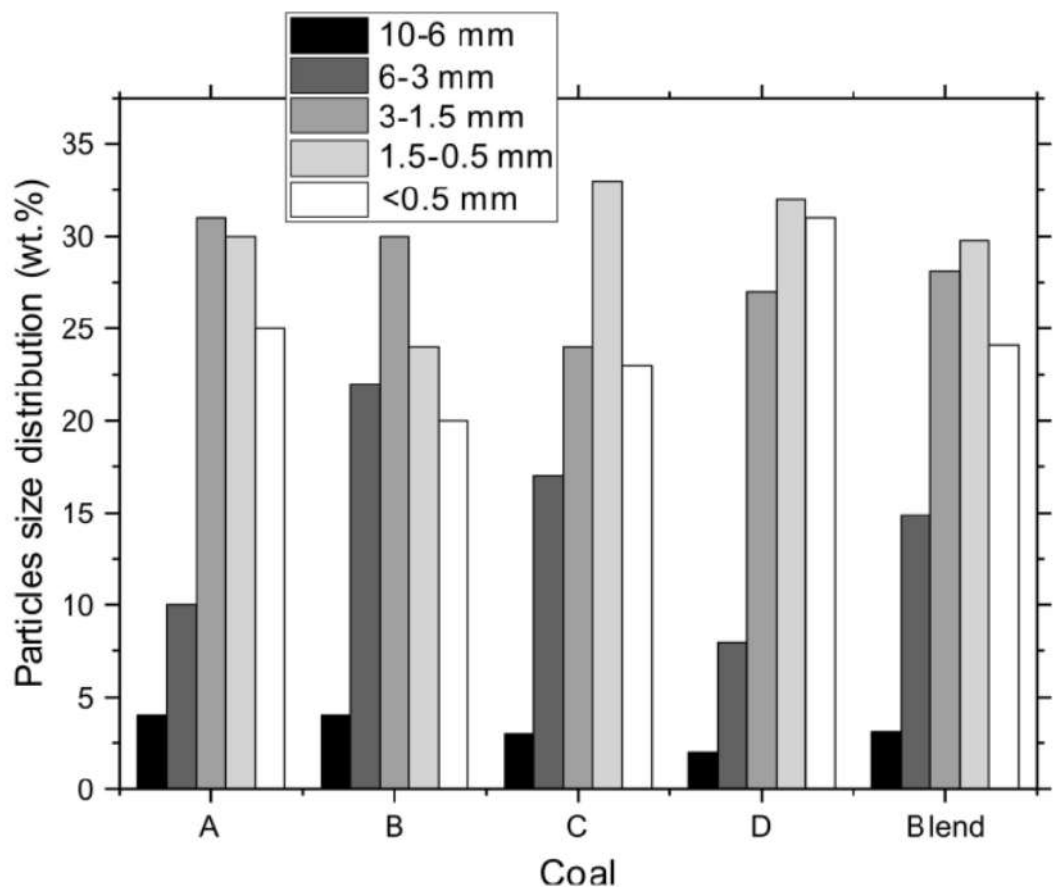


Рис.2.1. Гранулометричний склад вугілля та шихти

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

Діаметр деревних гранул становив 8 мм, а довжина варіювалася від 4 до 22 мм. Гранулометричний склад біомаси був близьким до стандартного помелу вугільної суміші і становив 82% вмісту класу <3 мм. Вибір гранулометричного складу біомаси підбирали ідентичним крупності шихти, щоб виключити вплив гранулометричного складу на показники якості коксу та запобігти додатковому зниженню спіклівості шихти [34].

Кількість добавок деревних гранул у вугільних сумішах становила 5, 10, 15, 30 та 45 %. Зменшення вугільної частини шихти за рахунок пелет з біомаси відбувалося пропорційно для кожного типу вугілля, враховуючи стабільність гранулометричного складу вугілля в шихті. Додатково було досліджено вплив додавання 5 % деревних частинок. Частинки біомаси в кількості 5 % були додані до вугільної суміші для порівняння впливу на якість біококсу рівномірно розподілених частинок з нерівномірно розподіленими гранулами. Карбонізація сумішей проводилася в лабораторних умовах при кінцевих температурах 950 °С та 1100 °С. Умови проведення карбонізації детально представлені в роботі [41]. Карбонізацію проводили в електричній лабораторній печі шахтного типу. Наважку шихти масою 2 кг завантажували в циліндричну реторту. Карбонізацію проводили 3 рази за температури 950 °С та 3 рази за 1100 °С. Загальний час карбонізації при 950 °С становив 90 хв, а при 1100 °С використовували по 105 хв для кожного випробування.

У таблиці 2.5 наведено вихід коксу та біококсу з різною кількістю додавання біомаси при температурах карбонізації 950 або 1100 °С, гранулометричний склад та експрес-аналіз. Дані A^d , V^d та S_t^d для коксу при 950 та 1100 °С та біококсу з масовою часткою пелет 5 % при 950 та 1100 °С були наведені в [41].

Таблиця 2.5

Характеристики коксу та біококсу з різною кількістю додавання біомаси при температурах карбонізації 950 або 1100 °С

Продукт	Тип добавки	Кількість добавки	Вихід коксу/біококсу, %	Гранулометричний склад мм, %			Технічний аналіз, %			С _{фікс} , %
				>25	10-25	<10	A ^d	V ^d	S _t ^d	
температура карбонізації 950 °С										
КОКС	-	-	74,5	93,9	1,3	5,7	10,9	1,64	0,24	87,5
біококс	пелети	5	70,9	92,7	2,5	4,8	10,3	1,55	0,23	88,2
		10	69	88,6	2,3	9,1	10,0	1,5	0,22	88,5
		15	66,5	79,3	4,9	15,8	9,7	2,7	0,21	87,6
		30	59,6	55,3	9,5	35,2	8,4	2,33	0,19	89,3
		45	52,5	30,8	12,7	56,5	6,0	1,85	0,16	92,2
	частинки біомаси	5	70,7	89,2	2,4	8,4	10,3	1,52	0,23	88,2
температура карбонізації 1100 °С										
КОКС	-	-	73,3	93,6	0,9	5,5	11,1	1,46	0,23	87,4
біококс	пелети	5	69,8	92,8	2,6	4,6	10,8	1,4	0,22	87,8
		10	68,7	88,9	3,4	7,7	10,5	1,42	0,2	88,1
		15	66,3	81,4	3,8	14,8	10,2	1,57	0,18	88,2
		30	59,3	60,1	7,9	32,0	8,9	1,53	0,17	89,6
		45	52,4	36,7	13,5	49,8	5,8	1,8	0,16	92,4
	частинки біомаси	5	69,4	90,5	3,8	5,7	10,8	1,5	0,22	87,7

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

У порівнянні зі звичайним коксом, вихід якого становив 74,5% при 950 °С і 73,3% при 1100 °С, вихід біококсу зменшується зі збільшенням кількості гранул біомаси для обох температур карбонізації, що пов'язано з високим вмістом летких речовин у вихідній біомасі. Крім того, вихід коксу та біококсу зменшується з підвищенням кінцевої температури карбонізації через більш глибокі процеси деструкції суміші та повне вивільнення летких речовин. З підвищенням температури карбонізації термічній деструкції піддаються високомолекулярні сполуки, під час руйнування яких виділяються леткі речовини, і, як наслідок, вихід коксу зменшується. Про це свідчить зменшення

V^d для коксів, отриманих при 1100 °С. Зольність коксу після карбонізації стабільно вища, ніж у вихідної шихти, однак менша кількість зольної біомаси в шихті сприяє зниженню зольності біококсу порівняно з еталоном.

Використання частинок біомаси в порівнянні з пелетами також має помітний вплив на гранулометричний склад отриманого біококсу. Розмір коксу >25 мм, який використовується для цілей доменної плавки, зменшується зі збільшенням частки гранул біомаси через збільшення тріщинуватості та пористості [38]. Відповідно, збільшується кількість біококсу з розміром 25-10 мм і <10 мм, який не використовується для цілей, пов'язаних з доменним виробництвом. Слід зазначити, що частинки біомаси, які, на відміну від пелет, більш рівномірно розподілені по шихті, сприяли більшому розриву матеріалу, і вихід >25 мм є нижчим порівняно з пелетами. Більше того, для біококсу, отриманого при 1100 °С, вихід >25 мм більший, ніж для 950 °С, а вихід <10 мм менший. Це пов'язано з підвищеною температурою карбонізації та покращеною структурою і механічною міцністю коксу.

Оскільки раніше було встановлено, що зі збільшенням додавання біомаси реакційна здатність коксу зростає [30], то розглядається вплив додавання 5 % гранул біомаси як оптимального варіанту для можливого виробництва біококсу з подальшим його використанням в доменній плавці.

Зміна кумулятивного об'єму пор з шириною пор для зразків коксу та біококсу наведена на рисунку 2.2.

Загальний кумулятивний об'єм всіх зразків коксу і біококсу має різні значення. У всіх випадках максимальні відсотки кумулятивного об'єму пор знаходяться в діапазонах 20-40 Å. Слід зазначити, що для біококсу, отриманого при 950 °С, як і для коксу, так і для біококсу, отриманого при 950 °С і 1100 °С, значення кумулятивного об'єму пор є вищими, ніж для коксу при тих же температурах. Це пов'язано з тим, що деревне вугілля (тут і далі - вугільні гранули, які застосовуються для вуглецевого матеріалу після карбонізації) збільшує кумулятивний об'єм пор.

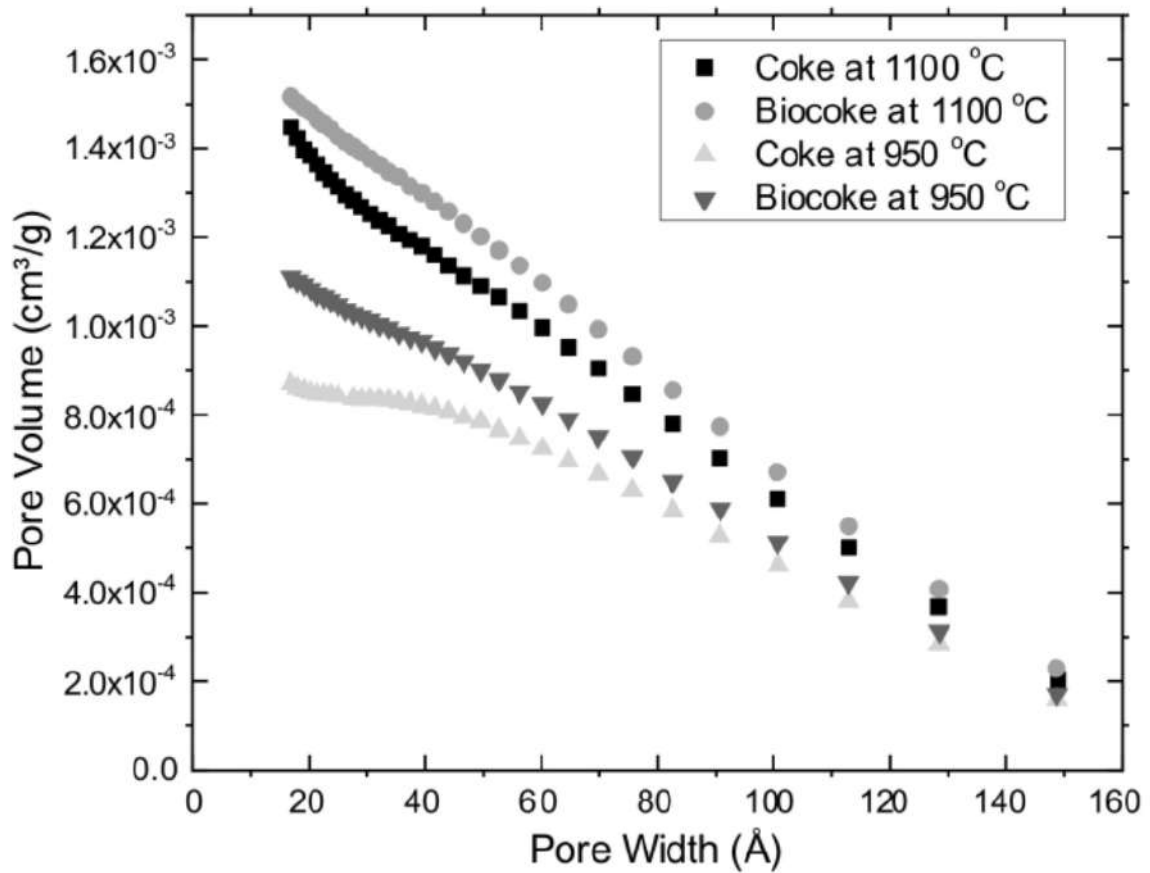


Рис.2.2. Зміна кумулятивного об'єму пор всіх зразків коксу і біококсу

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

На рисунку 2.4 показана чітка лінійна залежність між індексом реакційної здатності коксу та міцністю коксу після реакції з CO₂. Така поведінка параметрів CRI та CSR добре відома і раніше була представлена в роботі [39].

Згідно з рисунком 2.4, чим нижчий індекс реакційної здатності, тим краща міцність після реакції з CO₂. У випадку біококсу деревне вугілля зменшує частку анізотропної текстури в коксі і збільшує його реакційну

здатність з CO_2 . Частинки деревного вугілля є ізотропними [30] і мають гіршу кристалічну організацію, ніж анізотропні [21].

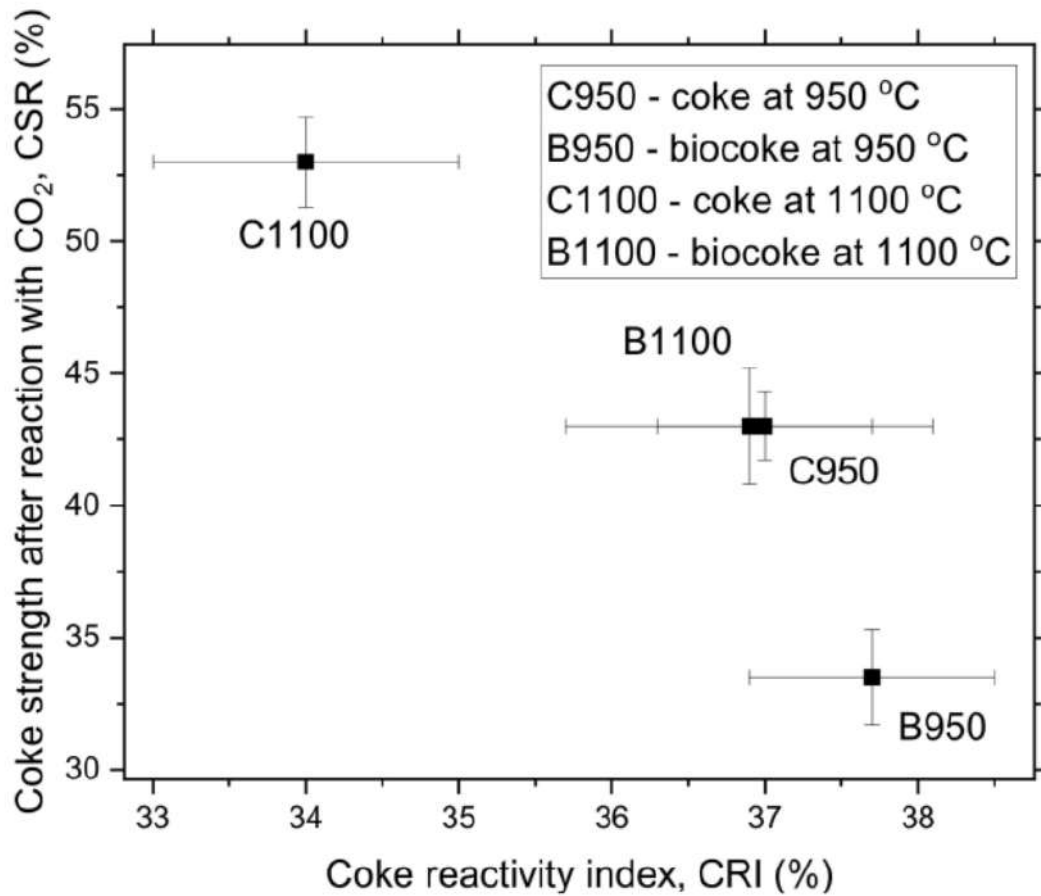


Рис.2.4. Залежність між індексом реакційної здатності коксу та міцністю коксу після реакції з CO_2 всіх зразків коксу і біококсу

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

Ці ізотропні текстури реагують переважно з CO_2 [20,22] і сприяють ослабленню коксу через утворення додаткових пор і зниження міцності. Однак значення CRI для C950 і B950 знаходяться в межах стандартного відхилення. Вони показують, що додавання 5 мас. % гранул біомаси суттєво не змінює якість, що підтверджує можливість використання біококсу замість звичайного коксу.

Значення «холодної» механічної міцності для коксу та біококсу при 950 або 1100 °C показані на рисунку 2.5. Видно, що значення для коксу та біококсу

при 1100 °C є вищими порівняно з коксом та біококсом, отриманими при 950 °C.

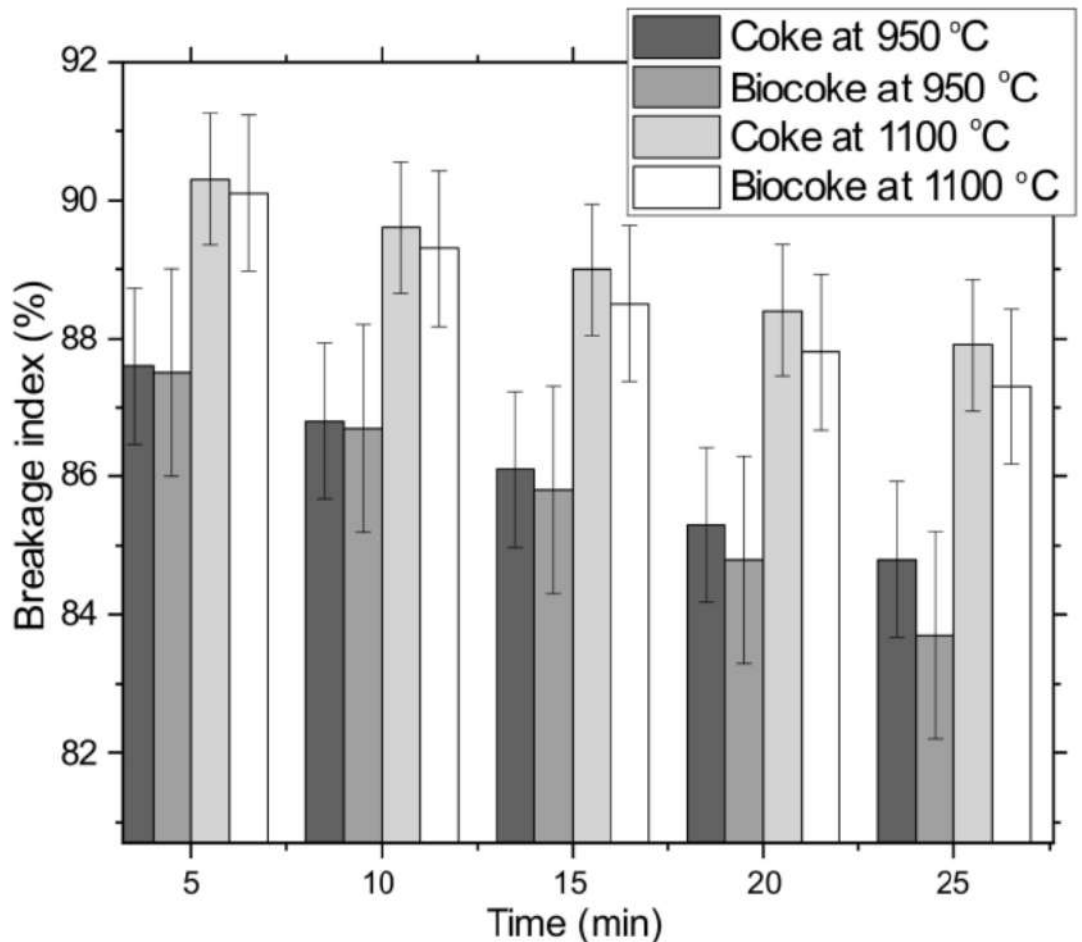


Рис.2.5. Значення «холодної» механічної міцності (ВІ) для коксу та біококсу при 950 або 1100 °C

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

Значення ВІ для коксу та біококсу при однакових температурах відрізняються незначно і знаходяться в межах стандартних відхилень. Однак присутність вугільних гранул знижує механічні властивості біококсу, що стає більш помітним при збільшенні тривалості часу механічної дії на грудки коксу або біококсу. Так, зі збільшенням загального часу механічної дії різниця в показниках ВІ збільшувалася. Зменшення показників «холодної» міцності корелює зі зменшенням CSR. Крім того, як показано на рисунку 2.6, CRI зменшується зі збільшенням ВІ.

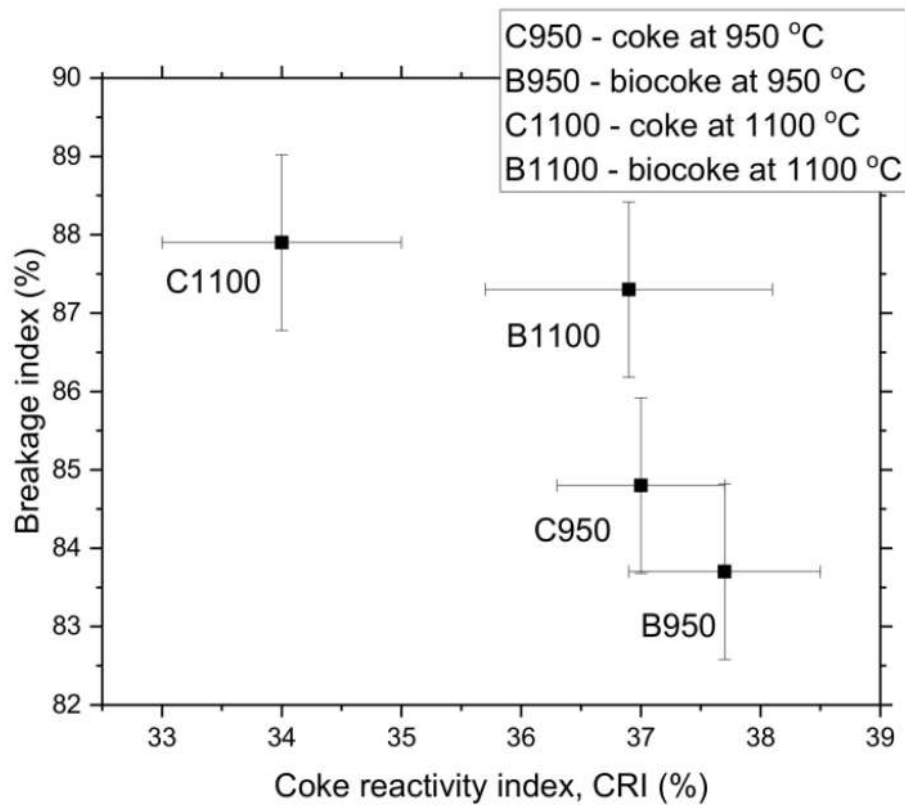


Рис.2.6. Взаємозв'язок «холодної» механічної міцності (ВІ) та реакційної здатності для коксу та біококсу при 950 або 1100 °С

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

Показники ВІ для зразків коксу та біококсу при 1100 °С та еталонного металургійного коксу в [40] мають близькі значення. Важливо зазначити, що значення реакційної здатності та міцності є результатом процесу спікання вугільної шихти при нагріванні. Процес спікання відбувається на поверхні вугільних частинок. Отже, наявність гранул біомаси в шихті впливає на формування пористої коксової матриці та її структуру. Тому були розраховані параметри структурного впорядкування у зразках вихідної біомаси, вугільних гранул, коксу та біококсу при різних температурах карбонізації, які представлені в таблиці 2.6. Значення d_{002} , L_c та L_a для коксу та біококсу при обох температурах карбонізації були раніше пояснені в [28]. Для визначення

параметрів структурного впорядкування вугільних гранул були взяті зразки біококсу, отримані при температурах 950 та 1100 °С.

Таблиця 2.6

Параметри структурного впорядкування різних вуглецевих матеріалів, отриманих за однакових умов термічної обробки

Матеріал	Параметри структурного впорядкування			
	d_{002} , Å	L_c , Å	L_a , Å	L_c/L_a
Кокс (950 °С)	3,5	18,4	34,3	0,54
Біококс з добавкою 5% (950 °С)	3,52	17,9	32,7	0,55
Кокс (1100 °С)	3,43	21,2	37,5	0,56
Біококс з добавкою 5% (1100 °С)	3,49	19,0	35,8	0,53
Пелети (950 °С)	3,7	16,9	28,3	0,6
Пелети (1100 °С)	3,61	17,6	29,8	0,59
Біомаса	3,93	15,6	-	-

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

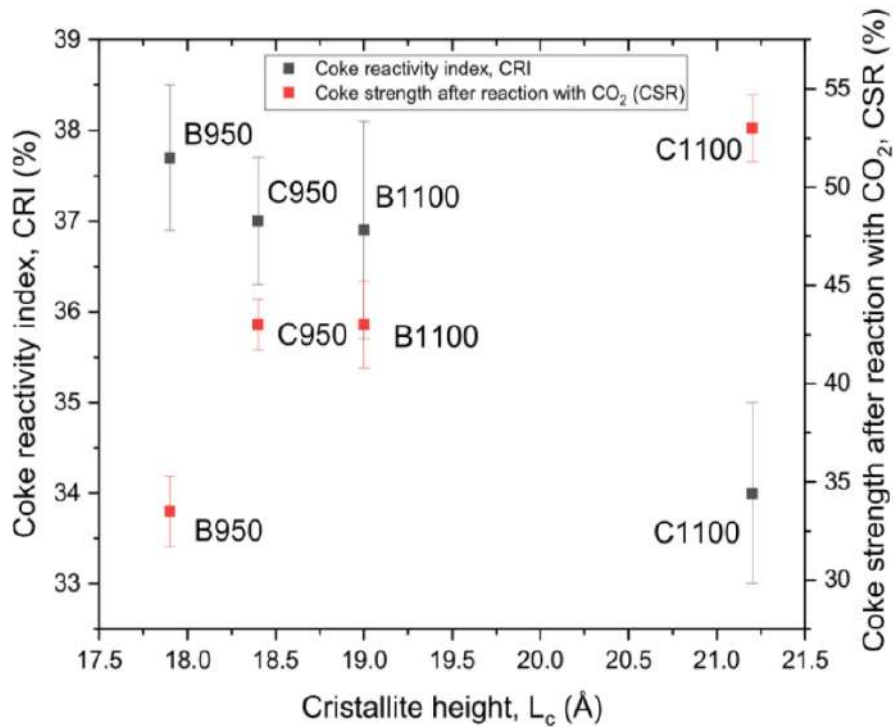


Рис.2.7. Залежність між значеннями CRI, CSR та висотою кристалітів (L_c)

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Вугільні гранули в коксовій матриці призводять до зменшення впорядкованості структури коксу, збільшення міжплощинної відстані d_{002} між вуглецевими гексагональними сітками та зменшення L_a . Представлені значення L_c для коксу знаходяться в типовому діапазоні.

Залежність між значеннями CRI, CSR та висотою кристалітів (L_c) показано на рисунку 2.7. Реакційна здатність зменшується, а міцність зростає зі збільшенням впорядкованості структури за рахунок покращення двовимірної орієнтації та збільшення розміру молекулярно-орієнтованих доменів. Згідно з отриманими значеннями, температура карбонізації 1100 °C сприяє утворенню кристалітів з поздовжніми розмірами (L_a) більшими, ніж у поперечному напрямку (L_c), що спричиняє анізотропію коксу.

У порівнянні з еталонним коксом, вугільні гранули в структурі біококсу знижують його придатність для процесу коксування. Погіршення властивостей буде ставати все більш помітним зі збільшенням кількості біомаси і зниженням кінцевої температури карбонізації. З іншого боку, біомаса може позитивно впливати на інші галузі промисловості, такі як SAF, підвищуючи реакційну здатність і зменшуючи вміст золи та сірки в коксі.

Структурна міцність коксу - це міцність його пористого тіла, позбавленого видимих тріщин. Цей показник залежить від міцності зчеплення вугільних зерен з коксовим матеріалом і товщини стінок пор. Окремі зразки коксу або біококсу, отримані після карбонізації при температурах 950 або 1100 °C, мають високі значення, які відповідають вимогам до доменного коксу >80% [35]. Однак гранули біомаси в кількості 5 мас. % суттєво знижують цей показник. При цьому зниження структурної міцності з додаванням частинок біомаси є ще більш значним. Це можна пояснити різним розподілом гранул і частинок в коксовій матриці і, як наслідок, великою кількістю центрів розтріскування, які є частинками деревного вугілля і, як наслідок, призводять до більшого руйнування коксу.

Твердість подрібненого коксового матеріалу характеризується абразивною твердістю. Крім міцності грудок, кокс і біококс повинні мати

достатню твердість, яка визначається твердістю стінок пор, не ослаблених тріщинами, і яка обумовлена ступенем готовності і злиття вугільних частинок. Абразивна твердість має найвищі значення для зразків коксу, як при 950 °С, так і при 1100 °С. Далі, зі збільшенням вмісту біомаси в пелетах, абразивна твердість зменшується.

Обидва показники, а саме, абразивна твердість і структурна міцність, мають схожі тенденції до погіршення зі збільшенням додавання біомаси, оскільки вони відображають якість вуглецевого матеріалу на структурному рівні.

На рисунку 2.8 показано взаємозв'язок між структурною міцністю та абразивною твердістю для коксу та біококсу при 950 °С та 1100 °С.

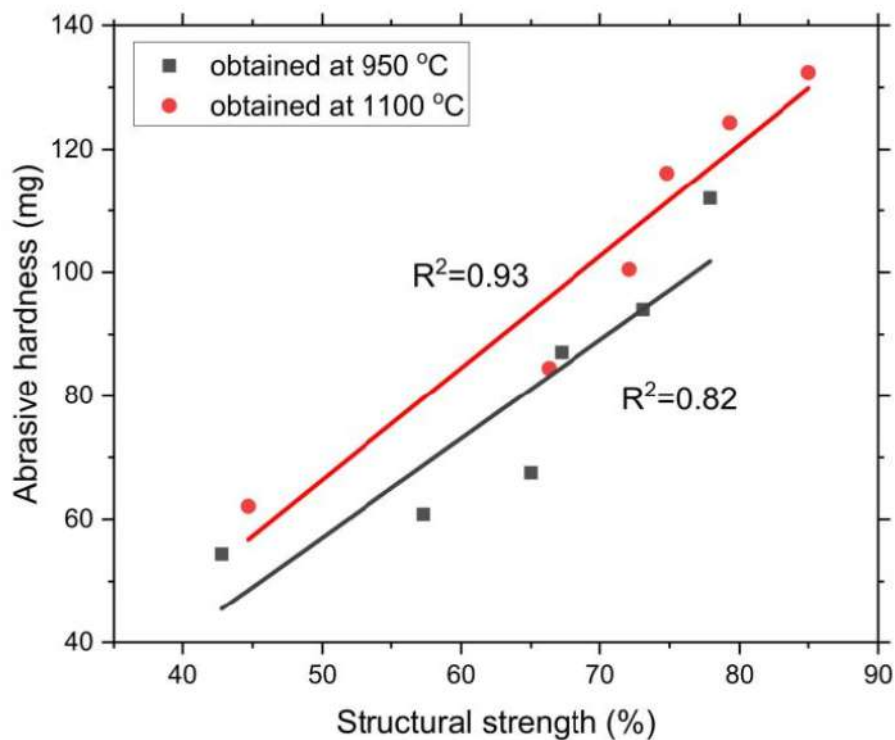


Рис.2.8. Взаємозв'язок між структурною міцністю та абразивною твердістю для коксу та біококсу при 950 °С та 1100 °С

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

Як видно з рисунка 2.8, структурна міцність зростає зі збільшенням абразивної твердості матеріалу для обох температур карбонізації, причому залежність є більш тісною зі збільшенням структурної впорядкованості, що відбувається з підвищенням температури карбонізації.

Покращення механічних властивостей коксів та біококсів з підвищенням температури карбонізації можна пояснити збільшенням кількості просторового розташування молекулярно-орієнтованих доменів, зменшенням відстані між вуглецевими гексагональними сітками-моношарами d_{002} та збільшенням вмісту L_a .

Як видно з таблиці 2.7, питомий електричний опір вуглецевмісних матеріалів зменшується з підвищенням температури карбонізації. Він знаходиться в межах 12,0-15,9 м·Ом для 950 °С і 10,3-13,8 м·Ом для 1100 °С. Питомий електричний опір відображає стан його вуглецевої структури і щільність контакту залишкового матеріалу вугільних зерен і петрографічних компонентів всередині зерен. Отже, кокс, отриманий з погано спікливого і петрографічно неоднорідного та/або високозольного вугілля, характеризується більш високим питомим електричним опором. Так, питомий електричний опір для коксу при 950 °С та 1100 °С є нижчим порівняно зі значеннями для біококсу. Зі збільшенням кількості гранул біомаси питомий електричний опір зростає. В той же час, питомий електричний опір зменшується з підвищенням температури карбонізації, що пояснюється видаленням кисневмісних функціональних груп та реструктуризацією коксової матриці. Зменшення питомого електричного опору також пов'язане з утворенням та/або збільшенням кристалітів вуглецю. Таким чином, включення деревного вугілля з відмінною від коксу структурою збільшують питомий електричний опір зразків біококсу.

Таблиця 2.7

**Фізико-механічні та електричні властивості
зразків біококсу та коксу**

Продукт	Тип добавки	Кількість добавки	Структурна міцність, %	Абразивна міцність, мг	Питомий електричний опір, мОм·м
температура карбонізації 950 °С					
кокс	-	-	77,9	112,0	12,0
біококс	пелети	5	73,1	94,0	12,4
		10	67,2	87,1	12,7
		15	65,5	67,5	13,2
		30	57,3	60,8	14,5
		45	42,8	54,4	15,9
	частинки біомаси	5	69,7	103,0	12,4
температура карбонізації 1100 °С					
кокс	-	-	85,0	132,4	10,3
біококс	пелети	5	79,3	124,3	10,7
		10	74,8	116,1	11,0
		15	72,1	100,5	11,5
		30	66,3	84,5	12,6
		45	44,7	62,1	13,8
	частинки біомаси	5	76,8	128,0	10,7

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

Електричний опір зменшується зі збільшенням структурної міцності та абразивної твердості. Слід також зазначити, що величина електричного опору змінюється прямо пропорційно реактивності. Зі збільшенням значень електричного опору зростає реакційна здатність коксу, що важливо для багатьох не доменних виробництв.

Вимоги до реакційної здатності, механічної міцності та електричного опору вуглецевого матеріалу можуть бути не такими жорсткими [80], як для доменного палива, що дозволяє розглянути можливість використання біококсу з підвищеною участю біомаси для агломерації.

Куски біококсу та вугільні гранули в структурі коксу були досліджені за допомогою цифрового мікроскопу. Як показано на рисунку 2.9 (а,б) деревне вугілля має чіткі межі в коксовій матриці, про що свідчать чітко окреслені межі включення, і, таким чином, є причиною розтріскування. Крім того, враховуючи високу пористість деревного вугілля, їх присутність призводить до зниження міцності біококсу.

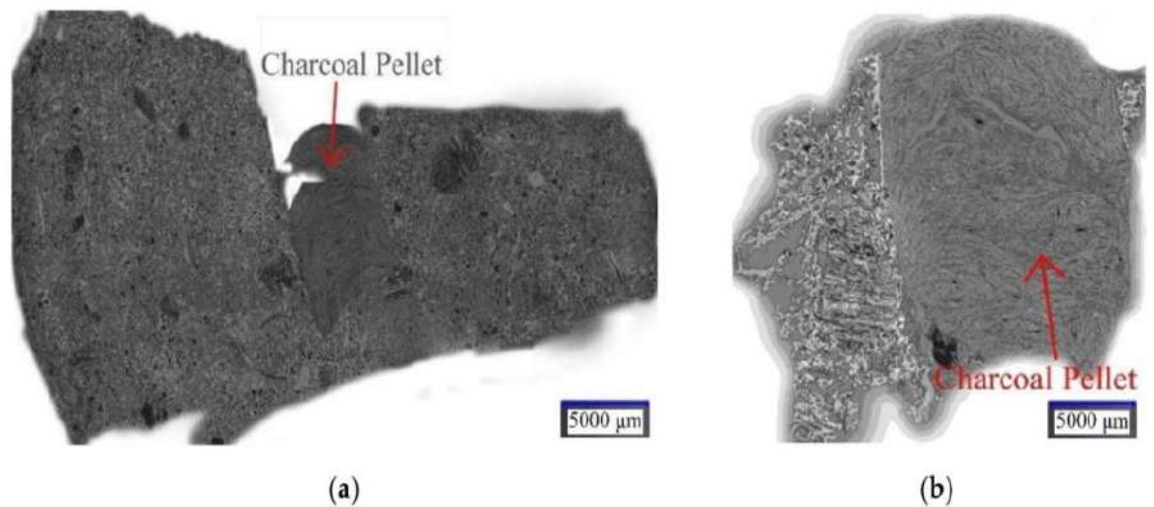


Рис.2.9. Макроструктура біококсу: а) зображення кусків біококсу (збільшення $\times 20$); б) зображення гранул деревного вугілля в структурі коксу (збільшення $\times 50$)

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [41]

З отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

- максимальний кумулятивний об'ємний відсоток пор як для коксу, так і для біококсу (5 мас. % додавання гранул біомаси) знаходяться в діапазоні 20-40 Å. Однак, для зразків біококсу при 950 °C та 1100 °C значення кумулятивного об'єму пор є вищими, ніж для коксу при тих же температурах. Це пов'язано з наявністю гранул деревного вугілля, які збільшують кумулятивний об'єм пор;

- взаємозв'язок між показниками CRI та CSR спостерігається як для звичайного коксу, так і для біококсу (5 мас. % додавання гранул біомаси) при обох температурах карбонізації;

- «холодні» значення механічної міцності для коксу та біококсу (5 мас. % гранул біомаси) при однакових температурах відрізняються несуттєво. Однак присутність гранул біомаси в біококсі знижує міцнісні властивості біококсу, що стає більш помітним при збільшенні часу механічної дії на грудки коксу або біококсу. Присутність гранул біомаси впливає на формування пористої коксової матриці і тріщин в структурі, що призводить до погіршення міцності коксу;

- абразивна твердість зростає зі збільшенням температури карбонізації для зразків коксу та біококсу (5, 10, 15, 30 і 45 мас. %). Було помічено, що обидва показники мають подібну поведінку;

- встановлено, що питомий електричний опір вуглецевмісних матеріалів зменшується з підвищенням температури карбонізації, що пов'язано з утворенням та/або збільшенням кристалітів вуглецю і знаходиться в межах 12,0-15,9 мО·м для 950 °С та 10,3-13,8 мО·м для 1100 °С. Збільшення значень питомого електричного опору, як і реакційної здатності, свідчить про зменшення впорядкованості структури коксу;

Як видно з результатів, присутність необробленої біомаси в структурі коксу може знижувати його якість для процесу доменної переробки. Погіршення властивостей стає все більш помітним зі збільшенням кількості додавання біомаси та зниженням кінцевої температури карбонізації. Отже, кількість добавки не повинна перевищувати 5%.

2.3 Вибір кількісної та якісної характеристики добавки біомаси при виробництві біококсу з металургійними властивостями

Для зменшення негативного впливу добавки біомаси та поліпшення фізико-механічних, термохімічних характеристик коксу для доменної плавки можна досягти, якщо в сумішах використовувати не сиру біомасу, а термічнооброблену.

Так, в роботі [42] вивчали зміну властивостей біомаси в залежності від температури нагрівання для отримання біококсу з оптимальними механічними властивостями для доменного плавки. Температура нагрівання біомаси до біококсу оцінювалася при 400, 500 і 600 °С. Суміш коксівного вугілля з біопаливом (карбонізованим залишком) складала 95:5, 85:15 та 75:25 мас. Для отримання біококсу діаметром 50 мм і товщиною 27 мм застосовували тиск пресування 20 МПа. Сирий зразок нагрівали при 1100 °С протягом 4 годин, після чого проводили охолодження у водному середовищі, в результаті чого отримували щільні зразки. Підвищення температури нагрівання, як правило, обумовлювало прямо пропорційне збільшення фіксованого вуглецю та теплотворної здатності.

Брикетування під дією теплового пресування - це метод поліпшення технологічних характеристик виробництва коксу без значного погіршення якості. Паливний брикет - це спресований блок, який зазвичай складається з вугільного пилу, що використовується як паливо [13]. Брикети з біомаси, як правило, виробляються з горючого матеріалу (вугілля, деревне вугілля, жом, сільськогосподарські відходи, тирса тощо) та зв'язуючої речовини. Для промислових цілей найбільш поширеними матеріалами, що використовуються в якості зв'язуючих речовин, є меляса, крохмаль, кам'яновугільна та деревна смоли [14,15]. Зв'язуюча речовина необхідна для покращення когезії та зв'язування горючих матеріалів, щоб запобігти розсипанню пресованого матеріалу. Порівняно зі звичайним коксом, який має теплотворну здатність 20-

30 МДж/кг [16,17], нові ущільнені брикети, виготовлені Mizuno та ін. при високому термічному стисненні (20 МПа і 200 °С), продемонстрували кращі властивості, такі як вища щільність, покращена механічна міцність і висока теплотворна здатність [18]. Yustanti та ін. вивчали максимальну температуру процесів брикетування з метою отримання максимальної міцності на стиск. Біококсіві брикети з різним складом рисового лушпиння та кокосової шкаралупи з мелясою в якості зв'язуючого агента витримували при різних температурах під постійним тиском 20 МПа протягом 4 годин. Деревне вугілля з рисового лушпиння при 150 °С давало міцність на стиск близько 2,09 МПа, тоді як кокосова шкаралупа була більш придатною при 100 °С, з міцністю на стиск 1,58 МПа [19].

Кількість біомаси, як правило, зменшувала міцність коксу та індекс спучування. Для покращення механічних властивостей слід контролювати розмір подачі та тип зв'язуючого. Мурсіто та ін. отримали найкращі розміри деревного вугілля з червоної деревини та покращили міцність біококсу на розчавлювання. Сухе гасіння допомогло запобігти появі тріщин у коксі. Біококс мав насипну щільність 1071,44 кг/м³ і показав відмінну міцність на стиск 4,87 МПа при фіксованому вмісті вуглецю 85,8% і теплотворній здатності 30,363 МДж/кг для стандартної доменної печі [20]. Однак у цьому дослідженні не були охарактеризовані CSR і CRI.

Сировиною для виробництва біококсу були сільськогосподарські відходи (шкаралупа кокосових горіхів та рисове лушпиння).

Біомасу сушили в печі при 110 °С протягом 5 годин, а кокосову шкаралупу подрібнювали за допомогою молотка до розміру менше 1 × 1 см; рисове лушпиння залишали в початковому розмірі. Коксівне вугілля було подрібнене в млині з пульверизатором і просіяне до розміру <0,42 мм. Усереднювали проби (біомаси та коксівного вугілля) квартуванням.

Як зв'язуючу речовину використовували комерційну мелясу.

Карбонізація біомаси проводилася непрямим методом в стендовому масштабі, за допомогою піролізу в обертовій печі з електричним нагріванням

в осьовому та радіальному напрямках, яка була виготовлена з листової м'якої сталі товщиною 5 мм, зварена в циліндричну форму довжиною 4 м, діаметром 30 см і кутом нахилу 5° . Основний внутрішній реактор був сконструйований з труби з нержавіючої сталі ASTM 310 SS, об'ємом 0,7 л і обертався за допомогою керованого двигуна Toshiba VF-S15 і бункера для зразків з мікродвигуном Danfoss VLT. Обертюва піч мала чотири зони нагрівання-охолодження: (1) нагрівання в зоні 1, $600-400^{\circ}\text{C}$; (2) $600-400^{\circ}\text{C}$ в зоні 2; (3) охолодження в зонах 3 і 4, 300 і 200°C , відповідно, в яких термопари здійснюють контроль температури. Конструкція обертювої печі з непрямим електричним нагріванням показана на рисунку 2.10.

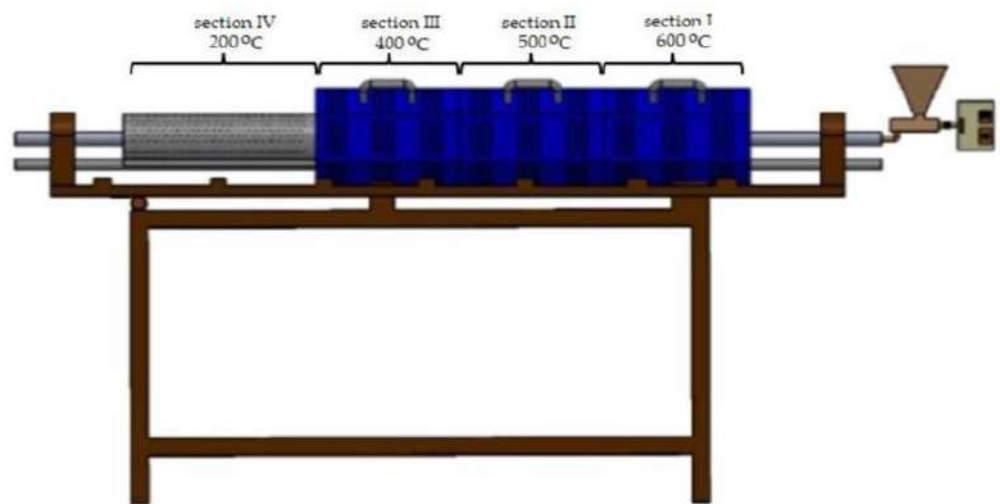


Рис.2.10. Піч для карбонізації біомаси

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [42]

Для брикетування біококсу використовували циліндричну матрицю діаметром і висотою 5 і 5 см, відповідно. Суміш коксівного вугілля з біопаливом готували у співвідношенні 95:5, 85:15 та 75:25 мас. Коксівне вугілля, біопаливо та мелясу різного складу пресували в лабораторному гідравлічному пресі під тиском 20 МПа, температурою 100°C та часом витримки 5 хв для формування брикетів різного складу. Зразки шихти після пресування мали масу 54-56 г, діаметр і висоту - 5 і 2,5-2,7 см відповідно. Потім брикети зміцнювали термічною обробкою при 1100°C протягом 4

годин і загартувували у воді для підвищення міцності на стиск. Гасіння водою проводили шляхом розпилення води на поверхню розпеченого біококсу протягом 5 с.

З таблиці 2.8 видно, що біококс високої якості за показниками CSR та CRI був отриманий при складі шихти з коксівного вугілля та біопалива у співвідношенні 85:15 мас.%. За літературними даними, відмінний металургійний кокс має більше 85% фіксованого вуглецю і теплоту згоряння 28,451-30,125 МДж/кг [6-9]. За даними таблиці біококс (зразок CSB 4) мав теплотворну здатність 29,648 МДж/кг, що є вищою за мінімальну, зазначену в літературі. Таблиця 2.8 показує, що біококс з використанням вугілля з шкаралупи кокосового горіха характеризується високим вмістом фіксованого вуглецю - $89,23 \pm 0,14\%$, тоді як біококс з використанням вугілля з рисового лушпиння має зазначений показник лише на рівні $73,44 \pm 0,65\%$.

Таблиця 2.8

Показники якості біококсів

Показник	Одиниці виміру	Біококс з добавкою палива з рисового лушпиння			Біококс з добавкою палива зі шкаралупи кокосового горіха		
		RNB 4	RNB 5	RNB 6	CSB 4	CSB 5	CSB 6
Волога	%	1,21±0,16	1,03±0,4	1,12±0,16	1,26±0,18	1,01±0,12	1,13±0,11
Вихід летких речовин	%	3,54±0,28	3,46±0,28	3,36±0,28	1,79±0,29	1,56±0,26	1,64±0,22
Зольність	%	29,12±0,54	26,21±0,42	23,20±0,49	9,41±0,25	9,42±0,17	9,13±0,12
C _{фікс}	%	67,34±0,57	70,33±0,6	73,44±0,65	88,8±0,12	89,02±0,11	89,23±0,14
Теплотворна здатність	МДж/кг	22,506±0,54	23,029±0,57	24,970±0,51	29,648±0,53	29,681±0,46	30,033±0,49

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [42]

Суміш з використанням вугілля з кокосової шкаралупи продемонструвала відмінну калорійність при використанні в якості

металургійного коксу в доменній печі. Біококси, отримані при додаванні біомаси, карбонізація якої здійснювалась при 400, 500 і 600 °С, мали загальну теплотворну здатність понад 28,451 МДж/кг. Суміші з використанням біопалива з рисового лушпиння дали найвищу теплотворну здатність - лише $24,970 \pm 0,51$ МДж/кг. Рисове лушпиння не рекомендується як матеріал для металургійного коксу з огляду на вміст летких речовин, золи, фіксованого вуглецю, теплоти згоряння та міцності на стиск.

Результати визначення термохімічних властивостей представлені на рисунку 2.11.

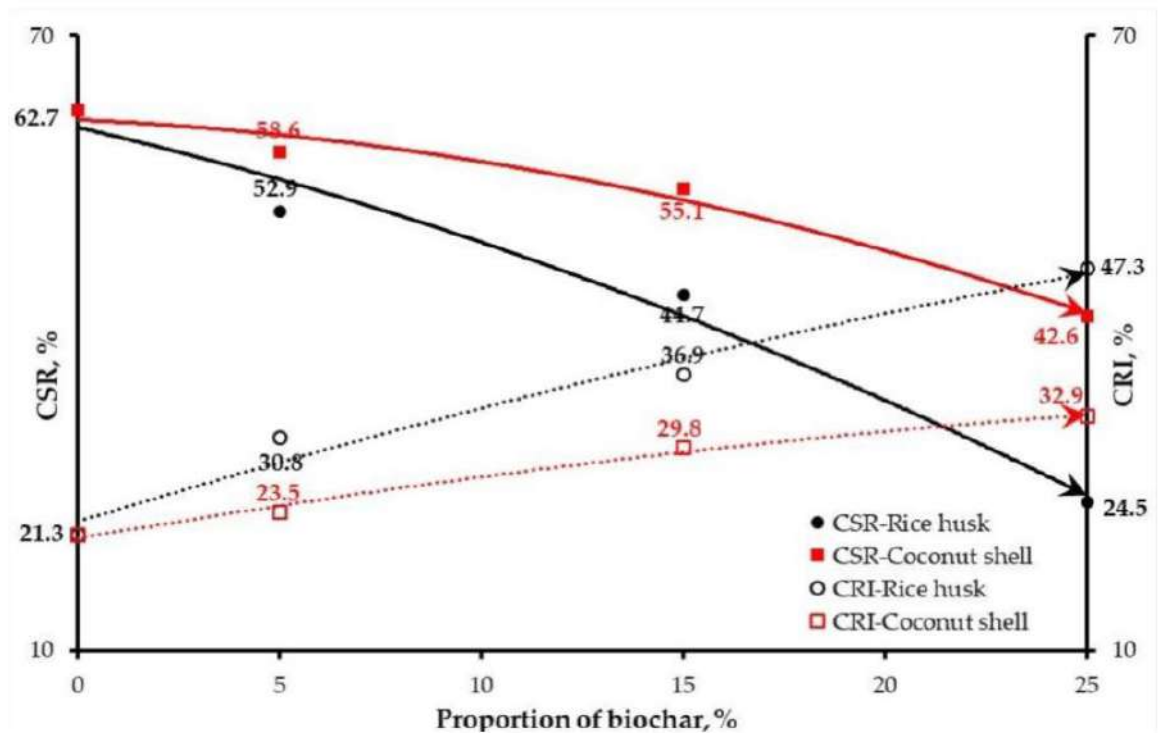


Рис.2.11. Значення CSR та CRI для шихт з різним вмістом біопалива (biochar)

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [42]

Збільшення частки біопалива (від 0 до 25 мас. %) призвело до погіршення якості коксу, в якому зі збільшенням кількості біопалива індекс CSR знизився з 62,7% до 24,5% для рисового лушпиння (чорна лінія) і з 62,7%

до 42,6% для кокосової шкаралупи (червона лінія); індекс CRI збільшився з 21,3% до 47,3% для рисового лушпиння (чорна пунктирна лінія) і з 21,3% до 32,9% для кокосової шкаралупи (червона пунктирна лінія). Однак, індекс CSR коксу, що містить шкаралупу кокосових горіхів, був дещо вищим, ніж у коксу з рисового лушпиння при однаковій кількості коксівного вугілля.

З досліджених зразків біококсів найкращі термохімічні властивості за показниками CSR та CRI демонструє біококс з суміші вугілля з паливом зі шкаралупи кокосового горіха у співвідношенні 95:5 мас. (CSR=58,6% та CRI =23,5%).

Отже, біококси, які отримали з суміші вугілля з паливом зі шкаралупи кокосового горіха у співвідношенні 85:15 та 95:5 мас., відповідають критеріям якості доменного палива. Карбонізація біомаси була здійснена при 500 °С. Біококси мали наступні характеристики по фіксованому вуглецю, теплотворній здатності та міцності: $89,02 \pm 0,11\%$ та $89,23 \pm 0,14\%$; $29,681 \pm 0,46$ МДж/кг та $30,033 \pm 0,49$ МДж/кг; $6,53 \pm 0,4$ МПа та 6,85 МПа, відповідно. Отримані продукти відповідають кільком критеріям для застосування в доменних печах (CRI і CSR).

Отже, рекомендована кількість добавки біопалива (біомаси після карбонізації при 500 °С) становить 5%.

2.4 Порівняння виробництва біококсу та традиційного коксу з точки зору вуглецевого сліду

Для проведення аналізу оцінки життєвого циклу (ОЖЦ) було авторами роботи [43] було використано програмне забезпечення SimaPro та базу даних Ecoinvent. Аналіз включав оцінку життєвого циклу, пов'язаного з виробництвом звичайного коксу та коксу, збагаченого біомасою, з акцентом на вплив цих дій на вуглецевий слід. Аналізували два варіанти включення біодобавки у вугільну суміш: 5% та 10%, припускаючи, що така кількість не призведе до значного погіршення якості кінцевого продукту – коксу. Як

правило, присутність біомаси може погіршити якість коксу за рахунок зниження його коксохімічних властивостей, таких як здатність до спікання та пластометричні властивості.

Моделювання проводилося на основі моделей баз даних, відібраних для європейської та світової коксохімічної промисловості. Метою такого підходу було визначити, чи можуть існуючі тенденції та правові рамки, пов'язані з охороною навколишнього середовища та сталим розвитком, які існують в Європі протягом тривалого часу, вплинути на екологічний контекст подальших про-екологічних дій у глобальному масштабі.

Результати аналізу життєвого циклу (АЖЦ) коксу, отриманого з використанням звичайної коксової шихти та коксової шихти, збагаченої біомасою, представлені на рисунках 2.12 і 2.13.

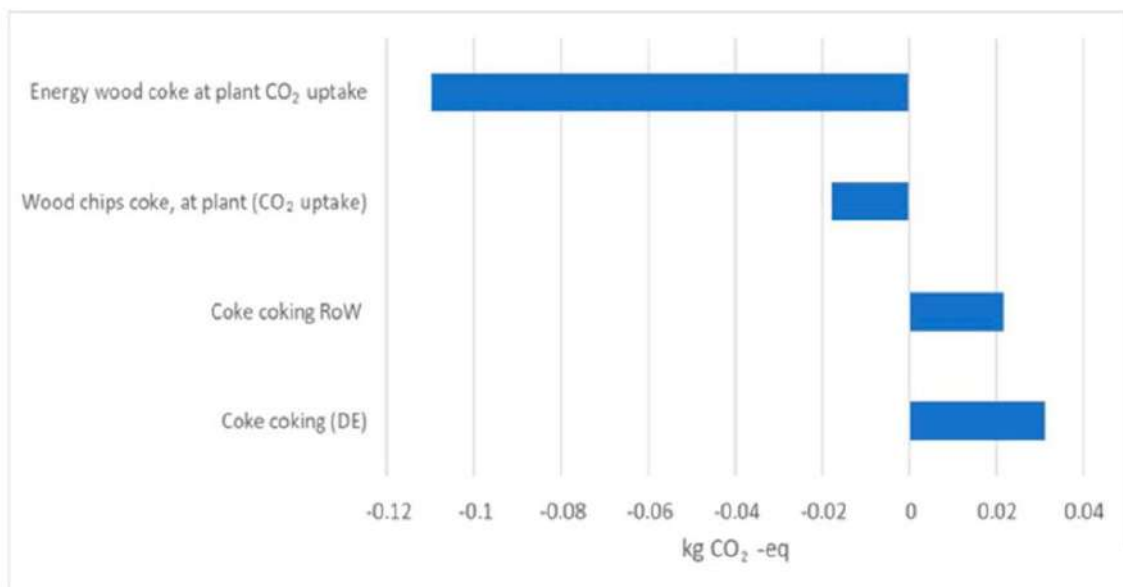


Рис.2.12. Порівняння вуглецевого сліду коксу, виробленого з вугілля та біомаси (деревна тріска суха). Розрахунок для 1 МДж енергії, закладеної в коксі (DE), дані для Німеччини (для Європи), дані RoW - для решти світу)

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [43]

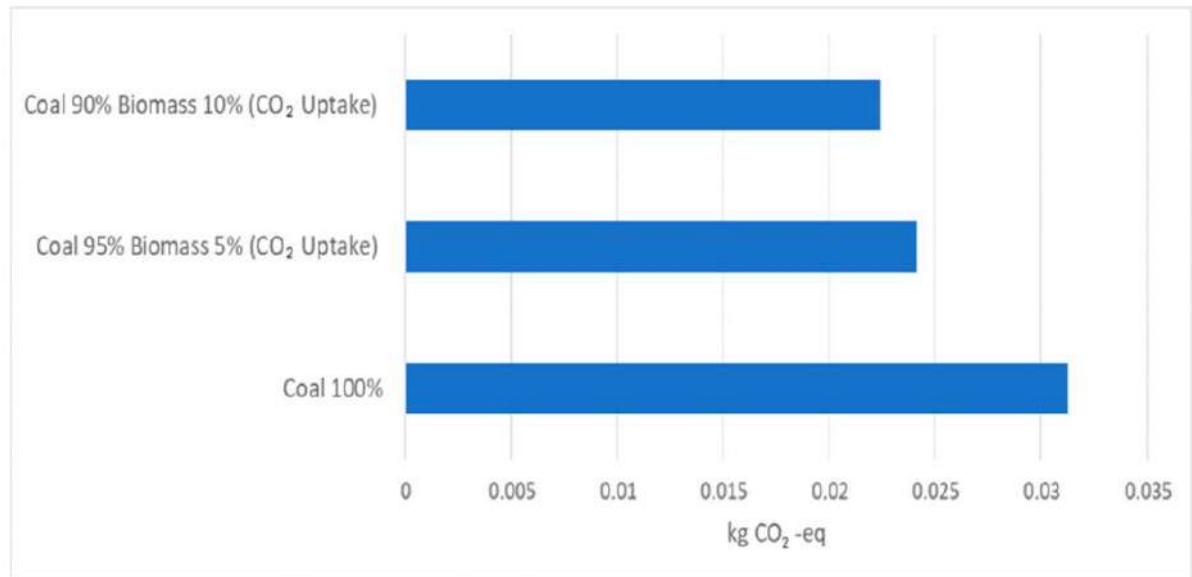


Рис.2.13. Дані визначення вуглецевого сліду різних видів коксу (отриманого з 100% кам'яного вугілля, отриманого з додаванням 5% і 10% біомаси)

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [43]

Вуглецевий слід, пов'язаний з виробництвом коксу, коливається від 0,021 до 0,03 кг еквіваленту CO₂ на МДж енергії для світового коксування. Різниця, що перевищує 10% у вуглецевому сліді традиційних технологій коксування, особливо в європейському контексті, може бути пояснена необхідністю імпорту коксівного вугілля з таких країн, як Сполучені Штати, Австралія та Південна Африка. Значні відстані, пов'язані з транспортуванням, збільшують загальний вуглецевий слід.

У Європі численні норми щодо викидів накладають на виробників і постачальників технологій додаткові вимоги щодо використання технологій з низьким рівнем викидів відповідно до норм Європейського Союзу. Ці норми, а також пов'язані з ними витрати в рамках системи торгівлі квотами на викиди CO₂ призводять до того, що європейські технології характеризуються вищою технологічною зрілістю та більшою обізнаністю урядів. Однак імпорт сировини залишається необхідним. І навпаки, нижчий вуглецевий слід, що спостерігається за межами Європи, незважаючи на те, що багато країн все ще перебувають у процесі створення нормативно-правових актів та підвищення

обізнаності щодо сталого розвитку, підкреслює значний вплив довжини та складності ланцюга постачання на визначення вуглецевого сліду. Впровадження таких норм є тривалим і складним процесом, а вимірні результати можуть бути досягнуті лише через багато років. Сталий підхід у контексті оцінки повного життєвого циклу передбачає пошук місцевих постачальників, які можуть задовольнити потреби у сировині. Впровадження легкодоступних біодобавок видається виправданим.

Дані, представлені на рисунку 2.12, показують, що біомаса має відносно високу здатність до поглинання CO_2 , приблизно 0,11 кг еквіваленту CO_2 на 1 МДж виробленої енергії. Це пояснюється тим, що дерева поглинають вуглекислий газ з атмосфери в процесі фотосинтезу, що може зменшити кінцевий вуглецевий слід даної технології. Тому на основі проведених аналізів було оцінено варіант з невеликим відсотком біомаси, що додається до вугільної шихти для коксування.

Результати проведеного аналізу вуглецевого сліду коксу та коксу, виробленого з вугільно-біомаси, представлені на рисунку 2.13, свідчать про те, що включення компонента біомаси, яка поглинає вуглекислий газ протягом свого життєвого циклу, в кінцевому підсумку призводить до зменшення вуглецевого сліду з 0,031 кг CO_2 -екв до 0,022 кг CO_2 -екв. У випадку біококсу, що містить 5% біомаси, цей показник становить 0,024 кг CO_2 -екв. У той же час, при 10% частці цього компонента викиди зменшуються до 0,022 кг CO_2 -екв. Однак було помічено, що подвоєння значного збільшення частки біомаси у вугільній суміші не призводить до пропорційного подвоєння зменшення частки вуглецевого сліду. Це свідчить про те, що для досягнення екологічних цілей щодо скорочення вуглецевого сліду може знадобитися лише помірна частка біомаси, яка, ймовірно, не погіршить якість коксу.

Біомаса може погіршити якість коксу, знижуючи його коксохімічні властивості, такі як здатність до спікання та пластометричні властивості, здатність до спікання та пластометричні властивості. Для отримання

металургійного коксу високої якості з добавкою біомаси актуальною є розробка технологій для ефективної підготовки біосировини.

Проведений аналіз показав, що включення органічних добавок до коксівних шихт є вигідним з точки зору зменшення впливу на навколишнє середовище, що вимірюється вуглецевим слідом. Місцевий та регіональний контекст залишається важливим в оцінці життєвого циклу (ОЖЦ), особливо щодо закупівлі сировини, де технічні та технологічні умови суттєво впливають на екологічні міркування. Розширені ланцюги постачання сировини мають значний вплив на загальне значення вуглецевого сліду. Тому, окрім подальшого вдосконалення рішень, для інтенсифікації комплексних зусиль зі сталого розвитку необхідна передача знань і технологій, обмін інформацією та передовим досвідом з регіонами, що перебувають на нижчих технологічних стадіях.

Крім того, останні роки показали, що окрім нестабільності, яка залежить від потенційних політичних та пандемічних ситуацій, вибір місцевих постачальників може мати значний вплив на загальний вплив на навколишнє середовище. Залишається вкрай важливим знайти оптимальний баланс між досягненням найкращих екологічних результатів, вибором місцевих постачальників і підтриманням найвищих параметрів якості виробленого біококсу, які відповідають зростаючим потребам галузей, що використовують кокс як виробничий компонент. Всі ці дії необхідні для того, щоб відповідати вимогам сталого розвитку та забезпечувати чисте, екологічно безпечне виробництво.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано вимоги до якості вугільних концентратів і шихт, які використовуються для складання вугільних шихт для виробництва доменного коксу.

Розглянуто особливості формування сировинної бази коксування для коксохімічних виробництв України. Встановлено, що для сировинної бази КХВ України характерно залучення та зростання частки вугільної сировини далекого та близького зарубіжжя. В умовах дефіциту та збільшення вартості вугільної сировини, зростання екологічного навантаження, перспективним напрямком розвитку металургійного виробництва є залучення та використання біомаси в технологічних процесах.

Проаналізовано використання деревного вугілля для різних галузей промисловості (у якості сорбенту, палива, відновника в металургійній промисловості, компонента вугільних шихт коксування, біокомпозитів, модифікації вибухових речовин тощо).

Зазначено, що біомаса є екологічно чистим джерелом енергії, яке може частково замінити викопні види палива, а напрям її використання залежить від якості та характеристик (розмір, фізичні властивості, хімічний склад), які обумовлені природою сировини (деревина або відходи сільського господарства), її хімічний складом, температурою карбонізації.

Показано, що використання сирової необробленої деревної біомаси як такої в металургійних процесах та в технології виробництва металургійного коксу не є ефективним, а потребує її переробки перед використанням. Отже, існує потреба в ефективних технологіях переробки біомаси перед її використанням з метою зменшення вологості та отримання продуктів з високим вмістом вуглецю, низьким вмістом кисню для використання в якості відновлювачів.

В наслідок карбонізації (повільного піролізу) біомаси отримують біококс, що складається переважно з вуглецю; смолу і гази, що складаються з оксидів вуглецю, легких вуглеводнів і водню. Фактори, що впливають на результат

піролізу, включають тип біомаси, температуру, швидкість нагрівання, тривалість піролізу, тип реактора та попередню обробку. Так, для використання біомаси для виробництва металургійного коксу найбільш придатною сировиною є деревна біомаса.

Наведено результати вивчення можливості використання біомаси в якості суміші з коксівним вугіллям для синтезу біококсу. Температура нагрівання біомаси до біококсу оцінювалася при 400, 500 і 600 °С. Суміш коксівного вугілля з біопаливом складала 95:5, 85:15 та 75:25 мас.

Покращення механічних властивостей коксів та біококсів фіксували з підвищенням температури карбонізації, що обумовлено збільшенням кількості просторового розташування молекулярно-орієнтованих доменів, зменшенням відстані між вуглецевими гексагональними сітками-моношарами d_{002} та збільшенням вмісту L_a . Також підвищення температури нагрівання, як правило, обумовлювало прямо пропорційне збільшення фіксованого вуглецю та теплотворної здатності.

З досліджених зразків біококсів найкращі термохімічні властивості за показниками CSR та CRI демонструє біококс з суміші вугілля з паливом зі шкаралупи кокосового горіха у співвідношенні 95:5 мас. (CSR=58,6% та CRI =23,5%). Отже, можна рекомендувати добавку біопалива (біомаси після карбонізації при 500 °С) до вугільної шихти для коксування у кількості 5%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hannu Suopajarvi, Kentaro Umeki, Elsayed Mousa, Ali Hedayati, Henrik RomarAntti Kemppainen, Chuan Wang. Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low-CO₂ steel production technologies. *Applied Energy*. Volume 213. 2018, P. 384-40.
2. Ковалев Е.Т., Дроздник И.Д., Кафтан Ю.С. Особенности формирования угольной сырьевой базы коксохимических предприятий Украины в современных условиях. *Углекимический журнал*. 2015. №3. С. 8–14.
3. Дроздник И.Д., Мирошниченко Д.В. Особенности формирования и перспективы развития угольной сырьевой базы коксохимического производства КХП ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». *Углекимический журнал*. 2016. № 3-4. С. 12-18.
4. Łaska, G.; Ige, A.R. A Review: Assessment of Domestic Solid Fuel Sources in Nigeria. *Energies*. 2023. 16. 4722. <https://doi.org/10.3390/en16124722>
5. Pyshyev, S.; Miroshnichenko, D.; Malik, I.; Bautista Contreras, A.; Hassan, N.; Abd ElRasoul, A. State of the art in the production of charcoal: a review. *Chem. Chem. Technol.* 2021. 15. 1. 61–73. <https://doi.org/10.23939/chcht15.01.061>
6. Miroshnichenko, D.; Shmeltser K.; Kormer M. Factors Affecting the Formation the Carbon Structure of coke and the Method of Stabilizing its Physical and Mechanical Properties. *C-Journal of Carbon Research*. 2023. 9(3). 66. <https://doi.org/10.3390/c9030066>.
7. Bannikov, L.; Miroshnichenko, D.; Pylypenko, O.; Pyshyev, S.; Fedevych, O.; Meshchanin, V. Coke Quenching plenum equipment corrosion and its dependents on the quality of the biochemically treated water of the coke-chemical production. *Chem. Chem. Technol.* 2022. 16 (2). 328-336. <https://doi.org/10.23939/chcht16.02.328>.
8. Drozdник, I.D.; Miroshnichenko, D.V.; Shmeltser, E.O.; Kormer, M.V.; Pyshyev, S.V. Investigation of possible losses of coal raw materials during its

- technological preparation for coking message. 1. The actual mass variation of coal in the process of its storage and crushing. *Pet. Coal*. 2019. 61(3). 631-637.
9. Lyalyuk, V.P., Shmeltser, E.O., Kassim, D.A. Improving the technology production of coke for blast furnace smelting. Octan Print, Praga: 2022. – 197 p. <https://doi.org/10.46489/ITTPOC-229>
10. Malik, I.K.; Miroshnichenko, D.V.; Contreras, A.B.; Hassan N.; El Rasoul A.A. Prediction of the higher heating value of charcoal. *Pet. Coal*. 2022. 64. 1. 100-105.
11. Long, John M.; Boyette, Michael D. Analysis of Micronized Charcoal for Use in a Liquid Fuel Slurry. *Energies*. 2017. 10. 25. <https://doi.org/10.3390/en10010025>
12. Straka, T.J. Charcoal as a Fuel in the Ironmaking and Smelting Industries. *Advances in Historical Studies*. 2017. 6. 1. <https://doi.org/10.4236/ahs.2017.61004>
13. Nga, K.W.; MacPhee, J.A.; Giroux, L.; Todoschuk, Ted. Reactivity of bio-coke with CO₂. *Fuel Processing Technology*. 2011. 92. 4. 801-804. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.08.005>
14. Jahanshani, S.; Mathieson, J.G.; Somerville, M.A.; Haque, N.; Norgate, T.E.; Deev, A.; Pan, Y.; Xie, D.; Ridgeway, P.; Zulli, P. Development of low-emission integrated steelmaking process. *J. Sustain. Metall.* 2015. 1. 94–114. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0008-6>
15. Suopajärvi, H.; Pongrácz, E.; Fabritius, T. The potential of using biomass-based reducing agents in the blast furnace: A review of thermochemical conversion technologies and assessments related to sustainability. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013. 25. 511–528. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.005>
16. Suopajärvi, H.; Dahl, E.; Kemppainen, A.; Gornostayev, S.; Koskela, A.; Fabritius, T. Effect of Charcoal and Kraft-Lignin Addition on Coke Compression Strength and Reactivity. *Energies*. 2017. 10. 1850. <https://doi.org/10.3390/en10111850>

17. Suopajarvi, H.; Kemppainen, A.; Haapakangas, J.; Fabritius, T. Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes. *J. Clean. Prod.* 2017. 148. 709–734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.029>
18. Sundqvist Ökvist, L.; Lundgren, M. Experiences of Bio-Coal Applications in the Blast Furnace Process-Opportunities and Limitations. *Minerals*. 2021. 11. 863. <https://doi.org/10.3390/min11080863>
19. Brooks, B.; Khoshk Rish, S.; Lomas, H.; Jayasekara, A.; Tahmasebi, A. Advances in low carbon cokemaking – Influence of alternative raw materials and coal properties on coke quality. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023. 173. 106083. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106083>
20. Suopajarvi, H.; Umeki, K.; Mousa, E.; Hedayati, A.; Romard, H.; Kemppainen, A.; Wang, C.; Phounglamcheik, A.; Tuomikoski, S.; Norberg, N., et al. Use of biomass in integrated steelmaking—Status quo, future needs and comparison to other low-CO₂ steel production technologies. *Appl. Energy*. 2018. 213. 384–407. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.060>
21. Mousa, E.; Wang, C.; Riesbeck, J.; Larsson, M. Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 2016. 65. 1247–1266. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.061>
22. Mousa, E.A.; Ahmed, H.M.; Wang, C. Novel Approach Towards Biomass Lignin Utilization in Ironmaking Blast Furnace. *ISIJ Int* 2017. 57. 1788–96. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-127>
23. Mathieson, J.G.; Somerville, M.; Deev, A.; Jahanshahi, S. Utilization of biomass as an alternative fuel in ironmaking. In *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, 1st ed., Lu, L., Ed., Woodhead Publ. Elsevier Ltd.: Cambridge, UK, Waltham, MA, USA, 2015, 581–609. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-156-6.00019-8>
24. Ooi, T.C.; Aries, E.; Ewan, B.C.; Thompson, D.; Anderson, D.R.; Fisher, R.; Fray, T.; Tognarelli, D. The study of sunflower seed husks as a fuel in the iron

- ore clinkering process. *Miner Eng.* 2008. 21. 167–77.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.09.005>
25. Gan, M.; Fan, X.; Ji, Z.; Jiang, T.; Chen, X.; Yu, Z.; Li, G.; Yin, L. Application of biomass fuel in iron ore clinkering: influencing mechanism and emission reduction. *Ironmaking Steelmaking.* 2015. 42. 27–33.
<https://doi.org/10.1179/1743281214Y.0000000194>
26. Cheng, Z.; Yang, J.; Zhou, L.; Liu, Y.; Wang, Q. Characteristics of charcoal combustion and its effects on iron-ore clinkering performance. *Appl Energy.* 2016. 161. 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.095>
27. Amanat, N.; Tsafnat, N.; Loo, B.C.E.; Jones, A.S. Metallurgical coke: An investigation into compression properties and microstructure using X-ray microtomography. *Scr. Mater.* 2009. 60. 92–95.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.09.003>
28. Kim, S.Y.; Sasaki, Y. Simulation of Effect of Pore Structure on Coke Strength Using 3-dimensional Discrete Element Method. *ISIJ Int.* 2010. 50. 813–821.
29. Haapakangas, J.; Uusitalo, J.; Mattila, O.; Kokkonen, T.; Porter, D.; Fabritius, T. A method for evaluating coke hot strength. *Steel Res. Int.* 2013. 84. 65–71.
<https://doi.org/10.1002/srin.201200078>
30. Haapakangas, J.A.; Uusitalo, J.A.; Mattila, O.J.; Gornostayev, S.S.; Porter, D.A.; Fabritius, T. The Hot Strength of Industrial Cokes—Evaluation of Coke Properties that Affect Its High-Temperature Strength. *Steel Res. Int.* 2014, 85, 1608–1619. <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100082>
31. Bittencourt Marques, M.; Rodrigues Assis, A.; Benício Dias, S.M.; Harley Araújo, F.; Junqueira dos Santos, R. Co-injeção de gás natural moinha de carvão vegetal e carvão mineral no alto-forno “A” da Arcelormittal Monlevade. In Proceedings of the 41 Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas Conference, Vila Vehlá, Brazil, 12–16 September 2011.
<https://doi.org/10.5151/2594-357X-24003>
32. Mahottamananda, S.N.; Pal, Y.; Dinesh, M.; Ingenito, A. Beeswax – EVA/Activated-Charcoal-Based Fuels for Hybrid Rockets: Thermal and

- Ballistic Evaluation. *Energies* 2022, 15, 7578.
<https://doi.org/10.3390/en15207578>
33. Sanjay, M.R.; Arpitha, G.R.; Naik, L.L.; Gopalakrishna, K.; Yogesha, B. Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview. *Natural Resources* 2016, 7, 108-114. <http://dx.doi.org/10.4236/nr.2016.73011>
34. Delatorre, F.M.; Cupertino, G.F.M.; Oliveira, M.P.; da Silva Gomes, F.; Profeti, L.P.R.; Profeti, D.; Júnior, M.G.; de Azevedo, M.G.; Saloni, D.; Júnior, A.F.D. A Novel Approach to Charcoal Fine Waste: Sustainable Use as Filling of Polymeric Matrices. *Polymers* 2022, 14, 5525.
<https://doi.org/10.3390/polym14245525>
35. Ighalo, J.O.; Eletta, O.A.A.; Adeniyi, A.G. Biomass carbonisation in retort kilns: Process techniques, product quality and future perspectives. *Bioresource Technology Reports* 2022, 17. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100934>
36. Raček, J. et al. Biochar production from the pyrolysis of food waste: Characterization and implications for its use. *Sustain Chem Pharm.* 2023, 37. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101387>
37. Godvin Sharmila, V.; Kumar Tyagi, V.; Varjani, S.; Rajesh Banu, S. A review on the lignocellulosic derived biochar-based catalyst in wastewater remediation: Advanced treatment technologies and machine learning tools. *Bioresource Technology* 2023, 387. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129587>
38. Cui, X. et al. Pyrolysis of exhausted hydrochar sorbent for cadmium separation and biochar regeneration. *Chemosphere* 2022, 306. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135546>
39. Ambaye, T.G.; Formicola, F.; Sbaffoni, S.; Milanese, C.; Franzetti, A.; Vaccari M. Effect of biochar on petroleum hydrocarbon degradation and energy production in microbial electrochemical treatment. *J Environ Chem Eng.* 2023, 11, 5. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110817>
40. Qi, Y. et al. Subsurface constructed wetlands with modified biochar added for advanced treatment of tailwater: Performance and microbial communities.

Science of the Total Environment 2023, 906.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167533>

41. Bazaluk, O.; Kieush, L.; Koveria, A.; Schenk, J.; Pfeiffer, A.; Zheng, H.; Lozynskyi, V. Metallurgical Coke Production with Biomass Additives: Study of Biocoke Properties for Blast Furnace and Submerged Arc Furnace Purposes. *Materials* 2022, 15, 1147. <https://doi.org/10.3390/ma15031147>
42. Yustanti, E.; Wardhono, E.Y.; Mursito, A.T.; Alhamidi, A. Types and Composition of Biomass in Biocoke Synthesis with the Coal Blending Method. *Energies*. 2021. 14. 6570. <https://doi.org/10.3390/en14206570>
43. Krupanek, J.; Gałko, G.; Sajdak, M.; Pogrzeba, M. Comparison of Bio-Coke and Traditional Coke Production with Regard to the Technological Aspects and Carbon Footprint Considerations. *Energies*. 2024. 17. 2978. <https://doi.org/10.3390/en17122978>

**Декларація
про дотримання академічної доброчесності
під час написання курсової/кваліфікаційної роботи
здобувачем вищої освіти
Державного університету економіки і технологій**

Я, Скуратов Владислав Андрійович, студент II курсу, групи ХТ-23м Державного університету економіки і технологій розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) заборонену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текст в інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

10.01.2025



В. Скуратов

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
 НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
 Кафедра Хімічних технологій та інженерії

**ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ
 МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ**

Здобувача Скуратова Владислава Андрійовича

(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи ХТ-23-м

Тема кваліфікаційної роботи магістра

Використання біопалива у виробництві коксу для доменної плавки

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка	<u>73;</u>
таблиць	<u>16;</u>
схем і рисунків	<u>15;</u>
листів графічної частини(демонстраційного матеріалу)	<u>-.</u>

Якісні відмінності кваліфікаційної роботи магістра

Кваліфікаційна робота присвячена розробці методу використання біомаси в якості компонента вугільної шихти для синтезу біококсу, що задовольняє вимоги сучасної доменної плавки.

Проаналізовано перспективні напрямки використання деревного вугілля для різних галузей промисловості (у якості сорбенту, палива, відновника в металургійній промисловості, компонента вугільних шихт коксування, біокомпозитів, модифікації вибухових речовин тощо).

В кваліфікаційній роботі на основі досліджених літературних джерел та аналізу даних лабораторних та дослідно-промислових випробувань запропоновано технологію використання термічнообробленої біомаси в якості компонента вугільних шихт для коксування.

Встановлено, що з досліджених зразків біококсів найкращі термохімічні властивості за показниками CSR та CRI демонструє біококс з суміші вугілля з паливом зі шкаралупи кокосового горіха у співвідношенні 95:5 мас. (CSR=58,6% та CRI =23,5%). Надано рекомендації щодо кількісних характеристик та параметрів процесу внесення добавки біопалива (біомаси після карбонізації при 500 °C) у вугільні шихти для виробництва біококсу.

Недоліки кваліфікаційної магістерської роботи

Не проаналізовано ресурси біомаси для умов України. В деяких місцях пояснювальної записки допущені стилістичні та орфографічні помилки та огріхи, в тексті зустрічається невдалий переклад.

Характеристика загальної, спеціальної і виробничої підготовки автора кваліфікаційної магістерської роботи, ступінь самостійності виконання роботи, уміння користуватися літературними матеріалами

Здобувач Скуратов В.А. під час написання кваліфікаційної магістерської роботи показав добру загальну та спеціальну підготовку, вміння працювати з літературними та нормативними джерелами. Над розділами роботи працював самостійно, висновки та розроблені рекомендації є актуальними, ефективними та економічно обґрунтованими.

Можливість використання кваліфікаційної магістерської роботи

Розроблені рішення та рекомендації по впровадженню технології використання термічнообробленої біомаси в якості компонента вугільних шихт для коксування можуть бути використані в умовах вугледготовчого цеху КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

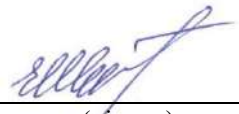
Оцінка кваліфікаційної магістерської роботи добре/85/В

Керівник Шмельцер Катерина Олегівна

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Зав. кафедри, к.т.н, доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



(підпис)

« 15 » січня 2025 р.

*Примітка. Бланк друкується з обох сторін на одному аркуші.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ДОВІДКА

про підготовку здобувача-випускника

Скуратова Владислава Андрійовича
(прізвище, ім'я та по-батькові)

Кафедра Хімічних технологій та інженерії
Спеціальність 161 Хімічних технологій та інженерії

Назва кваліфікаційної роботи Кваліфікаційна магістерська робота

Тема кваліфікаційної роботи Використання біопалива у виробництві коксу
для доменної плавки

Керівник кваліфікаційної роботи: зав.кафедри, к.т.н. Шмельцер К.О.
(посада, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

Оцінки по розділах роботи

№ з/п	Найменування розділу проекту (роботи)	Консультант	Зараховано / не зараховано	Дата	Підпис консультанта	Примітка
1	Аналітична частина	Шмельцер К.О.	зарах	15.01	<i>Шмельцер</i>	
2	Основна частина	Шмельцер К.О.	зарах	15.01	<i>Шмельцер</i>	
3						
4						

Завідувач кафедри

Шмельцер
(підпис)

К.О. Шмельцер
(ініціали, прізвище)

« 15 » січня 2025 р.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
 НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
 Кафедра Хімічних технологій та інженерії

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу магістра (бакалавра, магістра)
 Здобувача Скуратова Владислава Андрійовича
 (прізвище, ім'я та по-батькові)

Групи
Тема кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> (бакалавра, магістра)
Використання біопалива у виробництві коксу для доменної плавки
Тема спеціальної частини кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> (бакалавра, магістра)
Вибір та обґрунтування технології використання біопалива як компонента вугільної шихти з метою розширення сировинної бази коксування
Переваги кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> (бакалавра, магістра)
В кваліфікаційній роботі на основі досліджених літературних джерел та аналізу даних лабораторних та дослідно-промислових випробувань запропоновано перспективну технологію використання термічнообробленої біомаси в якості компонента вугільних шихт для коксування. Надано рекомендації щодо кількісних характеристик та параметрів процесу внесення добавки біопалива.
Недоліки кваліфікаційної роботи <u>магістра</u> (бакалавра, магістра)
Не проаналізовано ресурси біомаси для сировинних умов України.
Рекомендації: робота може бути рекомендована до захисту.
Рецензент <u>Жормир Марина Віталіївна</u> (прізвище, ім'я та по-батькові)

К. Хіміч. Н., доцент
 (посада, науковий ступінь, вчене звання)

Жормир
 (підпис)