

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 БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Солдатенко Катерини Олександрівни

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему **Петрографічні аспекти формування гарячої міцності
коксу при карбонізації вугілля**
(повна назва теми)

за матеріалами **Публічного акціонерного товариства «АрселорМіттал
Кривий Ріг»**
(повна назва бази дослідження)

Науковий керівник **к.т.н, доцент** _____ **Шмельцер К. О.**
(наук. ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 20__ р. № ____

Завідувач кафедри _____

(підпис)

Наук. ступень, вчене звання Ініціали, прізвище

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

Рівень вищої освіти бакалавр
 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)
 « _____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Солдатенко Катерини Олександрівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Петрографічні аспекти формування гарячої міцності коксу при карбонізації вугілля

керівник кваліфікаційної роботи бакалавра Шмельцер Катерина Олегівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу №227-ст від «б» квітня 2026 р.

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2026р.

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи бакалавра Техніко-економічні показники роботи КХВ ПАТ «АМКР»

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1 Аналітична частина: аналіз науково-технічної літератури щодо сучасних уявлень про механізми формування гарячої міцності доменного коксу та роль петрографічних характеристик вугілля у цьому процесі. Характеристика основних показників гарячої міцності коксу (CSR, CRI) та факторів, що впливають на їх формування в процесі карбонізації вугільної шихти. Вплив петрографічних характеристик вугілля на процеси пластичного стану, коксоутворення і формування структури коксу.

4.2 Основна частина: аналіз можливості прогнозування показників гарячої міцності коксу на основі петрографічних характеристик вугільної сировини. Розробка практичні рекомендацій щодо використання петрографічних показників при формуванні складу вугільних шихт для одержання коксу з підвищеною гарячою міцністю. Екологічні аспекти, питання охорони праці та

безпеки виробничих процесів на коксохімічному виробництві

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., доцент		
2 Основна частина	Шмельцер К.О., доцент		

7. Дата видачі завдання «6» квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	12.05.2026	
2.	Основна частина	26.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	29.05.2026	
4.	Подання роботи до кафедри	01.06.2026	
5.	Захист роботи в ЕК	16.06.2026	

Здобувач

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

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

АНОТАЦІЯ

Солдатенко К.О. Петрографічні аспекти формування гарячої міцності коксу при карбонізації вугілля. — Дипломна робота бакалавра зі спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія». Державний університет економіки і технологій, Навчально-науковий технологічний інститут, кафедра хімічних технологій та інженерії. — Кривий Ріг, 2025.

Дипломна робота містить перелік умовних скорочень, вступ, 2 розділи, висновки, список використаних джерел із 14 найменувань. Основний текст роботи містить 12 таблиць, 9 рисунків.

Об'єкт дослідження — процес формування гарячої міцності металургійного коксу при карбонізації вугілля в умовах КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Предмет дослідження — вплив петрографічних характеристик вугільної шихти (показника відбиття вітриніту R_o , вмісту фюзенізованих компонентів ΣOK , стандартного відхилення рефлектограми σR) та мінерального складу золи (індекс основності I_o) на показник гарячої міцності коксу після реакції (CSR).

Мета роботи — дослідження петрографічних аспектів формування гарячої міцності коксу та розробка рекомендацій щодо оптимізації складу вугільної шихти в умовах реструктурованої після лютого 2022 р. сировинної бази КХВ АМКР.

В аналітичній частині проаналізовано технологічні операції та устаткування вуглепідготовчого цеху КХВ АМКР, описано методіку визначення показників CRI та CSR за ДСТУ ISO 18894:2009, встановлено нормативні вимоги до якості доменного коксу ($CSR \geq 60 \%$, $CRI \leq 30 \%$). Охарактеризовано три групи мацералів органічної маси вугілля та їх роль при карбонізації. Встановлено принципову відмінність петрографічного складу вугілля Австралії та США від донецьких аналогів: при близьких значеннях R_o

≈ 1,07 % вміст мацералів групи інертиніту Σ ОК у 2–3 рази вищий (18–42 % проти 7–14 %), а стандартне відхилення рефлектограми σ_R у 3–4 рази більше (0,138–0,142 % проти 0,038–0,062 %).

В основній частині проведено мацеральний і рефлектограмний аналіз вугільних концентратів різних сировинних басейнів; досліджено вплив R_o , Σ ОК та індексу основності золи I_o на показники гарячої міцності коксу; побудовано і верифіковано математичні моделі прогнозування CSR. Встановлено, що зниження R_o шихти з 1,16 до 1,07 % у поєднанні зі зростанням Σ ОК з 10 до 14 % знижує CSR на 2,2 % абс. Двопараметрична модель прогнозування «вихід коксу = $f(R_o, \Sigma$ ОК)» має коефіцієнт детермінації $D = 98$ % та $\sigma = 0,4$ %, що суттєво перевищує точність однопараметричної моделі на основі виходу летких речовин ($D = 92$ %). Сформульовано п'ять принципів формування оптимальної шихти та визначено цільові петрографічні параметри: $R_o = 1,10$ – $1,30$ %, Σ ОК = 15–25 %, $\sigma_R \leq 0,12$ %, $I_o \leq 0,30$. Розглянуто екологічні аспекти роботи КХВ, шкідливі та небезпечні виробничі чинники у ВПЦ та КЦ № 1, заходи щодо зменшення їх впливу.

Ключові слова: кокс металургійний, гаряча міцність коксу, CSR, CRI, петрографічний аналіз, показник відбиття вітриніту, мацеральний склад, інертиніт, вугільна шихта, АрселорМіттал Кривий Ріг.

ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	12
1.1 Технологічні операції та устаткування вуглепідготовчого цеху	12
1.2 Вимоги до якості сировини та продукції коксохімічного виробництва	16
1.2.1 Класифікація та характеристика вугілля для коксування	16
1.2.2 Основні показники якості доменного коксу та нормативні вимоги	17
1.3 Реакційна здатність (CRI) та гаряча міцність (CSR) доменного коксу	19
1.3.1 Методики визначення показників CRI та CSR	19
1.3.2 Фактори впливу на реакційну здатність коксу	21
1.4 Петрографічні характеристики вугілля як фактор якості коксу	22
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	26
2.1 Петрографічний склад вугілля та його роль у формуванні гарячої міцності коксу	26
2.1.1 Мацеральний склад вугілля: вітриніт, інертиніт та їх властивості при карбонізації	26
2.1.2 Показник відбиття вітриніту R _г як індикатор ступеня метаморфізму вугілля	29
2.2 Вплив ступеня метаморфізму та вмісту інертиніту на показник CSR	30
2.2.1 Залежність CSR від показника відбиття вітриніту при варіюванні складу шихти	30

2.2.2 Роль спікливихта опіснюючих компонентів у формуванні міцності коксу	34
2.3 Вплив мінеральних компонентів вугілля на гарячу міцність коксу	35
2.3.1 Каталітична активність зольних компонентів при газифікації коксу CO ₂	35
2.3.2 Індекс основності золи (BAR, I _o) та його вплив на показник CSR	37
2.4 Математична модель оцінки показника гарячої міцності коксу CSR	39
2.4.1 Параметри моделі та коефіцієнти рівняння регресії	39
2.4.2 Верифікація моделі та практичне застосування для промислових шихт	39
2.5 Вибір та обґрунтування технологічних прийомів вуглепідготовки з урахуванням петрографічних характеристик	44
2.5.1 Принципи формування оптимального складу вугільної шихти в умовах багатобасейнової сировинної бази	44
2.5.2 Прогнозування CSR за петрографічними показниками компонентів шихти	45
2.6 Екологічні аспекти роботи коксохімічного виробництва	47
2.7 Шкідливі та небезпечні чинники у вуглепідготовчому та коксовому цехах	48
2.8 Заходи щодо зменшення впливу шкідливих чинників	49
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

A ^d	зольність вугілля / коксу на суху масу, %
ПАТ АМКР	ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»
BAR	індекс основності золи (Basicity Ratio) без Fe ₂ O ₃
CRI	індекс реакційної здатності коксу (Coke Reactivity Index), %
CSR	міцність коксу після реакції (Coke Strength after Reaction), %
ДСТУ	Державний стандарт України
I	Вміст мацералів групи інертиніту, %
I _o	Індекс основності золи за хімічним складом (без Fe ₂ O ₃)
I _{o,4}	I _o за чотирма оксидами: SiO ₂ /(Fe ₂ O ₃ +CaO+Na ₂ O)
ISO	International Organization for Standardization
KXB	Коксохімічне виробництво ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»
ЛМ	вміст мацералів групи ліптиніту, %
M ₁₀	частка фракції < 10 мм після барабанного випробування, %
M ₂₅	частка фракції > 25 мм після барабанного випробування, %
M ₄₀	частка фракції > 40 мм після барабанного випробування, %
OMB	органічна маса вугілля
ПВП	пиловугільне паливо
R _o / R _r	середній довільний показник відбиття вітриніту, %
S _t ^d	вміст загальної сірки на суху масу, %
t _c	температура розтікання золи, °C
УХІН	Український науково-дослідний вуглехімічний інститут (Харків)
U _o	комплексний показник основності золи (з урахуванням A ^d та V ^{daf})
V ^{daf}	вихід летких речовин на суху беззольну масу, %
V _t	вміст мацералів групи вітриніту, %
ВПЦ	вуглепідготовчий цех
ПАТ	публічне акціонерне товариство
ΣОК	сума фюзенізованих компонентів (інертиніт + 2/3 семівітриніту), %
σ _R	стандартне відхилення рефлектограми вітриніту, %
y	товщина пластичного шару, мм

ВСТУП

Металургійний кокс є незамінним компонентом доменного виробництва, виконуючи одночасно функції відновника, джерела теплової енергії та структуроутворюючого агента, що забезпечує газопроникність стовпа шихти у печі. В умовах сучасного доменного виробництва — підвищеного тиску дуття, вприскування пиловугільного палива (ПВП) та збільшеної висоти стовпа засипки — вимоги до якості коксу суттєво посилилися. Серед чисельних показників якості ключову роль набувають показники гарячої міцності: реакційна здатність (CRI) та міцність після реакції (CSR), що характеризують поведінку коксу в розпеченій зоні доменної печі.

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (АМКР) є одним із найбільших інтегрованих металургійних підприємств України та Європи, у структурі якого функціонує коксохімічне виробництво (КХВ), що включає вуглепідготовчий цех та одинадцять коксових батарей. До 24 лютого 2022 р. сировинна база КХВ АМКР мала принципово багатобасейновий характер і включала, поряд із вугіллям українських басейнів, значну частку імпортного вугілля з Кузнецького, Печорського та Південно-Якутського (Росія) басейнів — загалом до 20–25 % шихти. Після початку повномасштабного вторгнення Росії в Україну АМКР, як і всі металургійні підприємства країни, повністю та незворотно відмовилося від постачання будь-якого російського вугілля [1].

Реструктуризація сировинної бази відбулася у стислі строки: частки Австралії, США та Канади у постачанні суттєво зросли та компенсували втрачені обсяги. Проте вугілля з цих країн характеризується принципово іншим петрографічним складом: підвищеним вмістом мацералів групи інертиніту ($\Sigma\text{OK} = 20\text{--}45\%$ проти $5\text{--}15\%$ для донецького аналогу) та ширшим розкидом значень показника відбиття вітриніту ($\sigma_R = 0,10\text{--}0,18\%$). Ці відмінності унеможливають застосування класичних одновимірних моделей

прогнозування якості коксу, побудованих лише на виході летких речовин V^{daf} , і зумовлюють необхідність комплексного петрографічного підходу [6, 8].

Метою дипломної роботи є дослідження петрографічних аспектів формування гарячої міцності коксу при карбонізації вугілля на базі КХВ АМКР та розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо оптимізації складу вугільної шихти в умовах реструктурованої — без російського вугілля — сировинної бази.

Для досягнення мети вирішуються такі завдання:

- аналіз технологічних операцій та устаткування ВПЦ КХВ АМКР;
- дослідження нормативних вимог до якості вугільної сировини та доменного коксу;
- характеристика методик визначення CRI та CSR за ISO 18894;
- аналіз впливу петрографічного складу шихти (R_o , ΣOK , σ_R) на формування CSR;
- дослідження каталітичної ролі мінеральних компонентів вугілля (індекс основності золи I_o);
- розробка та верифікація математичної моделі прогнозування CSR;
- обґрунтування технологічних прийомів підготовки шихти з урахуванням петрографічних характеристик імпортного вугілля.

Об'єкт дослідження — процес формування гарячої міцності металургійного коксу при карбонізації вугілля.

Предмет дослідження — вплив петрографічних (V_t , ΣOK , R_o , σ_R) та мінеральних (I_o , U_o , VAR) характеристик компонентів вугільної шихти на показник CSR.

Виконання роботи відбулося з використанням комплексного підходу, який включав аналіз науково-технічних джерел для уточнення фізико-хімічних та петрографічних понять, порівняльний аналіз існуючих прогностичних моделей якості коксу, методи математико-статистичного моделювання (зокрема регресійного аналізу параметрів вугільної шихти), а

також аналіз практичного кейсу щодо оцінки гарячої міцності коксу в умовах діючого виробництва.

Інформаційною базою дослідження є наукові статті з проблем коксохімії, вуглехімії та металургійного виробництва, виробничо-технічна звітність коксохімічного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», внутрішні нормативні та технологічні документи підприємства, що регулюють процеси вуглепідготовки та коксування, результати промислових лабораторних випробувань показників CRI та CSR, а також державні та міжнародні стандарти, аналітичні матеріали, підручники, навчальні посібники та ресурси мережі Інтернет.

Для підготовки та оформлення роботи використовувалися засоби ПЕОМ, зокрема програмне забезпечення Windows 11, Microsoft Word, Microsoft Excel.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технологічні операції та устаткування вуглепідготовчого цеху

До складу коксохімічного виробництва (КХВ) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (АМКР) входять такі основні цехи: вуглепідготовчий (ВПЦ), коксовий № 1 (КЦ № 1), цех уловлювання та цех сіркоочищення [1]. Загальну виробничу структуру наведено на рис. 1.1.



**Рис. 1.1. Виробнича структура КХВ ПАТ
«АрселорМіттал Кривий Ріг»**

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1].

ВПЦ відновлено та введено в експлуатацію у лютому 1949 р. Виробнича потужність цеху з виробництва вугільної шихти (суха вага) складає 2 967 тис. тонн на рік для забезпечення КБ № 3, 4, 5, 6 [1]. До складу ВПЦ входять три дільниці: складу вугілля, дробильна та змішувальна.

Технологічний маршрут вуглепідготовки охоплює такі послідовні операції.

Прийом та складування вугілля. Вугільні концентрати надходять залізничним транспортом. Для розвантаження застосовується вагоноперекидач типу ВРС-93/110 М, а для розігріву змерзлого вугілля — гараж розморожування (введений в експлуатацію у 1965 р.) [1]. Зберігання здійснюється у закритому складі вугілля (ЗСВ) проектною місткістю 170 тис. тонн, що складається із 68 силосів ємністю 2 500 т кожен, зведених у три черги (1969, 1971, 1987 рр.) [1].

Дозування вугілля. Складання шихти та дозування її компонентів здійснюється у дозувальному відділенні ЗСВ. Встановлено автодозатори типу MTD1427 фірми «Schenck» та збірні конвеєри для подачі готової шихти або її групових компонентів. На КХВ АМКР вперше в Україні розроблено автоматизовану систему «ПОТІК» (на базі обладнання фірм «Siemens» та «Mitsubishi»), що забезпечує точність дозування до 0,5 % [1].

Дроблення. Застосовуються дві схеми: ГДК — групове дроблення компонентів (I та II черги дозувального відділення) та ДШ — дроблення шихти (III черга). Для фінішного подрібнення у 2016 р. в рамках реконструкції КБ № 5, 6 встановлено дробарки фірми SANDVIK (Швеція) — єдині в Україні машини такого класу, що дозволяють регулювати ступінь подрібнення шихти [1]. Оптимальний ступінь помелу шихти становить 73–78 % класу менш ніж 3 мм [2].

Змішування та подача шихти. Змішувальна дільниця — багатоповерхова споруда, звідки вугільна шихта конвеєрами подається до вугільних башт № 1 (КБ № 3), № 5 (КБ № 3, 4) та № 2 (КБ № 5, 6). У 2016 р. виконано реконструкцію змішувального відділення; для оперативного контролю вологості встановлено аналізатор типу РСС-МА 110 [1].

Характеристику основного обладнання ВПЦ наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

**Характеристика основного обладнання ВПЦ КХВ ПАТ
«АрселорМіттал Кривий Ріг»**

Обладнання	Тип / марка	К-сть, од.	Основні параметри	Призначення
Вагоперекидач	ВРС-93/110 М	1	Роторний, закритий тип	Розвантаження вугілля з залізничних вагонів
Гараж розморожування	—	1	Введено в 1965 р.	Розігрів замерзлого вугільного концентрату
Закритий склад вугілля (ЗСВ)	68 силосів	68	2 500 т кожен; ємність 170 тис. т	Зберігання та дозування концентратів за марками
Автодозатор	MTD1427 «Schenck»	≥14	Точність ± 0,5 %	Дозування компонентів шихти
Молоткова дробарка	Молоткова (I–II черга)	4	Схема ГДК та ДШ	Дроблення групових компонентів та готової шихти
Дробарка SANDVIK	SANDVIK (Швеція)	2	Регульований ступінь помелу; 73–78 % кл. <3 мм	Фінішне дроблення шихти КБ № 5, 6 (з 2016 р.)
Аналізатор вологи	PEC-MA 110	1	Конвеєр У-17а	Оперативний контроль вологості шихти
Автоматизована система	«ПОТІК» (Siemens / Mitsubishi)	1	Точність дозування 0,5 %	Керування процесом дозування вугільних концентратів

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1].

Технологічну схему ВПЦ із позначенням послідовності операцій наведено на рис. 1.2.

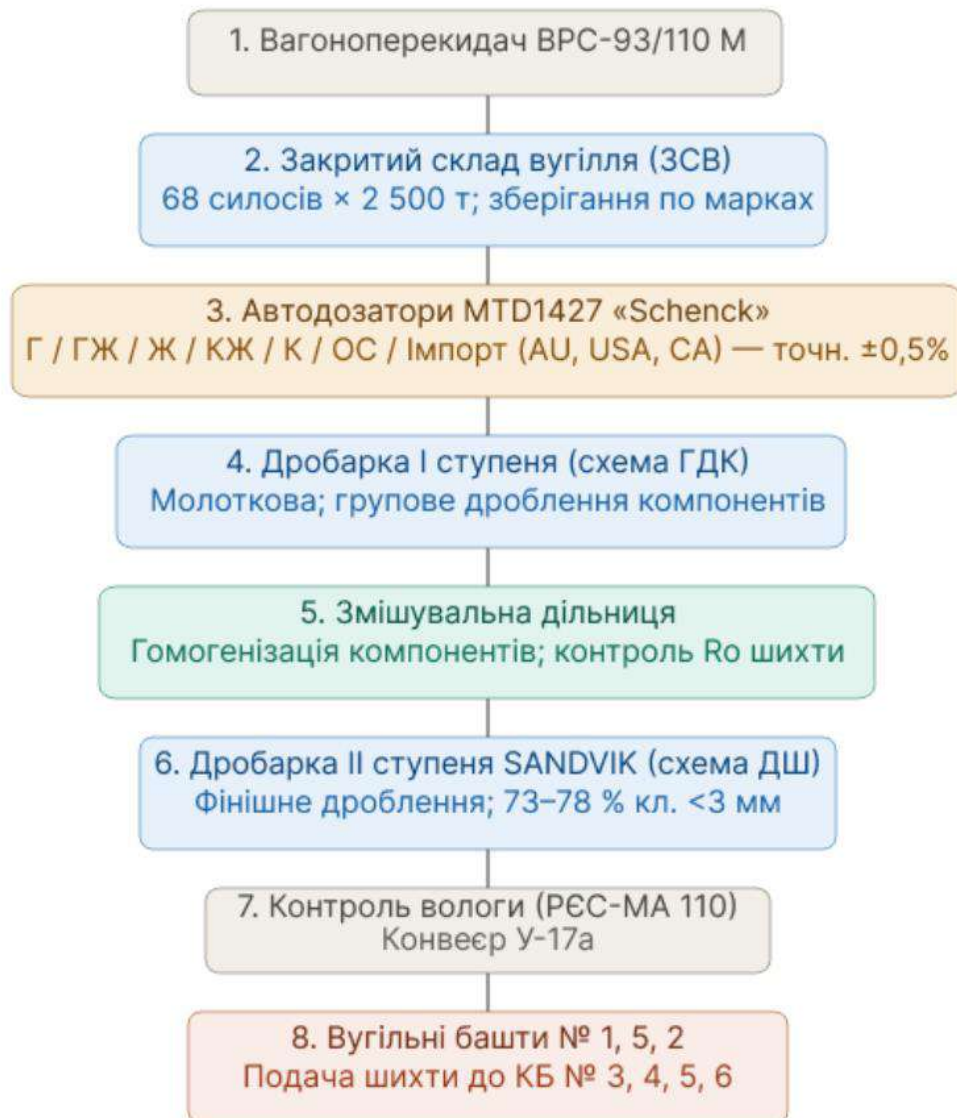


Рис. 1.2. Принципова технологічна схема ВПЦ КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1, 2]

Важливою особливістю поточної сировинної бази КХВ АМКР є повна відмова від вугілля з Росії після лютого 2022 р. До цього часу вугілля Кузнецького, Печорського та Південно-Якутського (РФ) басейнів складало до 20–25 % шихти. Після реструктуризації їхні обсяги заміщено австралійським, американським та канадським вугіллям [1]. Це зумовило нові технологічні

завдання у підготовці шихти, оскільки імпортне вугілля характеризується підвищеним вмістом інертиніту ($\Sigma OK = 20\text{--}45\%$) і потребує адаптованих підходів до петрографічного контролю якості.

1.2 Вимоги до якості сировини та продукції коксохімічного виробництва

1.2.1 Класифікація та характеристика вугілля для коксування

Класифікацію кам'яного вугілля в Україні встановлено ДСТУ 3472:1996 «Вугілля буре і кам'яне. Класифікація» [3]. Основні класифікаційні параметри: вихід летких речовин (V^{daf} , %), товщина пластичного шару (y , мм) та показник відбиття вітриніту (R_o , %). Характеристики марок вугілля, що використовуються у шихті КХВ АМКР, наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Класифікація та характеристика вугілля шихти КХВ АМКР

Марка	V^{daf} , %		y , мм		R_o , %		A_d макс., %	S_t^d макс., %	Країни- постачальники	Частка у шихті, %
	від	до	від	до	від	до				
Г	36	44	13	26	0,60	0,80	10,0	2,0	Донецький (Укр.)	5–8
ГЖ	30	37	20	28	0,80	1,00	9,0	1,8	Донецький (Укр.), Австралія	8–15
Ж	25	37	25	45	1,00	1,30	9,0	1,6	Донецький (Укр.), Австралія, США	30–40
КЖ	20	28	18	35	1,30	1,50	9,0	1,6	Австралія, США, Канада	12–18
К	18	26	14	25	1,40	1,80	9,0	1,4	Донецький (Укр.), США	5–12
ПС	14	22	6	13	1,50	2,00	8,5	1,4	Донецький (Укр.)	5–10
Т	<14	—	—	—	>2,00	—	8,0	1,2	Донецький (антрацит, Укр.)	0–5
Імпорт AU/USA/CA	22	34	15	40	0,95	1,50	9,5	0,8	Австралія, США, Канада	20–35

Примітки: 1) Виділено основний компонент шихти — марка Ж. 2) Рядок «Імпорт AU/USA/CA» — вугілля, що за ДСТУ відповідає маркам ГЖ–КЖ, але відрізняється петрографічно: $\Sigma OK = 20\text{--}45\%$, $\sigma R = 0,10\text{--}0,18\%$, що суттєво впливає на CSR. 3) Вугілля Кузнецького, Печорського та Південно-Якутського (РФ) басейнів виключено з сировинної бази АМКР з лютого 2022 р. Джерело: Розроблено із використанням [1, 3].

Типовий марочний склад шихти КХВ АМКР після реструктуризації постачання наведено на рис. 1.3.

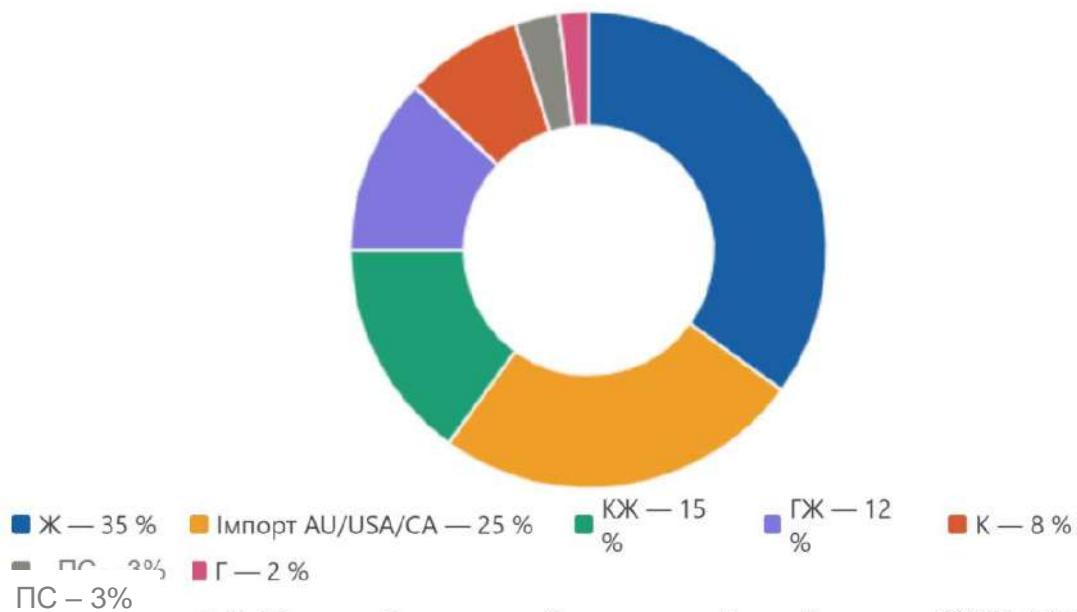


рис. 1.3. Типовий марочний склад вугільної шихти КХВ АМКР (після реструктуризації 2022–2024 рр.)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

1.2.2 Основні показники якості доменного коксу та нормативні вимоги

Якість доменного коксу регламентується ДСТУ 4083:2002 «Кокс доменний. Технічні умови» [4] та внутрішнім технологічним регламентом КХВ АМКР [1]. Продукцією КЦ № 1 є кокс валовий, який після розсіву на коксортувальнях поділяється на кокс доменний (≥ 25 мм), горіх коксовий

(10–25 мм) та дрібняк коксовий (0–10 мм). Порівняльну характеристику нормативних вимог до доменного коксу наведено у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

**Нормативні показники якості доменного коксу за ДСТУ 4083:2002
та вимогами КХВ АМКР**

Показник якості	Одиниці вимірювання	ДСТУ 4083:2002	Вимоги КХВ АМКР	Вплив на доменний процес
A^d — зольність	%	$\leq 11,5$	$\leq 11,0$	+1 % $A_d \rightarrow +1,5-2$ % витрат коксу
S_t^d — вміст сірки	%	$\leq 1,4$	$\leq 1,2$	Переходить у метал, погіршує в'язкість сталі
W_t — вологість	%	$\leq 5,0$	$\leq 4,0$	Витрати тепла на випаровування
M_{25} — механічна міцність	%	≥ 83	≥ 86	Стійкість до роздроблення
M_{10} — абразивна стійкість	%	$\leq 8,5$	$\leq 7,5$	Поверхнева зносостійкість у шахті печі
Крупність	мм	25–80	25–80	Газопроникність шару шихти
CRI — реакційна здатність	%	≤ 35	≤ 30	Швидкість газифікації CO_2 при 1100 °С
CSR — гаряча міцність	%	≥ 55	≥ 60	Збереження структури після газифікації

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [4, 5].

Виробництво коксу на КБ № 3, 4 здійснюється із шихти, завантаженої насипом, а на КБ № 5, 6 — із шихти трамбованої. Технологія трамбування впроваджена у 2014–2018 рр. і дозволяє використовувати більшу частку слабоспікливого вугілля без погіршення якості коксу, що здешевлює собівартість на ~ 100 дол/т [1].

1.3 Реакційна здатність (CRI) та гаряча міцність (CSR) доменного коксу

1.3.1 Методики визначення показників CRI та CSR

Стандартна методика визначення CRI та CSR встановлена міжнародним стандартом ISO 18894:2006 «Coke — Determination of the coke reactivity index (CRI) and the coke strength after reaction (CSR)», що прийнятий в Україні як ДСТУ ISO 18894:2009 [5].

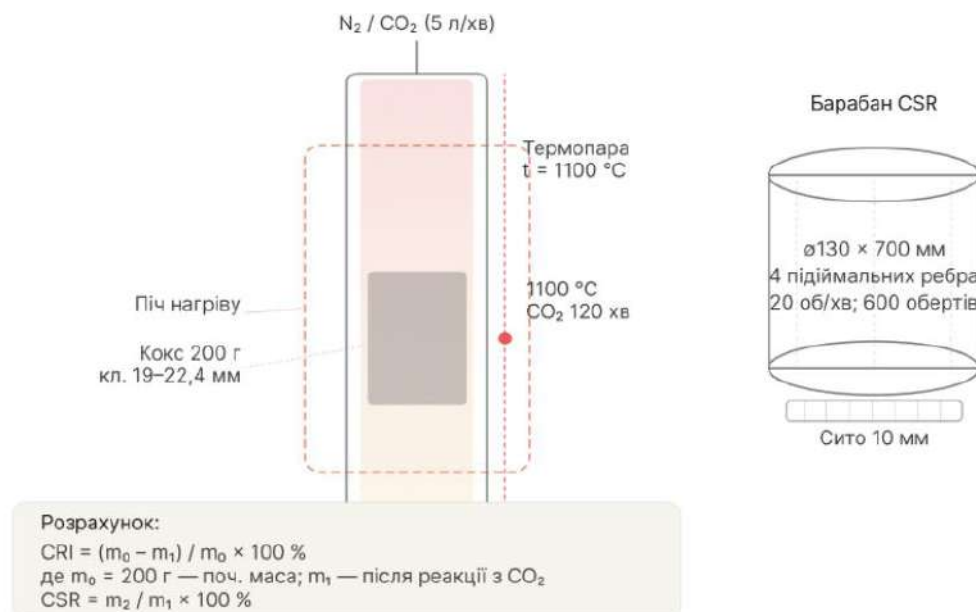


Рис. 1.4. Принципова схема установки для визначення CRI та CSR за ISO 18894:2006

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5].

Методика включає чотири стадії. На стадії 1 наважку коксу масою $200 \pm 0,5$ г (клас 19–22,4 мм) нагрівають у потоці N_2 до 1100 ± 5 °C зі швидкістю 8–12 °C/хв (≈ 90 хв).

Температурний профіль процесу наведено на рис. 1.5.

Температурний профіль процесу наведено на рис. 1.5.

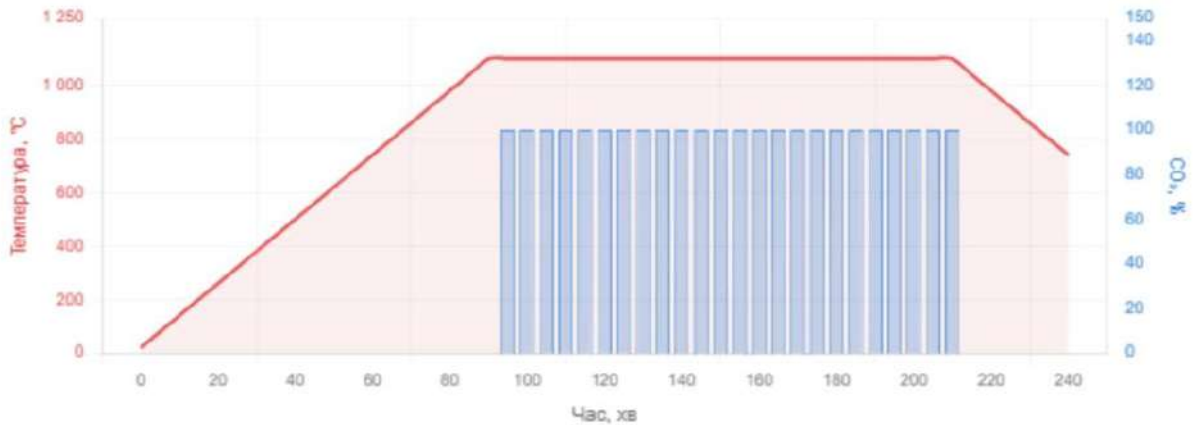
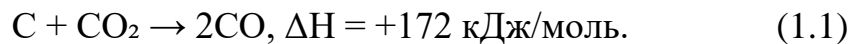


Рис. 1.5. Температурний профіль процесу визначення CRI та CSR (ДСТУ ISO 18894:2009)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5]

На **стадії 2** подачу N₂ замінюють на CO₂ (5 ± 0,1 л/хв) тривалістю 120 хв. Відбувається ендотермічна реакція Будуара:



На **стадії 3** трубу охолоджують у потоці N₂ та зважують залишок m₁. Індекс реакційної здатності розраховують за формулою:

$$\text{CRI} = \frac{(m_0 - m_1)}{m_0} \times 100 \%, \quad (1.2)$$

де m₀ = 200 г — початкова маса наважки; m₁ — маса коксу після реакції з CO₂, г.

На стадії 4 залишок m₁ завантажують у барабан Ø130 × 700 мм із 4-ма ребрами, обертають 600 разів (20 об/хв), розсівають на ситі 10 мм. Міцність після реакції визначають за формулою:

$$\text{CSR} = m_2 / m_1 \times 100 \%, \quad (1.3)$$

де m₂ — маса залишку на ситі 10 мм після барабанного випробування, г.

Нормативні вимоги до відтворюваності (ISO 18894:2006): стандартне відхилення між паралельними вимірюваннями — не більш ніж 4,5 % для CSR > 55 % та 2,83 % для CRI [5]. Ці вимоги використовуються в роботі як критерій якості розробленої прогностичної моделі.

1.3.2 Фактори впливу на реакційну здатність коксу

Реакційна здатність коксу визначається двома групами факторів: характеристиками вуглецевої матриці та каталітичною активністю мінеральних компонентів золи [6, 7].

Ступінь метаморфізму шихти (показник R_o). Показник відбиття вітриніту шихти є основним петрографічним критерієм якості шихти. При $R_o < 1,0$ % вуглецева матриця недостатньо впорядкована — CRI зростає, CSR знижується. Оптимальний діапазон для доменних печей АМКР: $R_o = 1,10$ – $1,30$ %. Кількісну залежність CSR від R_o для вугілля різних сировинних басейнів наведено на рис. 1.6.

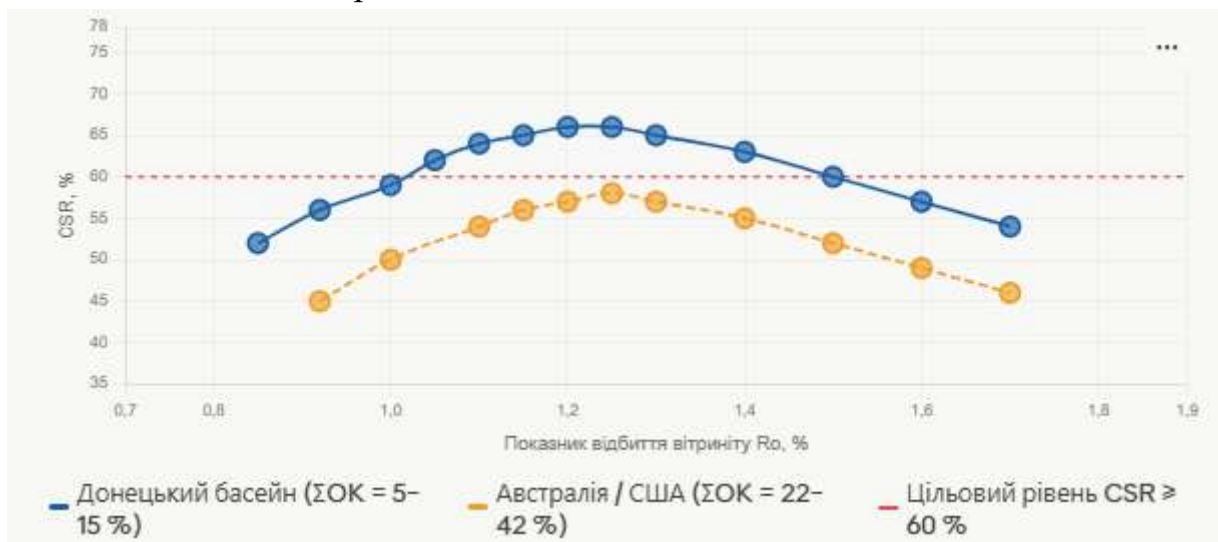


Рис. 1.6. Залежність CSR від показника відбиття вітриніту R_o для шихт різних сировинних басейнів

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [6, 7]; вугілля з підвищеним ΣОК дає CSR нижче на 5–10 % абс. при однаковому R_o .

За результатами статистичної обробки 38 шихт різних басейнів встановлено степеневі залежності [7]:

$$\text{CSR} = 26,235 \cdot (I_{0,4})^{0,438}, R = 0,929; \quad (1.6)$$

$$\text{CRI} = 66,471 \cdot (I_{0,4})^{-0,531}, R = 0,955, \quad (1.7)$$

де $I_{0,4} = \text{SiO}_2 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ — індекс основності за чотирма оксидами. Графіки функцій (1.6) та (1.7) наведено на рис. 1.7.



Рис. 1.7. Залежність CSR та CRI від індексу основності золи $I_{0,4}$

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [7]

1.4 Петрографічні характеристики вугілля як фактор якості коксу

Петрографічний аналіз вугілля виконується відповідно до ДСТУ ISO 7404-3 та ISO 7404-5 і є основним інструментом оцінки технологічної цінності вугільних концентратів у сучасній, диверсифікованій без російської складової, сировинній базі КХВ АМКР [8]. Органічна маса вугілля складається з трьох груп мацералів.

Група вітриніту (V_t) — продукти метаморфізму лігніно-целюлозного матеріалу рослин. Складає 50–85 % органічної маси. Ключова характеристика — середній довільний показник відбиття вітриніту R_o , що зростає зі збільшенням ступеня метаморфізму. Розподіл значень R_o у пробі — рефлектограма — характеризується стандартним відхиленням σ_R : при $\sigma_R < 0,10$ % шихта є однорідною, при $\sigma_R > 0,15$ % — петрографічно неоднорідною [8]. Типові рефлектограми наведено на рис. 1.8.

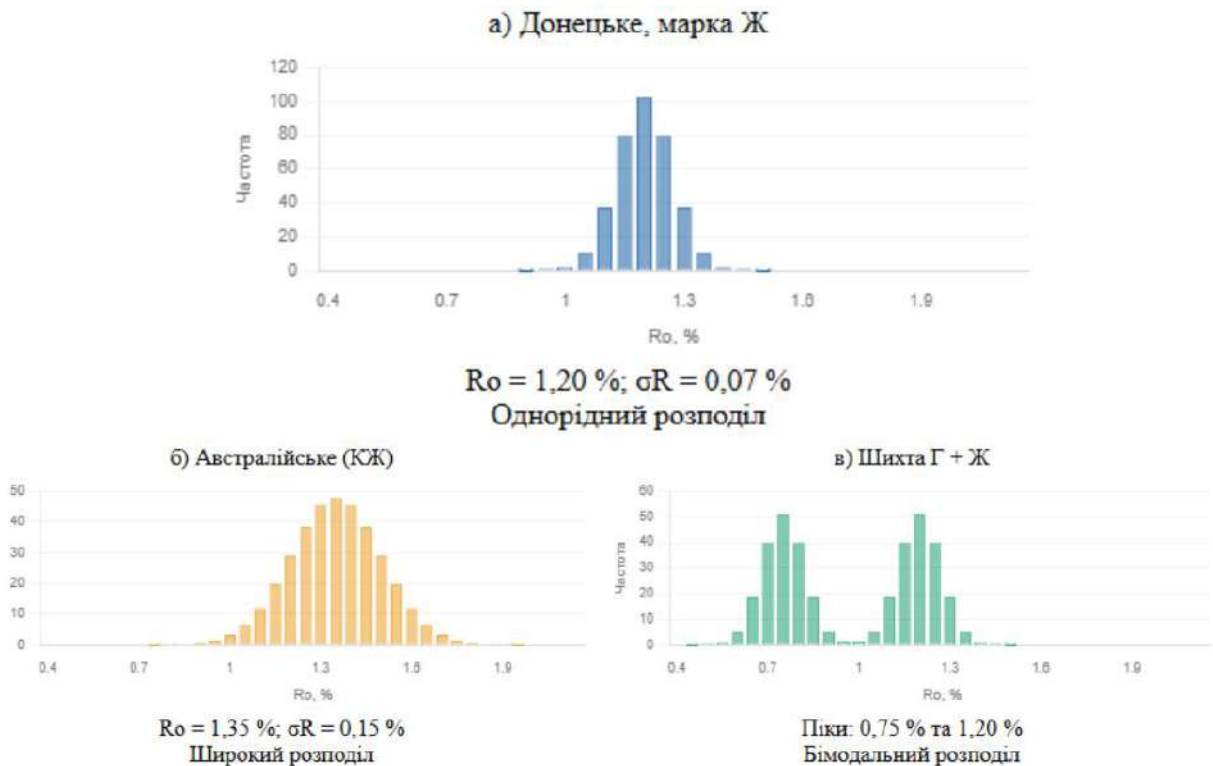


Рис. 1.8. Типові рефлектограми вітриніту для вугілля різних типів та двокомпонентної шихти

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Група інертиніту (I) — фюзиніт, семіфюзиніт, мікриніт — продукти окиснення рослинного матеріалу ще до вугленосних умов. Не утворюють пластичної маси, мають $V^{daf} < 15$ % та підвищену твердість. Сумарний вміст оцінюється показником [9, 10]:

$$\Sigma OK = I + 2/3 \cdot S_v, \% \quad (1.8)$$

де I — вміст мацералів інертиніту, %; S_v — вміст семівітриніту, %.

Принципову відмінність між донецьким та імпорнтним вугіллям за мацеральним складом унаочнює трикутна діаграма (рис. 1.9).

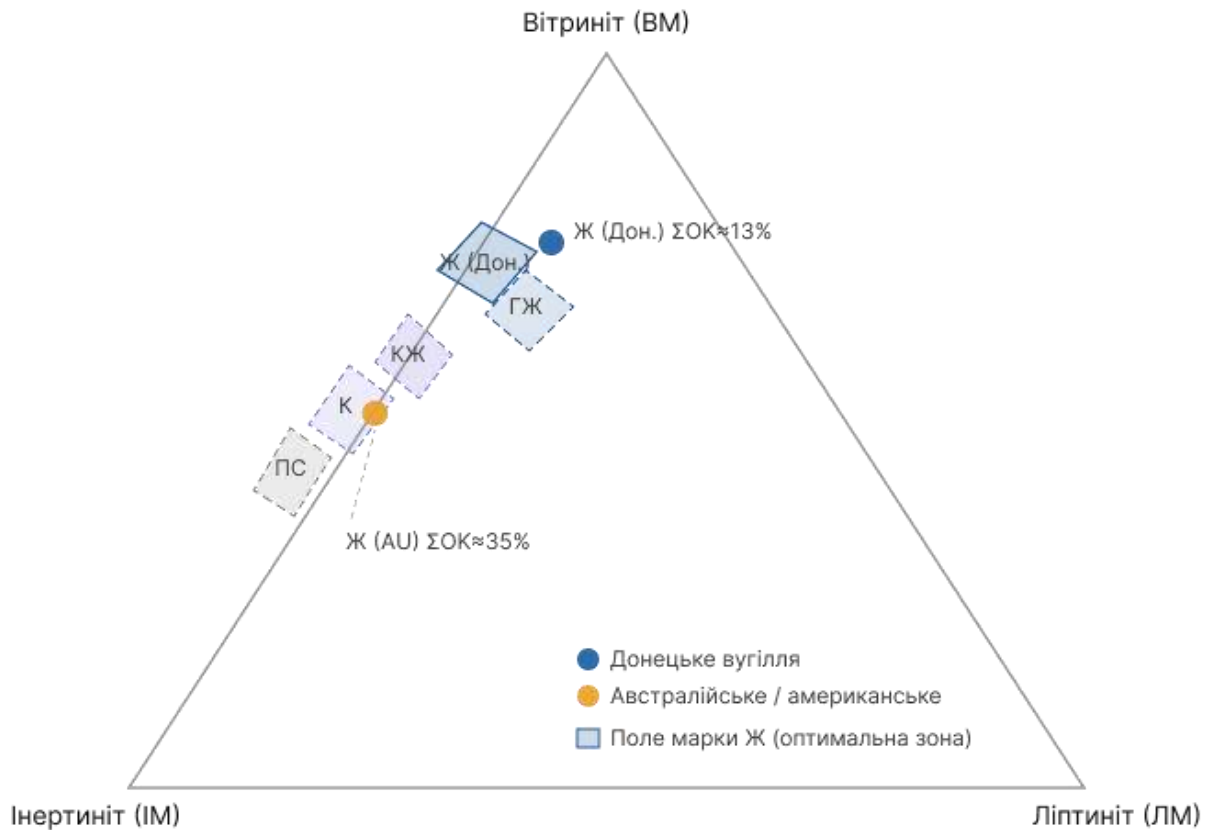


Рис. 1.9. Трикутна діаграма мацерального складу вугілля різних марок та сировинних басейнів

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [8, 11]

Група ліптиніту (ЛМ) — спориніт, кутиніт, флуориніт — продукти метаморфізму воскоподібних компонентів рослин. Характеризується підвищеним V^{daf} та є додатковим постачальником рідкої фази при коксуванні. При $R_o > 1,2$ % мацерали ліптиніту практично нерозрізніми від вітриніту у відбитому світлі [9].

Дослідженнями встановлено [8, 11], що при підвищенні ΣOK від 15 до 40 % показник CSR знижується на 5–10 % абс. при незмінному R_o . Це є принциповим аргументом на користь комплексного петрографічного підходу до оцінки шихти — на противагу одновимірному критерію V^{daf} .

Аналіз технологічних процесів вуглепідготовчого та коксового цехів КХВ АМКР показав, що підприємство має сучасну технічну базу для підготовки вугільної шихти та виробництва доменного коксу. Разом з тим повна відмова від російського вугілля після лютого 2022 року та суттєве зростання частки австралійського й американського вугілля у шихті сформували принципово нову сировинну ситуацію. Імпортне вугілля аналогічних марок суттєво відрізняється від донецького за петрографічним складом — підвищеним вмістом мацералів групи інертиніту та значно ширшим розкидом значень показника відбиття вітриніту, що унеможливорює коректне прогнозування якості коксу на основі традиційних хімічних показників.

Це зумовлює необхідність переходу до комплексного петрографічного підходу при формуванні вугільної шихти — одночасного контролю показника відбиття вітриніту R_o , вмісту фюзенізованих компонентів ΣOK , однорідності шихти σ_R та індексу основності золи I_o . Саме ці параметри визначають реакційну здатність коксу (CRI) та його гарячу міцність (CSR) — показники, за якими вимоги КХВ АМКР є жорсткішими за державний стандарт і виконання яких безпосередньо впливає на ефективність доменного виробництва.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Петрографічний склад вугілля та його роль у формуванні гарячої міцності коксу

2.1.1 Мацеральний склад вугілля: вітриніт, інертиніт та їх властивості при карбонізації

Органічна маса вугілля є гетерогенним утворенням, що складається з мацералів — мінімальних мікроскопічних структурних одиниць, аналогічних мінералам у неорганічних породах. Відповідно до ДСТУ ISO 7404-3 та ДСТУ ISO 7404-5 мацерали об'єднані у три групи: вітриніт (V_t), інертиніт (I) та ліптиніт (L). Кожна з груп характеризується специфічними фізико-хімічними властивостями, що принципово визначають поведінку вугілля при карбонізації та якість отриманого коксу [8, 12].

Мацерали групи вітриніту (V_t) є продуктами метаморфізму лігніно-целюлозної речовини рослин — деревини, кори, листя. У відбитому білому світлі вітриніт виглядає як однорідна, сіра або темно-сіра маса без видимої клітинної структури. Відбивна здатність вітриніту безпосередньо залежить від ступеня метаморфізму вугілля і зростає зі збільшенням рангу вугілля. При нагріванні до 350–500 °C вітриніт розм'якшується, утворюючи пластичну масу, і виконує функцію зв'язуючого компонента шихти. Від поведінки вітриніту в пластичній фазі вирішальним чином залежать спіклівість шихти та структура формованого коксу [8, 9].

Мацерали групи інертиніту (I) — фюзиніт, семіфюзиніт, мікриніт, макриніт, інертодетриніт — є продуктами окиснення або вуглефікації рослинного матеріалу ще до занурення в торф'яні умови. У відбитому світлі інертиніт значно яскравіший за вітриніт і характеризується клітинною або волокнистою структурою. Інертиніт практично не бере участі в утворенні

пластичної маси при карбонізації — він або залишається незмінним (фюзиніт), або лише частково пом'якшується (семіфюзиніт). Завдяки цьому інертиніт виконує роль твердого структурного наповнювача в коксовому пирозі. Помірний вміст інертиніту ($\Sigma\text{OK} = 15\text{--}25\%$) сприяє отриманню міцного коксу з рівномірною пористістю; надлишок ($\Sigma\text{OK} > 35\text{--}40\%$) порушує суцільність пластичного шару і знижує якість коксу [8, 9, 12].

Мацерали групи ліптиніту (L) — спориніт, кутиніт, флуориніт, альгінит — є продуктами метаморфізму воскоподібних і смолистих компонентів рослин. Ліптиніт характеризується найвищим серед мацералів виходом летких речовин і є постачальником рідкої фази при коксуванні, що підвищує спікливість шихти. При ступені метаморфізму, що відповідає $R_o > 1,2\%$, мацерали ліптиніту практично нерозрізнимі від вітриніту у відбитому білому світлі через зближення відбивних здатностей [9].

Кількісну характеристику мацерального складу вугілля та шихт, досліджених в умовах реального коксохімічного виробництва, наведено у табл. 2.1. Дані отримано з автоматизованого петрографічного аналізу на установці фірми «LECO» (ЦЗЛ ВАТ «Запорожжкокс») і репрезентують вугілля, характерне для міжбасейнових шихт українських коксохімічних підприємств [12].

Таблиця 2.1

**Мацеральний склад вугільних концентратів та виробничих шихт
(петрографічний аналіз на установці «LECO», ЦЗЛ ВАТ «Запорожжкокс»)**

Вугілля / шихта	Марка	R_o , %	Мацеральний склад (без мін. домішок), %				ΣOK , %	V^{daf} , %	y , мм
			V_t	S_v	I	L			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЦОФ «Самсоновська» (Донецький б-н)	Ж	0,93	90	—	8	2	8	32,9	33

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЦОФ «Чумаківська» (Донецький б-н)	К	1,09	90	1	8	1	9	28,9	11
ЦОФ «Пролетарська» (Донецький б-н)	К	1,22	91	—	8	1	8	26,4	15
ЦОФ «Вузловська» (Донецький б-н)	К	1,33	93	—	7	—	7	23,0	16
ЦОФ «Шолоховська» (Кузнецький б-н)*	Г	0,65	71	—	27	2	27	37,0	8
ЦОФ «Шолоховська» КС (Кузнецький б-н)*	КС	1,13	44	4	52	—	55	23,2	6
Вугілля США (проба 1)	Ж/КЖ	1,07	75	—	19	4	19	30,5	18
Вугілля США (проба 2)	Ж/КЖ	1,06	79	1	17	3	18	29,9	16
Шихта «Запорожжкокс» (I-й склад)	—	1,16	87	1	9	3	10	29,5	15
Шихта «Запорожжкокс» (II-й склад)	—	1,07	85	2	12	1	14	28,8	15

Примітки: 1) Виділено донецьке вугілля ($\Sigma OK = 7-9 \%$) та вугілля США ($\Sigma OK = 18-19 \%$); * — вугілля з РФ наведено лише для наукового порівняння; виключено з сировинної бази українських КХЗ з лютого 2022 р. 2) $\Sigma OK = I + 2/3 \cdot Sv$. Джерело: Розроблено із використанням [12].

Аналіз даних табл. 2.1 виявляє принципову відмінність між вугіллям Донецького басейну та імпортованими аналогами. Донецьке вугілля марок Ж і К характеризується $\Sigma OK = 7-9 \%$ при вмісті вітриніту $V_t = 87-93 \%$. Американське вугілля умовної марки Ж/КЖ при близьких значеннях R_o (1,06–1,07 %) має $\Sigma OK = 18-19 \%$ і нижчий вміст вітриніту (75–79 %). Ця різниця за мацеральним складом при фактично однаковому показнику R_o є визначальним чинником різної якості коксу з шихт різного географічного походження, що і зумовлює необхідність петрографічного підходу на відміну від одновимірного критерію V^{daf} [8, 9, 12].

2.1.2 Показник відбиття вітриніту R_o як індикатор ступеня метаморфізму вугілля

Показник відбиття вітриніту (R_o) — кількісна міра ступеня метаморфізму вугілля, визначена як частка монохроматичного світла ($\lambda = 546$ нм), відбита від поверхні зерна вітриніту у відбитому білому світлі при імерсії в олії з відомим показником заломлення. Методика визначення встановлена ДСТУ ISO 7404-5. Відповідно до умовної шкали відповідності стадій метаморфізму маркам вугілля, прийнятої ДП «УХІН», значення R_o та межі марок наведено у табл. 2.2 [3, 12].

Таблиця 2.2

Шкала відповідності стадій метаморфізму вітриніту маркам вугілля та технологічна характеристика коксування

Марка вугілля	R_o , %	V^{daf} , %	y , мм	Спикливість шихти	Роль у шихті	Вплив на CSR
Д (довгополум'яне)	< 0,50	> 44	< 6	Відсутня	Не застосовується	—
ДГ	0,50–0,64	40–44	6–12	Дуже слабка	Не застосовується	Знижує
Г (газове)	0,65–0,89	36–44	8–26	Задовільна	Постачальник легких	Знижує при надлишку
ГЖ	0,80–1,00	30–37	20–28	Добра	Покращує пластичність	Нейтральний
Ж (жирне)	1,00–1,30	25–37	25–45	Відмінна	Основний коксівний	Максимальний CSR
КЖ	1,30–1,50	20–28	18–35	Добра	Коксівний	Високий CSR
К (коксове)	1,40–1,80	18–26	14–25	Задовільна	Збіднювач	Знижується при $R_o > 1,5$
ПС (піснувато-спікливе)	1,50–2,00	14–22	6–13	Слабка	Збіднювач до 10–15 %	Знижує
П (пісне)	> 2,00	< 14	—	Відсутня	Наповнювач до 5 %	Знижує

Примітки: 1) Виділено оптимальний діапазон R_o для отримання коксу з $CSR \geq$

60 % (умови КХВ АМКР). 2) Класифікація за ДСТУ 3472:1996 та шкалою ДП «УХІН» [3, 12].

Показник R_o є найбільш надійним параметром для прогнозування якості коксу в умовах міжбасейнових шихт, оскільки, на відміну від V^{daf} , він не залежить від вмісту мацералів групи інертиніту. Встановлено, що між R_o та V^{daf} існує тісна кореляція ($r = -0,96$) для петрографічно однорідних вугілля, однак у неоднорідних пробах, зокрема в імпортному вугіллі з США та Австралії, однакові значення V^{daf} можуть відповідати принципово різним значенням R_o та ΣOK , що унеможлиблює однозначне прогнозування якості коксу лише за V^{daf} [8]. Числові рефлектограми вітриніту дослідженого вугілля наведено у табл. 2.3

Дані табл. 2.3 наочно демонструють принципову відмінність між однорідним донецьким вугіллям та гетерогенним американським. Вітриніт ЦОФ «Самсоновська» охоплює лише 2 марочні групи ($\sigma_R = 0,044$ %), тоді як у вугіллі США той самий показник $R_o = 1,07$ % супроводжується охопленням 6 марочних груп ($\sigma_R = 0,142$ %). Такий характер рефлектограми свідчить про петрографічну неоднорідність вугілля США і пояснює нестабільність якості коксу при використанні цього вугілля у шихті без урахування петрографічних характеристик [12].

2.2 Вплив ступеня метаморфізму та вмісту інертиніту на показник CSR

2.2.1 Залежність CSR від показника відбиття вітриніту при варіюванні складу шихти

Дослідження впливу петрографічних характеристик шихти на показник гарячої міцності коксу CSR є центральним завданням сучасної коксохімічної науки в умовах розширення географії постачання вугілля. Роботи Кафтана

Ю.С., Дроздника І.Д., Мірошніченка Д.В. та ін. (ДП «УХІН») дозволили встановити кількісні залежності між петрографічними показниками шихти та виходом продуктів коксування на базі статистичної обробки 181 проби вугілля та шихт, що охоплює весь метаморфічний ряд: R_o від 0,51 до 1,92 %, ΣOK від 0 до 51 %, V^{daf} від 14,5 до 45,8 % [12].

Встановлено, що моделі прогнозування на основі двох параметрів (R_o та ΣOK) мають суттєво вищу точність порівняно з однопараметричними моделями на основі V^{daf} . Зокрема, для прогнозу виходу коксу коефіцієнт детермінації D зростає з 92 до 98 % при переході від моделі «кокс = $f(V^{daf})$ » до моделі «кокс = $f(R_o, \Sigma OK)$ » [8]. Дані про якість коксу з шихт різного складу, отримані в умовах реального виробництва (ВАТ «МК «Азовсталь»), наведено у табл. 2.3 [9].

Дані табл. 2.3 підтверджують, що при практично однаковому значенні $y = 15$ мм і схожих хімічних показниках шихта І-го складу ($R_o = 1,16$ %, $\Sigma OK = 10$ %) забезпечує $CSR = 51,6$ %, тоді як шихта ІІ-го складу ($R_o = 1,07$ %, $\Sigma OK = 14$ %) дає $CSR = 49,4$ %. Це означає, що зниження R_o на 0,09 % у поєднанні зі зростанням ΣOK на 4 % знизило CSR на 2,2 % абс. — величину, що є практично значущою в контексті вимоги АМКР $CSR \geq 60$ % [9].

Вплив ступеня помелу шихти на CSR підтверджується даними Кузниченка В.М., Кафтана Ю.С. та ін. (УХІН, 2008) для шихти ВАТ «Алчевськкокс» ($R_o = 0,96$ %, $\Sigma OK = 20$ %, $y = 14$ мм), які наведено у табл. 2.5

Таблиця 2.3

**Числові рефлектограми вітриніту вугільних концентратів: розподіл за стадіями відбиття, %
(автоматизований аналіз на установці «LECO»)**

Вугілля	Марка	R _o , %	σ _R , %	Вміст вітриніту за стадіями відбиття, %						
				ДГ (0,50– 0,65)	Г (0,66– 0,89)	Ж (0,90– 1,19)	К (1,20– 1,39)	ПС (1,40– 1,69)	П (1,70– 2,59)	Охоплює марок
ЦОФ «Самсоновська» (Дон.)	Ж	0,93	0,044	—	41	58	1	—	—	2
ЦОФ «Чумаківська» (Дон.)	К	1,09	0,038	—	3	82	15	—	—	2
ЦОФ «Вузловська» (Дон.)	К	1,33	0,095	—	1	23	50	21	5	4
ЦОФ «Шолоховська» КС (Кузн.)*	КС	1,13	0,062	—	8	68	14	10	—	4
Вугілля США (проба 1)	Ж/КЖ	1,07	0,142	2	18	57	9	11	3	6
Вугілля США (проба 2)	Ж/КЖ	1,06	0,138	5	33	35	7	17	3	6

Примітки: 1) Виділено донецьке вугілля ($\sigma_R \leq 0,095$ %) та вугілля США ($\sigma_R = 0,138-0,142$ %). 2) * — наведено для наукового порівняння; виключено з сировинної бази українських КХЗ з 24.02.2022 р. 3) «Охоплює марок» — кількість марочних груп, що виявлені у рефлектограмі вітриніту. Джерело: Розроблено із використанням [12]

Таблиця 2.4

**Петрографічні характеристики шихт та показники якості коксу
(дослідно-промислові коксування, ВАТ «МК «Азовсталь», КБ № 1)**

Показник	Шихта I-го складу ($R_o = 1,16$ %)			Шихта II-го складу ($R_o = 1,07$ %)			Середнє (обидва) значення
	мін.	середнє	макс.	мін.	середнє	макс.	
1	2	3	4	5	6	7	8
Шихта:							
— R_o , %	1,16			1,07			—
— ΣOK шихти, %	10			14			—
— V^{daf} , %	29,5			28,8			—
— y , мм	15			15			—
— I_o золи шихти	0,258			0,263			—
Кокс:							
— A_d , %	11,2	11,4	11,8	11,4	11,7	12,2	11,6
— S_t^d , %	0,4	0,9	1,0	0,4	0,9	1,0	0,9
— M_{25} , %	86,7	87,2	88,0	87,6	88,2	88,7	87,7
— M_{10} , %	6,8	7,1	7,6	6,9	7,2	7,4	7,1
— СRI (метод NSC), %	30,1	31,4	34,7	30,8	32,5	34,0	32,3
— CSR (метод NSC), %	42,2	51,6	53,9	46,1	49,4	52,9	50,0

Примітки: 1) I-й склад шихти ($R_o = 1,16$ %) відповідає більш сприятливому петрографічному складу — дещо вищому вмісту К/ПС-вітриніту та нижчому ΣOK . 2) При зниженні R_o з 1,16 до 1,07 % та зростанні ΣOK з 10 до 14 % середнє значення CSR знизилося з 51,6 до 49,4 %, тобто на 2,2 % абс. 3) Попри однаковий показник $y = 15$ мм, шихти суттєво відрізняються за CSR кінцевого коксу. Джерело: Розроблено із використанням [9].

Таблиця 2.5

Вплив ступеня помелу та вологості трамбованої шихти на якість коксу (шихта ВАТ «Алчевськкокс»: $R_o = 0,96 \%$, $\Sigma OK = 20 \%$, $y = 14 \text{ мм}$; лабораторна піч, $t = 950 \text{ }^\circ\text{C}$)

Варіант	Помол шихти	Клас < 3,15 мм, %	d_{cp} , мм	Вологість W^i , %	M_{25} , %	M_{10} , %	CRI (NSC), %	CSR (NSC), %
1	Крупний	84,4	1,38	9,6	89,7	8,4	53,6	19,8
2	Крупний	84,4	1,38	14,0	89,8	8,6	53,8	19,4
3	Дрібний	100,0	0,71	9,7	90,9	7,8	52,3	25,4
4	Дрібний	100,0	0,71	14,4	90,7	7,9	51,9	26,1

Примітки: 1) Виділено варіанти з дрібним помелом — CSR зростає на 22–25 % відносних при переході від крупного до дрібного помелу. 2) Вологість шихти практично не впливає на CSR у дослідженому діапазоні 9,6–14,4 %. 3) Шихта: $R_o = 0,96 \%$, мацеральний склад $Vt = 76 \%$, $I = 20 \%$, $L = 4 \%$. Джерело: Розроблено із використанням [10].

2.2.2 Роль спікливих та опіснюючих компонентів у формуванні міцності коксу

Вугілля, що входять до складу шихти, виконують різні технологічні функції залежно від їхнього петрографічного складу та ступеня метаморфізму. У практиці вуглепідготовки традиційно розрізняють спікливі (коксівні) та опіснюючі (збіднюючі) компоненти.

Спікливі компоненти (марки Ж, ГЖ, КЖ) характеризуються $R_o = 1,0\text{--}1,5 \%$, $y \geq 15 \text{ мм}$ і є основними постачальниками пластичної маси при карбонізації. Вітриніт цих марок при нагріванні до 350–500 °C розм'якшується і утворює безперервний рідкий шар, що просочує і пов'язує незмінні зерна інертиніту. Якість пластичної маси визначає щільність і рівномірність коксового пирога [8, 9].

Опіснюючі компоненти (марки ПС, П, а також фюзиніт та семіфюзиніт як складові частини вугілля будь-яких марок) не утворюють пластичної маси і виконують роль твердого наповнювача. Їхня сумарна кількість характеризується показником ΣOK . Оптимальне співвідношення між спікливими і опіснюючими компонентами є вирішальним для формування пористої структури та міцності коксу [8, 9, 12].

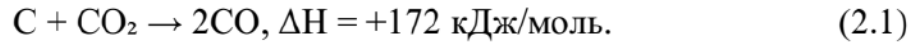
Встановлено такі основні закономірності [8, 9, 10]:

- при $\Sigma OK < 10\%$ (переважно вітринітові шихти) пластична маса надмірно рухлива, кокс має велику і нерівномірну пористість, CSR знижується;
- при $\Sigma OK = 15\text{--}25\%$ інертиніт рівномірно розподілений у пластичній масі і формує рівномірну дрібнопористу структуру — CSR максимальний;
- при $\Sigma OK = 25\text{--}35\%$ пластична маса переривається твердими включеннями інертиніту, формується груба нерівномірна пористість, CSR знижується;
- при $\Sigma OK > 35\text{--}40\%$ спікливість шихти критично знижується, нерідко утворюються незв'язані фрагменти коксу, CSR різко падає.

2.3 Вплив мінеральних компонентів вугілля на гарячу міцність коксу

2.3.1 Каталітична активність зольних компонентів при газифікації коксу CO_2

Мінеральні компоненти вугілля при коксуванні переходять у золу коксу, хімічний склад якої безпосередньо впливає на реакційну здатність коксу (CRI) через каталітичну дію певних оксидів на реакцію Будуара [7, 9]:



За даними К.І. Сискова, оксиди Fe_2O_3 , CaO та MgO у золі коксу каталітично прискорюють реакцію газифікації. М.В. Гофтман встановив, що при низькому вмісті Ca і Mg , але високому вмісті Fe зола є корисною складовою для доменного процесу, але підвищує CRI коксу. Якщо зола містить Ca і Mg у співвідношенні, що наближається до складу шлаку, — вона є самошлакуючою і практично не потребує додаткових флюсів [9].

Хімічний склад золи досліджених компонентів опитної шихти (ВАТ «МК «Азовсталь») та розрахований індекс основності наведено у табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Хімічний склад золи вугільних компонентів та шихти, а також розрахований індекс основності I_o (дослідно-промислові коксування, ВАТ «МК «Азовсталь»)

Вугілля / шихта	Марка	Вміст оксидів у золі, %							I_o
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	
ЦОФ «Каро»	ГЖ	44,76	21,25	11,47	8,76	2,52	1,47	1,31	0,387
ЦОФ «Київська»	Ж	44,22	24,10	22,94	2,10	1,51	1,43	2,19	0,442
ЦОФ «Чумаківська»	К	52,68	28,05	6,98	1,05	1,26	1,38	2,76	0,166
ЦОФ «Колосниківська»	К	54,10	28,05	8,48	1,75	1,26	1,58	2,82	0,193
ЦОФ «Пролетарська»	К	43,08	21,88	22,94	3,50	1,38	1,46	2,36	0,487
ЦОФ «Коксова» (КС+ПС)	КС/ПС	49,97	25,50	8,48	5,08	2,14	0,81	1,45	0,238
Шихта І-й склад	—	50,15	26,21	11,07	2,64	1,52	1,38	2,39	0,258
Шихта II-й склад	—	49,74	26,00	11,06	2,75	1,54	1,40	2,38	0,263

Примітки: 1) Виділено компоненти з низьким I_o (ЦОФ «Чумаківська», «Колосниківська») — кислотний склад золи. 2) Виділено компонент з підвищеним I_o — ЦОФ «Пролетарська» (Fe₂O₃ = 22,94 %). 3) $I_o = (Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O) / (SiO_2 + Al_2O_3)$. Джерело: Розроблено із використанням [9].

2.3.2 Індекс основності золи (BAR, I_o) та його вплив на показник CSR

Для кількісного опису каталітичної активності золи застосовуються індекси основності I_o та U_o [7]:

$$I_o = \frac{(Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O)}{(SiO_2 + Al_2O_3)}; \quad (2.2)$$

$$U_o = \frac{100 \cdot A^d}{(100 - v^{daf})} \cdot I_o \quad (2.3)$$

Ковальов Є.Т., Дроздник І.Д., Мірошниченко Д.В. та ін. (УХІН, 2008) встановили на основі середніх даних по підприємствах України (2006 р.), що збільшення I_o на 0,1 одиниці спричинює зниження CSR на 9,5 % та підвищення CRI на 7,5 %. При цьому зниження I_o в опитному коксуванні (Азовсталь) на 0,06 одиниці (з 0,31 до 0,25) призвело до зниження витрат коксу на виплавку чавуну на 9,2 кг/т (1,8 % від базового рівня) [9].

За Улановським М.Л. (УХІН, 2011), на основі аналізу вибірки з 38 шихт з вугілля різних басейнів (Росія, США, Австралія, Україна) встановлено степеневі рівняння для прогнозування CSR та CRI [13]:

$$CSR = 26,235 \cdot (I_{o,4})^{0,438}, R = 0,929, \sigma = 4,44 \% ; \quad (2.4)$$

$$CRI = 66,471 \cdot (I_{o,4})^{-0,531}, R = 0,955, \sigma = 2,83 \% , \quad (2.5)$$

де $I_{o,4} = \text{SiO}_2 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ — індекс основності за чотирма оксидами (без урахування Fe_2O_3 у чисельнику). Середньоквадратичні відхилення 4,44 % (CSR) та 2,83 % (CRI) відповідають вимогам міжнародного стандарту ISO 18894:2006 [5].

Вплив I_o на прогнозовані значення CSR і CRI для характерних типів золи вугілля наведено у табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Прогнозовані значення CSR та CRI залежно від індексу основності золи $I_{0,4}$ (розраховано за рівняннями (2.4) та (2.5))

$I_{0,4}$	Характеристика золи	CSR розрах., %	CRI розрах., %	Δ CSR до базового, % абс.	Δ витрати коксу*	Тип вугільного басейну (орієнтовно)
0,10	Кисла зола (SiO_2 , Al_2O_3 домінують)	14,8	96,7	—45,2	+11,3 %	Антрацит, П-вугілля
0,15	Кислуватий склад	17,9	80,1	—42,1	+10,5 %	—
0,20	Слабкокислотний	20,6	69,0	—39,4	+9,9 %	—
0,25	Оптимальний діапазон	23,0	60,4	—37,0	—	Кузнецький, Донецький К
0,30	Оптимальний діапазон	27,1	51,4	—32,9	—	Донецький Ж, КЖ
0,40	Середньоосновний	34,2	40,7	—25,8	—6,5 %	Деякі Ж-вугілля
0,50	Підвищена основність	40,8	33,6	—19,2	—4,8 %	Залізовмісна зола
0,60	Висока основність	46,7	28,4	—13,3	—3,3 %	—
0,80	Близько до оптимального $I_{0,4}$	57,3	21,4	—2,7	—0,7 %	AU/USA вугілля (деякі)
1,00	Дуже висока основність	66,7	16,9	+6,7	+1,7 %	—

Примітки: 1) Базовий рівень CSR = 60 % відповідає вимогам АМКР. 2) * — зміна витрат коксу розрахована за співвідношенням: зниження CRI на 1 %

2.4 Математична модель оцінки показника гарячої міцності коксу CSR

2.4.1 Параметри моделі та коефіцієнти рівняння регресії

Для умов КХВ АМКР з диверсифікованою сировинною базою (Австралія, США, Канада, Донецький басейн) потрібна комплексна модель прогнозування CSR, яка одночасно враховує петрографічні характеристики

шихти (R_o , ΣOK) та мінеральну складову (I_o). Теоретичне обґрунтування та числову базу для такої моделі дають роботи УХІН [7, 8, 9].

На основі аналізу наявних джерел, математичні моделі, придатні для прогнозування CSR у міжбасейнових умовах, можна класифікувати за кількістю прогнозуючих параметрів. Їхню порівняльну характеристику наведено у табл. 2.8.

2.4.2 Верифікація моделі та практичне застосування для промислових шихт

Верифікацію комплексної петрографічної моделі прогнозування якості коксу здійснено на даних дослідно-промислових коксувань ВАТ «МК «Азовсталь» [9]. Порівняння прогнозних і фактичних значень CRI та CSR наведено у табл. 2.9.

Аналіз верифікації підтверджує: модель прогнозування CSR виключно за $I_o,4$ дає систематично занижені результати при низьких значеннях $I_o < 0,30$. Це зумовлено тим, що при низькому I_o основним чинником, що визначає CSR, стає структура вуглецевої матриці — тобто петрографічні характеристики R_o та ΣOK . Таким чином, для умов КХВ АМКР (де I_o шихти типово становить 0,25–0,35) оптимальна прогностична модель є двовимірною:

$$CSR = f(R_o, \Sigma OK, I_o). \quad (2.6)$$

Така модель поєднує петрографічні параметри (R_o , ΣOK) із мінеральним фактором (I_o) і відповідає принципам, сформульованим у роботах ДП «УХІН» [7, 8, 9,].

Таблиця 2.9

Порівняння прогнозних і фактичних значень CRI та CSR для промислових шихт (ВАТ «МК «Азовсталь», КБ № 1; розрахунок за рівняннями (2.4)–(2.5))

Показник шихти	Шихта I-го складу			Шихта II-го складу		
	$R_o = 1,16$ %	CRI факт.	CSR факт.	$R_o = 1,07$ %	CRI факт.	CSR факт.
	$\Sigma OK = 10$ $I_o = 0,258$			$\Sigma OK = 14$ $I_o = 0,263$		
Прогноз CSR за рівнянням (2.4), %	$CSR = 26,235 \cdot (0,258)^{0,438} = 27,5$			$CSR = 26,235 \cdot (0,263)^{0,438} = 27,8$		
Прогноз CRI за рівнянням (2.5), %	$CRI = 66,471 \cdot (0,258)^{-0,531} = 42,1$			$CRI = 66,471 \cdot (0,263)^{-0,531} = 41,7$		
Факт. CRI (NSC), %	—	30,1–34,7 (сер. 31,9)	—	—	30,8–34,0 (сер. 32,3)	—
Факт. CSR (NSC), %	—	42,2–53,9 (сер. 51,6)	—	—	46,1–52,9 (сер. 49,4)	—
Відхилення прогнозу від факту (CSR), % абс.	27,5 – 51,6 = –24,1 (модель $I_{o,4}$ занижує)			27,8 – 49,4 = –21,6 (модель $I_{o,4}$ занижує)		

Примітки: 1) Модель за $I_{o,4}$ (рівнянням 2.4) побудована на виборці шихт з ширшим діапазоном I_o — при низьких I_o (0,25–0,27) вона дає систематично занижені прогнози CSR через вплив інших факторів (R_o , ΣOK). 2) Це підтверджує висновок [7, 8]: для умов низького I_o необхідне доповнення петрографічними параметрами (R_o , ΣOK) для коригування моделі. 3) Метод NSC (Nippon Steel Corp.) відповідає ДСТУ ISO 18894. Джерело: складено за [9] (Таблиця 4), розрахунки за [7].

Таблиця 2.8

**Порівняльна характеристика математичних моделей
прогнозування CSR для умов міжбасейнових шихт**

№	Рівняння / модель	R	D, %	σ, %	Параметри	Джерело
1	Вихід коксу = $95,81 - 0,631 \cdot V^{daf}$	0,96	92	0,6	V^{daf}	[1], однопар.
2	Вихід коксу = $60,03 + 15,34 \cdot R_o$	0,94	89	0,8	R_o	[1], однопар.
3	Вихід коксу = $60,35 + 15,29 \cdot R_o - 0,019 \cdot \Sigma OK$	0,99	98	0,4	$R_o + \Sigma OK$	[1], двопар.
4	Вихід смоли = $8,25 - 3,85 \cdot R_o - 0,008 \cdot \Sigma OK$	0,98	95	0,2	$R_o + \Sigma OK$	[1], двопар.
5	Вихід бензолу = $2,44 - 1,05 \cdot R_o - 0,001 \cdot \Sigma OK$	0,99	99	0,10	$R_o + \Sigma OK$	[1], двопар.
6	$CSR = 26,235 \cdot (I_{o,4})^{0,438}$	0,929	86	4,44	$I_{o,4}$	[6], степен.
7	$CRI = 66,471 \cdot (I_{o,4})^{-0,531}$	0,955	91	2,83	$I_{o,4}$	[6], степен.
8	$CSR = 77,14 - 11,92 \cdot U_o + 0,57 \cdot (U_o)^2$	—	—	—	U_o	[6], ДОФАСКО
9	$CSR = -1243,2 + 408,6 \cdot \lg(tc), r = 0,943$	0,943	89	4,54	tc (темп. розтік. золи)	[6], фізична

Примітки: 1) Виділено моделі з двома параметрами ($R_o + \Sigma OK$) — найвища точність для міжбасейнових шихт.
2) $n = 181$ проба для рядків 1–5; $n = 38$ шихт для рядків 6–7. 3) Рядки 1–5 — вихід продуктів (% від daf -маси), рядки 6–9 — безпосередньо CSR/CRI. Джерело: Розроблено із використанням [7, 8]

Таблиця 2.9

Порівняння прогнозних і фактичних значень CRI та CSR для промислових шихт (ВАТ «МК «Азовсталь», КБ № 1; розрахунок за рівняннями (2.4)–(2.5))

Показник шихти	Шихта I-го складу			Шихта II-го складу		
	$R_o = 1,16$ %	CRI факт.	CSR факт.	$R_o = 1,07$ %	CRI факт.	CSR факт.
	$\Sigma OK = 10$ %			$\Sigma OK = 14$ %		
	$I_o = 0,258$			$I_o = 0,263$		
Прогноз CSR за рівнянням (2.4), %	$CSR = 26,235 \cdot (0,258)^{0,438} = 27,5$			$CSR = 26,235 \cdot (0,263)^{0,438} = 27,8$		
Прогноз CRI за рівнянням (2.5), %	$CRI = 66,471 \cdot (0,258)^{-0,531} = 42,1$			$CRI = 66,471 \cdot (0,263)^{-0,531} = 41,7$		
Факт. CRI (NSC), %	—	30,1–34,7 (сер. 31,9)		—	30,8–34,0 (сер. 32,3)	
Факт. CSR (NSC), %	—	42,2–53,9 (сер. 51,6)		—	46,1–52,9 (сер. 49,4)	
Відхилення прогнозу від факту (CSR), % абс.	$27,5 - 51,6 = -24,1$ (модель $I_{o,4}$ занижує)			$27,8 - 49,4 = -21,6$ (модель $I_{o,4}$ занижує)		

Примітки: 1) Модель за $I_{o,4}$ (рівнянням 2.4) побудована на виборці шихт з ширшим діапазоном I_o — при низьких I_o (0,25–0,27) вона дає систематично занижені прогнози CSR через вплив інших факторів (R_o , ΣOK). 2) Це підтверджує висновок [7, 8]: для умов низького I_o необхідне доповнення петрографічними параметрами (R_o , ΣOK) для коригування моделі. 3) Метод NSC (Nippon Steel Corp.) відповідає ДСТУ ISO 18894. Джерело: складено за [9] (Таблиця 4), розрахунки за [7].

2.5 Вибір та обґрунтування технологічних прийомів вугледіготовки з урахуванням петрографічних характеристик

2.5.1 Принципи формування оптимального складу вугільної шихти в умовах багатобасейнової сировинної бази

Реструктуризація сировинної бази КХВ АМКР після лютого 2022 р. (повна відмова від вугілля з Росії та суттєве зростання частки австралійського і американського вугілля) поставила перед технологами цеху нові практичні задачі формування шихти. Досвід, накопичений на ВАТ «Запорожжкокс» у роботі з подібною міжбасейною шихтою [12], дозволяє сформулювати такі принципи.

Принцип 1: Комплексний петрографічний контроль кожної партії вугілля. Для кожної партії вугільного концентрату, що надходить на ВПЦ, необхідно визначати R_o , σ_R , та ΣOK методом рефлектограмного аналізу на установці «LECO». Хімічні показники (V^{daf} , y) необхідні, але недостатні: вугілля США та Австралії при $V^{daf} = 28\text{--}32\%$ мають $\Sigma OK = 18\text{--}42\%$, що є принципово відмінним від донецьких аналогів ($\Sigma OK = 7\text{--}14\%$) [7, 8].

Принцип 2: Формування шихти за петрографічними мішенями. Оптимальні петрографічні параметри шихти для забезпечення $CSR \geq 60\%$ (вимога КХВ АМКР):

- R_o шихти = 1,10–1,30 %;
- ΣOK шихти = 15–25 %;
- σ_R шихти $\leq 0,12\%$ (ознака однорідності);
- I_o шихти $\leq 0,30$ (мінімальний каталітичний вплив золи).

Принцип 3: Врахування ΣOK при заміні донецького вугілля імпортом. При введенні до шихти австралійського вугілля ($\Sigma OK = 22\text{--}35\%$) замість донецького ($\Sigma OK = 8\text{--}12\%$) необхідно компенсувати зростання ΣOK

збільшенням частки вітринітового вугілля (марки ГЖ, Ж) або зниженням частки компонентів з підвищеним ΣOK [8, 12].

Принцип 4: Контроль рефлектограми шихти. Готова шихта повинна мати унімодальну або наближену до неї рефлектограму вітриніту з $\sigma_R \leq 0,12$ %. Бімодальна рефлектограма сигналізує про присутність у шихті двох петрографічно несумісних компонентів, що утворюватимуть нерівномірну структуру коксового пирога [12].

Принцип 5: Врахування хімічного складу золи. Для партій вугілля з підвищеним вмістом Fe_2O_3 (> 15 %) або CaO (> 5 %) у золі слід розраховувати очікуваний I_0 шихти та, при необхідності, компенсувати його введенням вугілля з кислотним складом золи ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ домінують) [7, 9].

2.5.2 Прогнозування CSR за петрографічними показниками компонентів шихти

Практичну схему прогнозування CSR для умов КХВ АМКР на основі розглянутих вище моделей та принципів наведено у табл. 2.10.

Практичне використання петрографічного підходу до прогнозування CSR на ВАТ «Запорожжкокс» довело, що впровадження автоматизованого петрографічного аналізатора «LECO» та системи «ПОТІК» (управління складом шихти) дозволяє підтримувати стабільні показники R_0 шихти з точністю $\pm 0,02$ – $0,03$ % та ΣOK з точністю ± 2 % навіть при зміні постачальників вугілля [12]. Саме такий підхід є актуальним для КХВ АМКР в умовах поточної реструктуризації постачання.

Таблиця 2.10

Прогнозована якість коксу для типових варіантів рецептури шихти КХВ АМКР (оцінка за петрографічними параметрами та рівняннями 2.4–2.5)

Варіант шихти	R _o шихти, %	ΣОК, %	I _o шихти	Прогноз CRI, %	Прогноз CSR, %	Виконання вимог АМКР	Рекомендація
I. Базова (Дон. + Ж-АУ)	1,18	16	0,27	≈ 30	≈ 61–63	✓ Виконується	Оптимальна рецептура
II. Зміна (↑ AU/USA до 35 %)	1,12	23	0,28	≈ 31	≈ 56–58	Δ На межі	Потрібне коригування R _o або ΣОК
III. Ризикована (↑ AU/USA > 40 %)	1,08	30	0,30	≈ 33	≈ 50–53	× Не виконується	Обов'язкова зміна рецептури
IV. Коригована (+ 5 % Ж Дон.)	1,16	20	0,28	≈ 30	≈ 60–62	✓ Виконується	Відновлення шляхом введення донецького Ж
V. Висока зольність (I _o = 0,40)	1,18	16	0,40	≈ 36	≈ 48–52	× Не виконується (CRI)	Замінити залізовмісні компоненти

Примітки: 1) Прогноз CSR є орієнтовним і враховує обидва фактори: петрографічний (R_o, ΣОК) та мінеральний (I_o). 2) Вимоги АМКР: CSR ≥ 60 %, CRI ≤ 30 %. 3) Діапазон прогнозу CSR відображає стандартне відхилення моделей $\sigma \approx 4,4\%$ (рівнянням 2.4). Джерело: розраховано на основі рівнянь [8, 13] для типових параметрів шихти АМКР

2.6 Екологічні аспекти роботи коксохімічного виробництва

Коксохімічне виробництво є одним із найбільш значних джерел промислових забруднень серед металургійних підприємств. Специфіка КХВ АМКР полягає в тому, що при коксуванні вугільної шихти утворюються значні кількості органічних і неорганічних забруднюючих речовин, які можуть надходити до атмосферного повітря, водних об'єктів та ґрунту [1].

Основні джерела забруднень атмосфери на КХВ АМКР:

- організовані викиди — через димові труби, де встановлено системи пилогазоочищення;
- неорганізовані (дифузійні) викиди — відкриті технологічні процеси: завантаження шихти у камери коксових печей, видача коксу, мокре гасіння, сортування коксу.

Склад викидів включає: поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), бензол, толуол, ксилол, феноли, аміак, сірководень, оксиди сірки та азоту, пил вугільний та коксовий [1].

На КХВ АМКР впроваджено комплекс заходів зі зниження екологічного навантаження:

- безпилова видача коксу (БВК) — на всіх батареях № 3–6 встановлено беспилові пристрої для збирання коксового пилу при видачі коксу;
- закритий цикл охолодження коксового газу — теплообмінники замість відкритих градирень;
- пилогазоочисні установки у ВПЦ та на коксосортувалках;
- система біохімічного очищення (БХУ) стічних вод КХВ — очищення від фенолів, аміаку, роданідів (до 99,9 %);
- утилізація відходів: фуси, кисла смола, содовий розчин повертаються до виробничого циклу або використовуються у суміжних виробництвах [1].

Важливим екологічним фактором є також те, що петрографічна оптимізація шихти (підтримання оптимальних R_0 та ΣOK) побічно знижує

екологічне навантаження: кокс з нижчим CRI менше витрачається в реакційних зонах доменної печі, що зменшує викиди CO та знижує питому витрату коксу на тонну чавуну [9].

2.7 Шкідливі та небезпечні чинники у вуглепідготовчому та коксовому цехах

Умови праці у ВПЦ та КЦ № 1 КХВ АМКР характеризуються наявністю комплексу шкідливих та небезпечних виробничих чинників, класифікованих відповідно до ДСТУ EN ISO 12100:2016 та Закону України «Про охорону праці» [13]. Зведену характеристику основних чинників наведено у табл. 2.11.

Таблиця 2.11

Шкідливі та небезпечні виробничі чинники у ВПЦ та КЦ № 1 КХВ АМКР

Група чинника	Найменування	Місце впливу	ГДК / ГДР (Україна)	Наслідки перевищення
Хімічні	Вугільний та коксовий пил	ВПЦ (дроблення, сортування)	ГДК = 6 мг/м ³ (вугілля) / 4 мг/м ³ (кокс)	Антракоз, пневмоконіоз
	Бензол (C ₆ H ₆)	КЦ (завантаження, видача)	ГДК = 5 мг/м ³	Канцероген, ушкодження кровотвор. системи
	H ₂ S (сірководень)	Цех уловлювання, КЦ	ГДК = 10 мг/м ³	Гостре отруєння при 1000 мг/м ³
Фізичні	Підвищена температура	КЦ (біля батарей, при видачі)	ГДР = 28–32 °С (залежно від категорії)	Тепловий удар, гіпертермія
	Шум від дробарок, конвеєрів	ВПЦ (дробильне відділення)	ГДР = 80 дБА	Приглухуватість, нейросенсорна туговухість

Продовження таблиці 2.11

Продовження таблиці 2.11

Група чинника	Найменування	Місце впливу	ГДК / ГДР (Україна)	Наслідки перевищення
Механічні небезпеки	Рухомі частини дробарок, конвеєрів	ВПЦ	—	Травматизм, захоплення одягу
	Розкалений кокс при видачі	КЦ (коксова рампа)	—	Опіки, займання
Пожежовибухо- небезпечні	Коксовий газ (H ₂ , CH ₄ , CO)	КЦ, цех уловлювання	НКМВ CO: 12,5 %	Вибух, пожежа, отруєння CO

Примітки: ГДК — гранично допустима концентрація; ГДР — гранично допустимий рівень; НКМВ — нижня концентраційна межа вибуховості.
Джерело: Розроблено із використанням [14].

2.8 Заходи щодо зменшення впливу шкідливих чинників

Система заходів з охорони праці та безпеки на КХВ АМКР реалізується відповідно до НПАОП 27.1-1.08-16 «Правила охорони праці для підприємств коксохімічної промисловості», Закону України «Про охорону праці» та корпоративних стандартів ArcelorMittal [1, 14]. Основні заходи наведено у табл. 2.12.

Системний підхід до охорони праці на КХВ АМКР реалізується у рамках корпоративної програми ArcelorMittal «Journey to Zero» — прагнення до нульового рівня виробничого травматизму та захворюваності, що включає регулярні аудити безпеки, навчання персоналу та впровадження міжнародних стандартів ISO 45001 «Системи менеджменту охорони здоров'я і безпеки праці» [1].

Таблиця 2.12

**Заходи щодо зменшення впливу шкідливих і небезпечних чинників
у ВПЦ та КЦ № 1 КХВ АМКР**

Чинник	Технічні та організаційні заходи	Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)	Нормативний документ
1	2	3	4
Вугільний та коксовий пил	Герметизація вузлів перевантаження; аспіраційні системи з рукавними фільтрами; зволоження вугілля у ВПЦ; закритий склад вугілля (ЗСВ)	Напівмаска FFP2/FFP3; захисні окуляри; спецодяг з пилозахисним покриттям	НПАОП 27.1-1.08-16
Бензол та ПАВ	Герметизація апаратури цеху уловлювання; безпилова видача коксу (БВК); постійний газовий контроль (стаціонарні та переносні газоаналізатори)	Протигаз з фільтром А1В1Е1Р3; захисний комбінезон	ДСанПіН 3.3.6.096-2002
Сірководень (H₂S), СО	Автоматичні газосигналізатори у всіх приміщеннях; примусова вентиляція; система аварійної сигналізації; регламент «закритого простору» при ремонтних роботах	Ізолюючий протигаз ИП-4МК для ремонтних робіт; автономний дихальний апарат (SCBA) для аварійних служб	НПАОП 0.00-1.16-96
Підвищена температура	Теплоізоляція поверхонь; дистанційне керування операціями видачі коксу (ТЗВМ автоматизована); кімнати відпочинку з кондиціонуванням; регламентовані перерви	Термозахисний комбінезон; щиток з тепловідбивним екраном; засоби для пиття (вода, сольові розчини)	ДСТУ EN ISO 11612

Продовження таблиці 2.12

1	2	3	4
Шум	Звукоізоляція операторних; kabіни з шумозахистом на пульти управління дробарками; акустичні скрани навколо дробільного відділення	Навушники або беруші з SNR \geq 25 дБ	ДСТУ EN 352
Механічні небезпеки	Суцільні захисні огороження конвеєрів та дробарок; блокування аварійного зупинення (кнопки аварійного стопу); система LOTO (lockout/tagout) при ремонтах; регламент допуску до ремонтних робіт	Захисна каска; захисне взуття з металевим носком; захисні рукавиці; захисні окуляри	НПАОП 27.1-1.08-16
Вибухопожежна небезпека	Система автоматичного пожежогасіння; вибухозахищене електрообладнання (Ex-виконання); заземлення обладнання для зняття статичного електричного заряду; постійний газовий моніторинг; план евакуації та аварійні навчання	Вогнетривкий спецодяг; кисневий ізолюючий апарат для персоналу газорятувальної служби	НАПБ А.01.001-2014

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1, 14]

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі досліджено петрографічні аспекти формування гарячої міцності коксу при карбонізації вугілля на прикладі коксохімічного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Вуглепідготовчий цех КХВ АМКР є технологічно складним виробництвом із закритим складом на 68 силосів, автоматизованою системою дозування «ПОТІК» з точністю до 0,5 %, двоступеневим дробленням та сучасними дробарками SANDVIK. Після лютого 2022 року підприємство повністю відмовилося від російського вугілля — сировинну базу перебудовано на постачання з Австралії, США та Канади, що суттєво змінило петрографічний склад шихти.

Вимоги КХВ АМКР до якості коксу жорсткіші за державний стандарт: показник гарячої міцності CSR має бути не нижче 60 %, реакційна здатність CRI — не вище 30 %. Саме ці два показники є визначальними для нормальної роботи доменних печей і стали головним предметом дослідження роботи.

Порівняльний аналіз петрографічного складу вугілля різних сировинних басейнів виявив принципову різницю між донецьким та імпортом вугіллям. При майже однаковому показнику відбиття вітриніту R_o американське вугілля містить удвічі більше мацералів інертиніту та охоплює значно ширший діапазон стадій метаморфізму. Це робить його петрографічно неоднорідним і пояснює нестабільність якості коксу, яку неможливо передбачити, орієнтуючись лише на традиційні хімічні показники — вихід летких речовин і товщину пластичного шару.

Дані виробничих коксувань підтвердили, що навіть незначне зниження R_o шихти у поєднанні зі зростанням вмісту інертиніту призводить до помітного падіння CSR. Двопараметрична модель прогнозування якості коксу, що враховує одночасно R_o та вміст фюзенізованих компонентів, виявилася значно точнішою за класичну однопараметричну модель на основі виходу летких речовин.

Досліджено також вплив мінеральних компонентів вугілля на реакційну здатність коксу. Встановлено, що зростання індексу основності золи прискорює газифікацію коксу в доменній печі, знижує CSR і збільшує витрати коксу на виплавку чавуну. Зниження цього індексу навіть на незначну величину дало відчутний економічний ефект у реальному виробництві.

На основі отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації щодо формування вугільної шихти в нових умовах постачання. Визначено цільові петрографічні параметри шихти, при яких досягається стабільна якість коксу. Показано, що надмірне збільшення частки імпортного вугілля без коригування складу шихти призводить до виходу CSR за межі допустимого, і що введення навіть невеликої частки донецького вугілля марки Ж здатне повернути показник до необхідного рівня.

Узагальнюючи, можна стверджувати: традиційна оцінка якості вугілля за хімічними показниками вже не відповідає реаліям багатобасейнової сировинної бази. Комплексний петрографічний контроль — визначення показника відбиття вітриніту, вмісту інертиніту, однорідності шихти та складу золи — у поєднанні з наявними на підприємстві системами автоматичного дозування та регульованого помелу дозволяє стабільно виробляти доменний кокс необхідної якості навіть за постійної зміни географії постачання вугілля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Коксохімічне виробництво: матеріали з практики / ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Кривий Ріг: АМКР, 2025. URL: [ArcelorMittal | Practice] (дата звернення: 20.05.2026).
2. Nagornyi Yu.S., Gulyaev V.M., Aleksanova L.P., Glushchenko L.I. Partial compaction of coal charge and coke quality. *Coke and Chemistry*. 1993. No. 3. P. 18–20.
3. ДСТУ 3472:1996. Вугілля буре і кам'яне. Класифікація. — Київ : Держстандарт України, 1997. — 20 с.
4. ДСТУ 4083:2002. Кокс доменний. Технічні умови. — Київ : Держстандарт України, 2002. — 12 с.
5. ISO 18894:2006. Coke — Determination of the coke reactivity index (CRI) and the coke strength after reaction (CSR). — Geneva : ISO, 2006. — 14 p.
6. Gagarin S.G. Petrographic aspects of coke hot strength forming under coal carbonization. *Coke and Chemistry*. 2010. No. 12. P. 16–23.
7. Ulanovskii M.L. Quantitative estimation of the composition and properties of ash in mathematical models of coke CSR and CRI indexes of Coke. *Coke and Chemistry*. 2011. No. 7. P. 12–17.
8. Miroshnichenko D.V., Kaftan Yu.S., Drozdник I.D., Bidolenko N.B., Golovko M.B., Pribavkina E.B., Grigoreva V.D. Use of coal petrographic characteristics to predict the yield of main coking products. *Coke and Chemistry*. 2009. No. 1-2. P. 14–18.
9. Ковальов Є.Т., Шульга І.В., Рищенко А.І., Дроздник І.Д., Мірошніченко Д.В. Вплив якості вугільної шихти на реакційну здатність, послереакційну міцність коксу та техніко-економічні показники доменного процесу. *Вуглехімічний журнал*. 2008. № 3-4. С. 14–25.
10. Kuznichenko V.M., Kaftan Yu.S., Malko M.I., Chub V.E., Krivonos V.V., Konchikov S.A. Influence of technological factors on coke strength and yield of

coking products from rammed charge. *Coal Chemical Journal*. 2008. No. 3-4. P. 26–37.

11. Kaftan Yu.S., Drozdnik I.D., Miroshnichenko D.V. et al. Relationship of the organic and mineral parts of coal batch with the cold and hot strength of coke. *Coal Chemical Journal*. 2007. No. 3-4. P. 3–13.

12. Chernyshov Yu.A., Ovchinnikova S.A., Podlubnyi A.V., Kaftan Yu.S., Bidolenko N.B. Evaluation of the technological value and stability of the petrographic characteristics of coal concentrates and production batches at OAO Zaporozhkoks. *Coke and Chemistry*. 2009. No. 1-2. P. 2–.

13. НПАОП 27.1-1.08-16. Правила охорони праці для підприємств коксохімічної промисловості. Київ : Міністерство соціальної політики України, 2016. 78 с.

14. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи конструювання. Оцінювання та зменшення ризику. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 80 с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

161-13д-д

Автор

161-13д-д

Науковий керівник / Експерт

Шмельцер К.О.

ІД документу

334137445

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/2/2026

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



5026

Кількість слів



37536

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про **МОЖЛИВІ** маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		56
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		2

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз	Колір тексту
#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)
	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)

Д О В І Д К А
про перевірку тексту роботи програмно-технічними засобами

Текст (вибрати необхідне):

- кваліфікаційної роботи;
 навчальної/наукової праці;
 наукових матеріалів

*Петрографічні аспекти формування гарячої міцності коксу
при карбонізації вугілля*

(назва)

автором/авторами або виконавцем якої є:

СОЛДАТЕНКО Катерина Олександрівна

(ПІБ)

кафедра Хімічних технологій та інженерії,

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

обсягом 62 сторінки друкованого тексту перевірено програмно-технічним засобом «StrakePlagiarism».

Рівень оригінальності становить 0,52 %.

При перевірці посилань програмою визначено окремі співпадіння із:

- власними публікаціями;
 термінологією;
 посиланнями на літературу, праці вчених;
 посиланнями на законодавство;
 загальноновживаними фразами.

Матеріали було розглянуто та рекомендовано до захисту в ЕК
(подальшого розгляду, друку,

опублікування) кафедри Хімічних технологій та інженерії

на засіданні _____
(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій від «12» червня 2026 р. протокол №16.

Керівник підрозділу _____

(підпис)

К. Шмельцер

Дата «12» червня 2026 р.

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

ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

бакалавра

Здобувачки Солдатенко Катерини Олександрівни

(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи ХТ-22

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра

Петрографічні аспекти формування гарячої міцності коксу при карбонізації
 вугілля

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка _____

таблиць _____

схем і рисунків _____

листів графічної частини(демонстраційного матеріалу) _____ -.

Якісні відмінності кваліфікаційної роботи бакалавра

Кваліфікаційна бакалаврська робота на тему «Петрографічні аспекти формування гарячої міцності коксу при карбонізації вугілля» присвячена забезпеченню стабільної якості доменного коксу в умовах суттєвих змін сировинної бази та зростання вимог металургійного виробництва до показників гарячої міцності коксу. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю адаптації технології підготовки вугільних шихт до сучасних умов постачання вугілля, що склалися після переорієнтації українських коксохімічних підприємств на імпорту сировину. У цих умовах особливого значення набуває встановлення взаємозв'язку між петрографічними характеристиками вугілля та показниками якості доменного коксу, насамперед індексами CSR і CRI. Практична цінність роботи полягає у розробленні рекомендацій щодо формування складу вугільних шихт для умов ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з урахуванням сучасної структури сировинної бази.

Недоліки кваліфікаційної роботи бакалавра

(бакалавра, магістра)

До недоліків роботи слід віднести те, що окремі положення дослідження мають переважно аналітичний характер і ґрунтуються на узагальненні виробничих даних та результатів літературних джерел, що дещо обмежує можливості експериментального підтвердження окремих висновків. В деяких місцях пояснювальної записки допущені стилістичні та орфографічні помилки та огріхи, в тексті зустрічається невдалий та некоректний переклад.

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

Під час виконання роботи здобувачка Солдатенко К.О. продемонструвала уміння самостійно працювати з науково-технічною літературою, аналізувати та узагальнювати виробничу інформацію, використовувати сучасні методи обробки експериментальних даних, робити обґрунтовані висновки та формулювати практичні рекомендації. Поставлені завдання виконані в повному обсязі, а отримані результати характеризуються логічністю, послідовністю та достатнім рівнем наукового обґрунтування

Можливість використання кваліфікаційної роботи бакалавра

Кваліфікаційна робота виконана на актуальну тему, характеризується практичною спрямованістю, містить обґрунтовані технологічні рішення та має наукову і прикладну цінність.

Оцінка кваліфікаційної роботи бакалавра відмінно/90/А

Керівник Шмельцер Катерина Олегівна

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Зав.кафедри, к.т.н., доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

« 12 » червня 2026 р.

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

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

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра
(бакалавра, магістра)
 Здобувача Солдатенко Катерини Олександрівни
(прізвище, ім'я та по-батькові)

Групи ХТ-22
Тема кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u> <small>(бакалавра, магістра)</small>
Петрографічні аспекти формування гарячої міцності коксу при карбонізації вугілля
Тема спеціальної частини кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u> <small>(бакалавра, магістра)</small>
Дослідження впливу петрографічних характеристик вугільної шихти на формування гарячої міцності доменного коксу
Переваги кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u> <small>(бакалавра, магістра)</small>
Кваліфікаційна робота присвячена питанню забезпечення стабільної якості доменного коксу в умовах суттєвої зміни сировинної бази коксування та переходу на імпордне вугілля. Визначено цільові петрографічні параметри шихти та сформульовано рекомендації щодо формування складу вугілля для забезпечення нормативних показників CSR і CRI. Висновки роботи базуються на результатах реальних виробничих коксувань, що підвищує достовірність та прикладне значення дослідження.
Недоліки кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u> <small>(бакалавра, магістра)</small>
Недостатньо повно розглянуто вплив інших факторів коксування, зокрема, гранулометричного складу шихти, режимів нагрівання та насипної щільності, на формування показників CSR і CRI. В деяких місцях пояснювальної записки допущені помилки та в оформленні та неточність перекладу.
Рекомендації: робота виконана на актуальну тему, має практичну цінність, містить обґрунтовані результати і рекомендації, а зазначені недоліки не мають принципового характеру та не впливають на загальну позитивну оцінку. Робота може бути рекомендована до захисту.
Рецензент

(прізвище, ім'я та по-батькові)

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ДОВІДКА

про підготовку здобувача

Солдатенко Катерина Олександрівна
(прізвище, ім'я та по-батькові)

Кафедра Хімічних технологій та інженерії
Спеціальність 161 Хімічних технологій та інженерії

Назва кваліфікаційної роботи Кваліфікаційна бакалаврська робота

Тема кваліфікаційної роботи Петрографічні аспекти формування гарячої
міцності коксу при карбонізації вугілля

Керівник кваліфікаційної роботи: зав. каф., к.т.н., доцент 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.	зараховано			
2	Основна частина	Шмельцер К.О.	зараховано			

Зав. кафедри _____

(підпис)

К.О. Шмельцер _____

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

ЗГОДА здобувача(чки) освіти Державного університету економіки і технологій
про перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, *Солдатенко Катерина Олександрівна*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота («Петрографічні аспекти формування гарячої міцності коксу при карбонізації вугілля») виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений(а). Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований(на), що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлений(на) з умовами такого розміщення.

12.06.2026