

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

Ткаленко І. Ph.D., техн. директор

компанія AMCOM GROUP LLC, США.

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВЗАЄМОДІЇ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ ПРИ ЇХ РЕЦИКЛІНГУ

Тверді металургійні відходи – шлаки, шлами, металургійний пил займають значну нішу мінеральних промислових втрат, обсяги яких у всьому світі не тільки не зменшуються, але й мають тенденцію до систематичного збільшення [1]. Одним з ефективних способів мінімізації твердих металургійних відходів є їх комплексна переробка і пов'язані з ними нові матеріали, сировинні та металізовані брикети, суміші, в'язучі речовини і заповнювачі [2, 3, 4]. Залежно від їх складової можна отримати широкий асортимент нових продуктів, які мають свою товарну цінність і використовуються в різних галузях сучасної промисловості [5].

Будь-який технологічний процес орієнтований на отримання певної корисної продукції. Відходи є неминучою складовою таких процесів і являють собою продукт з невпорядкованою структурою або апіорі незмінними властивостями деяких компонентів сировинної бази технологічного процесу. Тоді одержуваний товарний продукт від цього технологічного процесу є певною впорядкованою частиною сировини, з якої її отримують. Мірою невпорядкованості таких систем є їх ентропія або зміна ентропії в залежності від прийнятих дій. Аналогічний підхід в іншому тлумаченні був описаний в роботі [6].

Систематизуємо 12 найбільш типових металургійних відходів, які складають значну частку всіх промислових відходів, що зберігаються на Землі, і які ляжуть в основу наших подальших досліджень (таблиця 1).

Таблиця 1 – Маркування і ентропія для основних металургійних відходів, прийнятих в роботу.

№№ (р)*	Назва відходу	Означення відходу	Ентропія S_p , у.е.
1	Доменний шлам	b_1	4,0
2	Конвертерний шлам	b_2	3,9
3	Доменний (колошниковий) пил	b_3	3,8
4	Конвертерний пил	b_4	3,7

5	Електросталеплавильний пил	b_5	3,6
6	Конвертерний шлак	b_6	2,7
7	Електросталеплавильний шлак	b_7	2,6
8	Доменний шлак	b_8	2,5
9	Електросталеплавильна окалина	b_9	1,9
10	Конвертерна окалина	b_{10}	1,8
11	Мельнична окалина	b_{11}	1,8
12	Прокатна окалина	b_{12}	1,7

*) надалі в індексації відходів приймається що $p \sim q \sim r \sim t$

Для кожного відходу b_p , де: $p = 1,1,12$, визначається величина ентропії $S_p = S_q$, як показник неупорядкованості системи, де $q = 1,1,12$ – значення q -го відходу, як відповідна реакція на взаємодію з p – м відходом. Кожна взаємодія порівнюється зі зміною ентропії $\Delta S_{p,q}$ при парній взаємодії металургійних відходів, виходячи з їх фізико-хімічних і механічних та термічних властивостей. Для моделювання трьох- або чотирьохкомпонентних брикетів за їх складом беремо за основу матрицю суміжності відповідного формату - з двох-, трьох-, або чотирьохкоординатної p, q, r, t – сіткою (рис. 1 і рис. 2).

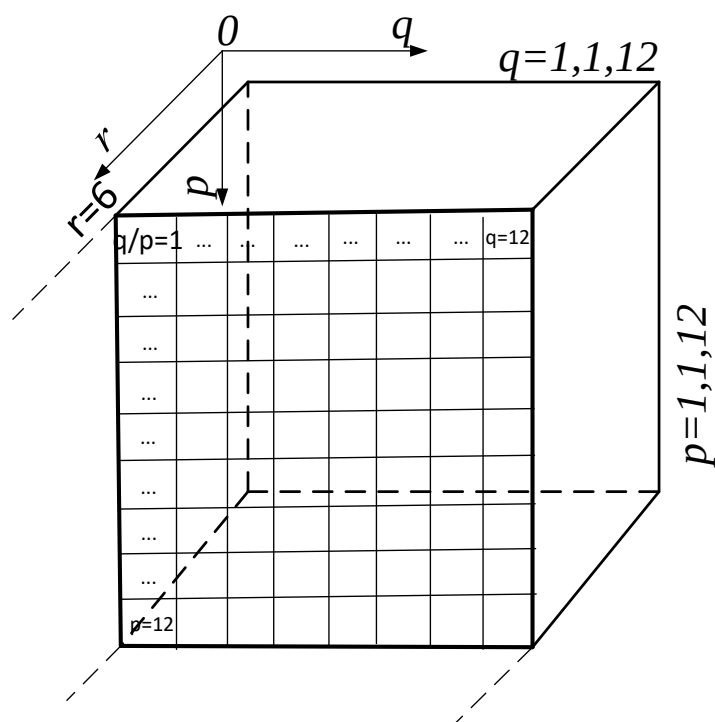


Рисунок 1 – Графічна модель матриці суміжності для 12 металургійних відходів в розрізі з $r = 6$.

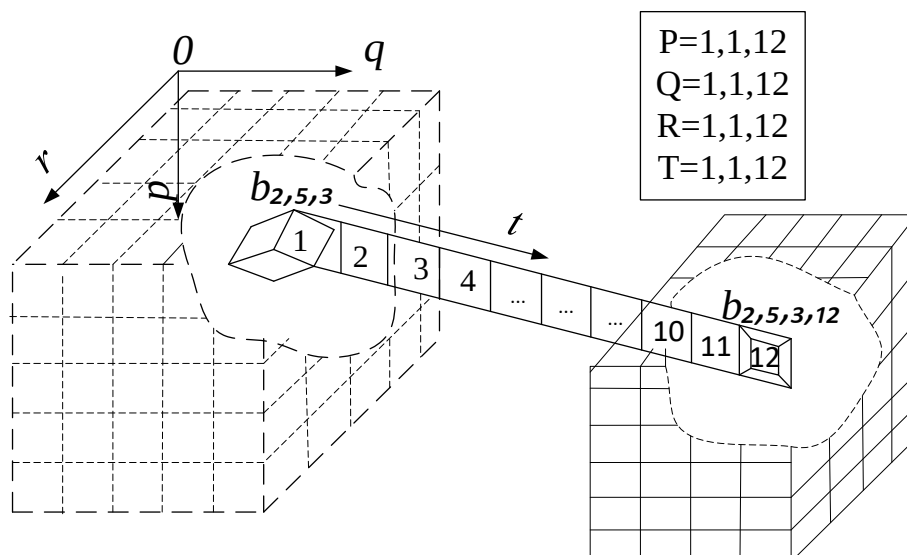


Рисунок 2 – Модель чотирьохкомпонентної чотиривимірної матриці суміжності для 12 типових металургійних відходів та ілюстрація моделі брикету, яка прийнята за стандарт з формулою взаємодії $b_{\text{брик}} = b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$.

Як випливає з даних (рис. 3), існує досить чітка градація багатокомпонентних металургійних відходів як сировини для товарних продуктів за їх ефективністю. Наприклад, у залежності від хімічного і гранулометричного складів, наявності в сумішах в'язучих речовин ефективність двокомпонентних сумішей на основі шламу, пилу або окалини не може перевищувати 60% від початкової кількості прийнятих металургійних відходів. Для трикомпонентних виробів цей «ккд» досягає вже 60-80%, а для чотирьохкомпонентних - понад 90%.

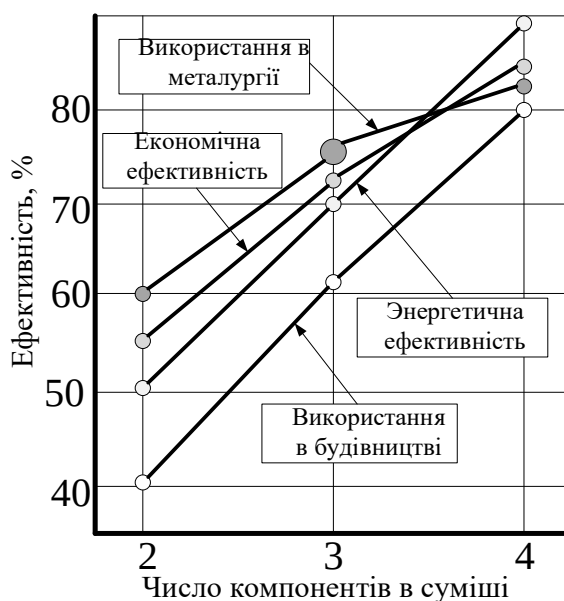


Рисунок 3 – Ефективність використання перероблених багатокомпонентних металургійних відходів.

Матриця суміжності дозволяє оцінити, чи зможуть двійки відходів з індексами p та q взаємодіяти для отримання товарної продукції як безпосередньо, так і з використанням додаткових матеріалів. Взаємодії умовно оцінюються на основі фізико-хімічної сумісності (наприклад, хімічний розподіл і гранулометричний склад, реакційна здатність) і задокументованих процесів рециклінгу. Знак «+» у двокомпонентній матриці виду вказує на можливу взаємодію, що веде до корисного продукту (наприклад, цементу, заповнювачів або відновлення металу), а «-» вказує на відсутність відомої або іншої практичної взаємодії через несумісні властивості або відсутність процесів.

/q	$\Delta S_{p,q}$											
	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}
b_1		1,55	1,74	1,61	1,58	2,09	2,05	2,01	1,82	1,77	1,75	1,78
b_2			1,59	1,55	1,52	1,91	1,89	1,88	1,74	1,75	1,71	1,69
b_3				1,48	1,54				1,64	1,61	1,59	1,59
b_4					1,44	1,81	1,79	1,78	1,65	1,63	1,60	1,59
b_5						1,75	1,72	1,69	1,54	1,54	1,51	1,49
b_6							1,33	1,29	1,16	1,14	1,11	1,09
b_7								1,21	1,13	1,11	1,10	1,10
b_8									1,12	1,12	1,10	0,9
b_9										0,85	0,83	0,81
b_{10}											0,77	0,71
b_{11}												0,70

В якості попереднього результату ентропія кінцевого продукту в цьому дослідженні була розрахована за допомогою непрямих і корелятивних оцінок. Для розрахунку використовувалася спрощена модель Шеннона, адаптована під хімічну та структурну складність компонентів: $S_i = -\sum P_j \ln P_j + S_{\text{структ.}}$, де: P_j — імовірність знаходження компонента j (оцінюється, наприклад, за часткою основних оксидів або

металів) у відходах; $S_{\text{структ.}}$ — внесок ентропії від фазового стану і розміру частинок (оцінюється якісно) для j -го компоненту.

Зміна ентропії системи по відношенню до взаємодії двох відходів визначається як $\Delta S_{p,q} = S_{\text{прод.}} - (S_p + S_q)$ де: $S_{\text{прод.}}$ — ентропія результуючої системи після взаємодії, яка оцінюється виходячи з характеру і числа взаємодій, а також властивостей продукту; S_p і S_q — стандартна ентропія окремих відходів. Якщо в результаті взаємодії утворюється впорядкована система (наприклад, кристалічний продукт, агломерат), то $\Delta S_{p,q} < 0$. Якщо продукт залишається неупорядкованим (наприклад, аморфний шлак), то $\Delta S_{p,q} \rightarrow 0$ або злегка позитивний.

Двовимірна матриця суміжності для $b_{p,q}$ показує, що переважна більшість двійок відходів b_p, b_q може взаємодіяти з утворенням цінних продуктів, таких як цемент, метали, заповнювачі, шлакові ситалії та добрива. Але ефективність їх не велика. Найбільш значна зміна ентропії для одержуваного продукту спостерігається при взаємодії сильно неупорядкованих відходів (пил, шлак) з упорядкованими відходами (окалиною, шлаком).

Далі ми розглянемо багатокомпонентні (в даному випадку чотирьохкомпонентні) взаємодії металургійних відходів для створення стандартних і альтернативних брикетів. Такий підхід, заснований на переробці комплексу неорганічних відходів, дає більше можливостей для пошуку прийнятних варіантів отримання товарної продукції [7]. Метод заснований на аналізі трикомпонентної матриці суміжності b_p, b_q, b_r (див. рис. 1) з розширенням її до чотирьохкомпонентної матриці b_t, b_p, b_q, b_r шляхом відображення параметрів, необхідної для аналізу комірки трикомпонентної матриці суміжності з параметрами b_p, b_q, b_r та визначення її суміжності щодо компоненти b_t ($t = 1, 1, 12$) (див. рис. 2). Як і раніше, за показник ефективності використання металургійних відходів ми беремо динамічні зміни ентропії як фактор, що визначає не тільки стабільність, але і конструкційні властивості одержуваного продукту, в даному випадку брикетів.

Для стандартного складу брикету $(b_2 + b_5 + b_3 + b_{12})$ і обчислюються альтернативні комбінації: зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t} = S_{\text{прод.}} - (S_p + S_q + S_r + S_t)$, де $S_{\text{прод.}}$ — ентропія брикету (оцінюється в 1,5 у.о. за аналогією з цементно-зв'язаним агломератом), а також сумарна ентропія $S_{\text{повн}} = S_p + S_q + S_r + S_t$.

Нижче представлений фрагмент матриці, що включає складову стандартного брикету і його альтернативні варіанти, які забезпечують аналогічні, або інші

властивості. Повна матриця (12x12x12x12) досить велика для ілюстрації, тому її ключові комірки покажемо так:

$b_{p,q,r}$	$b_{p,q,r,t}, \Delta S_{2,5,3,12}$			
	$b_2/b_5/b_3$	$b_2/b_5/b_1$	$b_2/b_3/b_1$	$b_5/b_3/b_1$
$b_2/b_5/b_3 \quad (t=1)$	-	+(-2,5)	+(-2,5)	+(-2,5)
$b_2/b_5/b_1 \quad (t=1)$	-	-	-	+
$b_2/b_3/b_1 \quad (t=1)$	+	+	-	-
$b_5/b_3/b_1 \quad (t=1)$	+	+(-2,4)	+(-2,4)	-
...	...	...	...	...
$b_{p,q,r}, \quad t=1 \div 12$	-	-	-	-
...	...	...	...	...
$b_2/b_5/b_1 \quad (t=12)$	-	-	+(-2,3)	+(-2,2)
...	...	...	...	...
$b_2/b_3/b_1 \quad (t=12)$	+	+(-2,3)	-	+(-2,0)
...	...	...	...	...
$b_2/b_3/b_1 \quad (t=10)$	-	+(-2,2)	-	+(-1,9)
...	...	...	...	...
$b_2/b_5/b_3 \quad (t=12)$	-	+(-2,2)	+(-2,1)	+(-2,1)
...	...	...	...	...
$b_5/b_3/b_1 \quad (t=12)$	+(-2,1)	+(-1,9)	+(-1,8)	+(-1,4)
...	...	...	...	...
$b_5/b_3/b_1 \quad (t=11)$	+(-2,0)	+(-1,8)	+(-1,5)	-

Альтернативні комбінації в матриці засновані тільки на структурних варіантах і отриманих завдяки цьому нових властивостях готового продукту (брикету). Визначаються види відходів, що дозволяють отримати брикет зі схожими властивостями, виходячи зі складу і технології брикетування.

Розглянемо стандартний брикет, що має чотири складові b_2, b_5, b_3, b_{12} . Його формула: $b_{\text{брик}} = b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$ включає конвертерний шлам, електросталеплавильний та доменний пил і прокатну окалину. Ентропія компонентів ($S_2= 3.9$), ($S_5= 3.6$), ($S_3= 3.8$), ($S_{12}= 1.7$). Повна ентропія системи, включає параметри всіх компонентів $S_{\text{повн}} = 13.0$ у.о.

Ентропія отриманого брикету: $S_{\text{брик}}=1.5$ у.о. (попередньо, ентропійний аналог цементно-зв'язаного агломерату). Зміна ентропії системи: $\Delta S_{2,5,3,12} = S_{\text{брик}} - (S_2 + S_5 + S_3 + S_{12}) = 1.5 - (3.9 + 3.6 + 3.8 + 1.7) = 1.5 - 13.0 = -11.5$ у.о.

Властивості брикетів.

Механічна міцність поділяється на міцність на стиск ≥ 20 МПа, ударну в'язкість $\geq 90\%$ (барабанне випробування), завдяки цементній зв'язці (8-10%) і коксовому відсіву, який забезпечує вуглець для відновлення. Умовою температурної стійкості є стійкість брикету до температурних деформацій в межах 700–1000 °С за рахунок оксидів заліза (Fe_2O_3) у складі окалини та пилу, а також вуглецю в b_3 , що запобігає розкладанню при відновленні. Хімічний склад характеризується високим вмістом Fe (50-60% з окалини та пилу), вуглецю (5-10% від b_3 і коксу), CaO (2-5% від b_2 , Zn і Pb (видаляється при плавленні). Умовний технологічний процес включає змішування компонентів стандартного брикету b_2, b_5, b_3, b_{12} з відсівом коксу (5-10%) і цементної зв'язки (8-10%), пресування під тиском 10-15 МПа (вібростиснення), сушку при 150-500 °С. Брикети можуть використовуватися в доменній плавці для відновлення заліза.

Альтернативні комбінації для нестандартного брикету, які є предметом пошуку за допомогою чотиривимірної матриці суміжності, повинні відповідати умовам аналогізації їх властивостей зі стандартним брикетом (механічна міцність ≥ 20 МПа, температурна стійкість до 700–1000 °С, хімічний склад з високим вмістом заліза та вуглецю).

Таблиця 2 – Варіанти компонентності та термодинамічні характеристики альтернативних брикетів.

Компоненти брикету	Формула для $b_{\text{брик}}$	$\Delta S_{\text{повн}}, \text{ у.о.}$		$S_{\text{повн}}, \text{ у.о.}$
		$\Delta S_{2,5,3,12}$	$\Delta S_{p,q,r,t}$	
Конвертерний шлам Електросталеплавильний пил Доменний шлак Електросталеплавильна окалина	$b_2 + b_5 + b_1 + b_9$	-11,5	-2,1	13,4
Конвертерний шлам Доменний пил Доменний шлак Конвертерна окалина	$b_2 + b_3 + b_1 + b_{10}$	-11,5	-2,3	13,5
Електросталеплавильний пил Доменний пил Доменний шлак Мельнична окалина	$b_5 + b_3 + b_1 + b_{11}$	-11,5	-1,5	13,0
Конвертерний шлак Електросталеплавильний пил Доменний шлак Прокатна окалина	$b_2 + b_5 + b_1 + b_{12}$	-11,5	-2,2	13,3
Конвертерний шлак Доменний пил Доменний шлак Прокатна окалина	$b_2 + b_3 + b_1 + b_{12}$	-11,5	-2,3	13,4

Підбираються комбінації, які замінюють один або кілька компонентів стандартного брикету, але зберігають синергетичний ефект за рахунок зниження ентропії системи в цілому. Термодинамічні характеристики альтернативних брикетів представлені в таблиці 2.

Заміна b_3 (доменний пил) на b_1 (доменний шлам) зберігає високий вміст вуглецю і заліза, але забезпечуючи міцність і відновлювальні властивості брикету. Заміна b_{12} (прокатна окалина) на b_9, b_{10}, b_{11} (інші окалини) підтримує високий вміст Fe_2O_3 в брикеті (70–80%), необхідний для доменної плавки.

Комбінації можуть включати шлам або пил b_1, b_2, b_3, b_5 для вуглецю, та окалину $b_9, b_{10}, b_{11}, b_{12}$ для вмісту заліза, що забезпечує аналогічний хімічний склад (Fe 50-60%, C 5-10%).

Альтернативні брикети (див. табл. 2) повинні мати $\Delta S_{p,q,r,t} < -11.5$ у.о. співставлену для всіх комбінацій (початкова умова порівнянності), оскільки $S_{\text{брик}} = 1.5$ у.о, а $S_{\text{повн}}$ змінюється від 13,2 до 13,5 у.о. за рахунок заміни компонентів з близькими значеннями ентропії. Всі комбінації мають ідентичний $\Delta S_{p,q,r,t}$, але вищий $S_{\text{повн}}$, наприклад, для комбінацій с b_1 (доменний шлам), що робить їх дещо менш кращими за показниками ентропії.

Особливий інтерес для дослідження представляє аналіз зміни окремих параметрів брикетів при альтернативних складах наступних видів, в порівнянні зі стандартним брикетом (формула $b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$). що дозволяє робити висновки про продуктивність брикетів із альтернативними компонентними складами, а отже, є підтвердженням об'єктивності методу суміжних матриць. Вихідні дані для аналізу такі.

$(b_2 + b_3 + b_1 + b_{10})$, усереднений склад: Fe: 55%, SiO_2 : 20%, CaO: 20%, C: 3%, інше 2%.

$(b_5 + b_3 + b_1 + b_{11})$, усереднений склад: Fe: 60%, SiO_2 : 15%, CaO: 15%, Zn: 5%, інше: 5%.

$(b_2 + b_5 + b_1 + b_{12})$, усереднений склад:: Fe: 66%, SiO_2 : 15%, C: 10%, інше: 9%.

$(b_2 + b_3 + b_1 + b_{12})$, усереднений склад:: Fe: 62%, SiO_2 : 18%, CaO: 12%, C: 5%, інше: 3%.

$(b_2 + b_5 + b_1 + b_9)$, усереднений склад: : Fe: 63%, SiO_2 : 10%, C: 20%, інше: 7%.

1. Аналіз параметрів таких брикетів можна звести до порівняння їх механічної міцності, в залежності від хімічного складу, а саме наявності в'язучих речовин (наприклад, цементу, вапна, сульфіто-спиртової барди) і їх взаємодії з компонентами

b_p, b_q, b_r, b_t . Різні відходи (наприклад, доменний пил, окалина, шлак) мають різну гранулометрію і хімічну активність, що впливає на міцність зв'язків в брикеті. При аналізі враховується ступінь пресування при брикетуванні, згідно з нормативними документами, оптимізація вологості матеріалу (23-37%), а також ентропійний внесок системи ($S_{\text{повн}}$), що відображає ступінь неупорядкованості в структурі брикету.

Використовуючи такі витяги, порівнюємо альтернативні варіанти брикетних складів зі стандартним брикетом (формула $b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$), розглядаючи в якості критерія стабільності структури брикету співвідношення до його термодинамічних параметрів:

-склад ($b_2 + b_3 + b_1 + b_{10}$), це заміна в стандартному брикеті b_5 і b_{12} на b_1 і b_{10} , призводить до зниження міцності брикету, якщо b_{10} (наприклад, шлак) менш ефективно реагує зі сполучною речовиною, ніж b_{12} (наприклад, шлак високої щільності);

-склад ($b_5 + b_3 + b_1 + b_{11}$) включає заміну в стандартному брикеті b_2 і b_{12} на b_1 і b_{11} , що дозволяє підвищити міцність, якщо b_{11} (наприклад, металева стружка) сприяє кращій адгезії;

-склад ($b_2 + b_5 + b_1 + b_{12}$) це заміна b_3 на b_1 , що може тільки не істотно змінити міцність, якщо b_1 і b_3 мають схожі гранулометричні характеристики;

-склад ($b_2 + b_3 + b_1 + b_{12}$) - аналогічно попередньому, але відсутність b_5 може знизити міцність через більш низьку хімічну активність суміші;

-склад ($b_2 + b_5 + b_1 + b_9$) відповідає стандартному зі зміною b_3 і b_{12} на b_1 і b_9 , що може вплинути на міцність, залежно від природи b_9 (наприклад, якщо це вуглецевмісний матеріал, міцність може збільшуватися через реакції відновлення).

2. Температурний опір (термічна стійкість) характеризує здатність альтернативних брикетів зберігати свою цілісність при більш високих температурах (800-1000 °C). В цілому очевидно, що в порівнянні зі стандартним брикетом, склад альтернативного брикету з b_{10} , b_{11} b_9 може мати вищу термічну стабільність в залежності від їх хімічної природи. Зокрема, b_{11} (металева стружка) сприяє підвищенню термічної стабільності за рахунок металевої матриці, тоді як b_9 (вуглецевмісний матеріал) може зменшити її за рахунок спалювання вуглецю. Однак такі висновки впливають і зі звичайних технологічних знань.

3. Хімічний склад брикетів багато в чому визначається компонентами b_p, b_q, b_r, b_t та додатковими сполучними речовинами. При заміні компонентів змінюється вміст оксидів, металів, вуглецю і летких речовин, реакційна здатність суміші в металургійних

процесах (наприклад, відновлення оксидів заліза в окалино вуглецевих брикетах). Внесок ентропії показує, що збільшення $S_{\text{повн}}$ пов'язане зі збільшенням числа компонентів або їх неоднорідністю, але $\Delta S_{p,q,r,t}$ відображає склад при заміні компонентів, який впливає на рівновагу хімічних реакцій.

4. Враховуючи, що ентропія $S_{\text{повн}}$ у термодинаміці характеризує ступінь неупорядкованості системи, а для брикетів вона залежить від кількості компонентів, їх фазового стану і ступеня перемішування, цей параметр стає залежним від багатокомпонентного характеру вже й кінцевого продукту та інших показників. Багатокомпонентні суміші, наприклад $b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$ мають більш високу ентропію, ніж брикети з меншою кількістю компонентів. Зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t}$ виникає при заміні компонентів. Наприклад, заміна b_{12} на b_{10} може підвищити ентропію, від того, що b_{10} має більш складну структуру (наприклад, шлак з домішками).

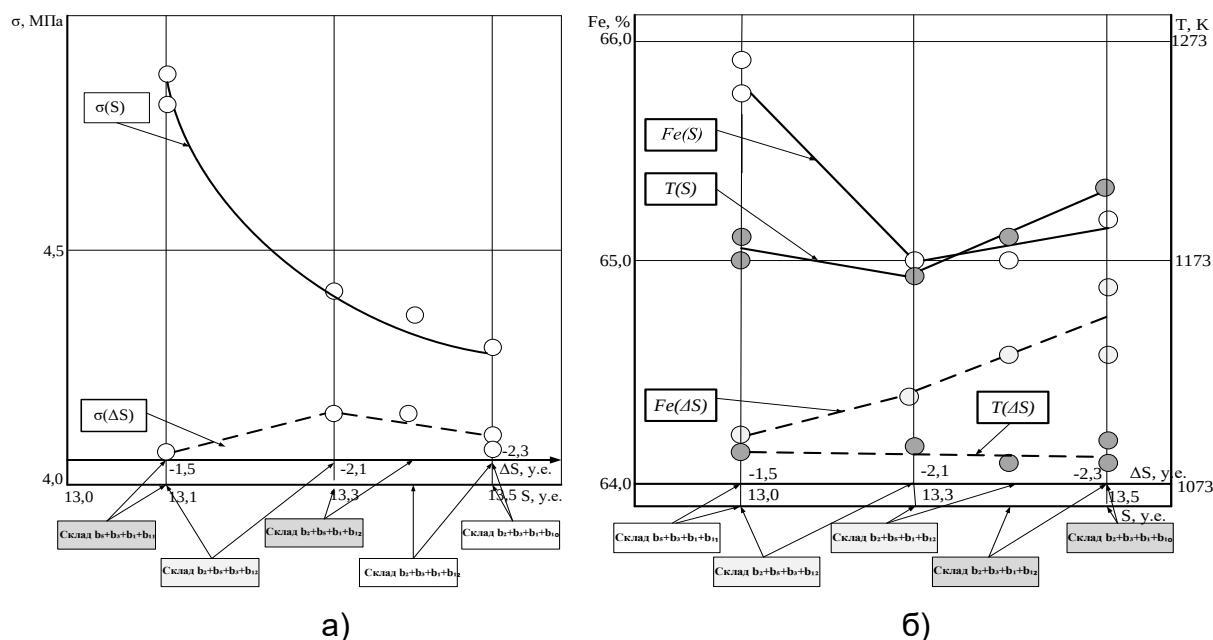


Рисунок 4 – Параметричні залежності взаємодіючих компонентів металургійних відходів від термодинамічних показників кінцевого продукту переробки. Тут а) – механічні властивості кінцевого продукту переробки, як функція його ентропії або зміни ентропії в процесі переробки; б) – хімічні і термічні властивості кінцевого продукту в залежності від його ентропії або зміни ентропії в процесі переробки.

Механічна міцність (σ , МПа) тісно пов'язана зі $S_{\text{повн}}$ таким чином, що з підвищенням $S_{\text{повн}}$, як правило, знижується міцність завдяки зростанню неоднорідності структури брикету (див. рис. 4, а). У той же час зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t}$ для такої системи може сприяти як збільшенню, так і зменшенню міцності в залежності від хімічної та фізичної сумісності нових компонентів.

Хімічний склад будемо оцінювати як частка діючих речовин (наприклад, %Fe), яка може змінюватися в залежності від $\Delta S_{p,q,r,t}$ (див. рис. 4, б). Повна ентропія брикету $S_{\text{повн}}$ корелює з різноманіттям компонентів в його структурі, що може ускладнити контроль структурного складу (див. рис. 4, б). Темп росту $\Delta S_{p,q,r,t}$ впливає на частку активних компонентів (Fe, C), що визначає реакційну здатність брикету в металургійних процесах.

Температурний опір також залежить від величини ентропії. Зазвичай він збільшується в міру зростання $S_{\text{повн}}$ за рахунок утворення рефрактерних фаз (див. рис. 4, б). Висока $S_{\text{повн}}$ тісно пов'язана з утворенням малих вогнетривких фаз, що підвищують термічну стабільність всього брикету. Позитивна зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t}$ може посилити цей ефект, якщо нові компоненти (наприклад, b_{11}) містять оксиди з високою температурою плавлення (більш тугоплавкі).

Відношення до ентропії завжди корелює з другим законом термодинаміки, а збільшення $S_{\text{повн}}$ вказує на перехід системи в менш ймовірний стан, що може знизити механічну міцність, але підвищити термічну стійкість за рахунок стабілізації структури.

Висновки

1. Методика використання багатомірних матриць суміжності дозволяє суттєво розширити номенклатуру кінцевих продуктів в технологіях рециклінгу металургійних відходів за рахунок більш ретельного використання властивостей різних компонентів на користь нової товарної продукції.

2. Чотирьохкомпонентна матриця суміжності, в порівнянні з дво- і трикомпонентними матричними системами, підтверджує можливість створення стандартного брикету ($b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$). Брикету мають високу механічну міцність (≥ 20 МПа), термостійкість (700–1000 °C) і хімічний склад (Fe 50–60%, C 5–10%). Альтернативні комбінації формул ($b_2 + b_5 + b_1 + b_9$), ($b_2 + b_3 + b_1 + b_{10}$) та інші забезпечують аналогічні властивості, подекуди трохи кращі, ніж у брикетів, прийнятих за «стандартний», що робить їх цілком придатними в якості альтернативи для застосування доменної плавки.

Література

1. Matinde, E., Simate, G. S. Mining and Metallurgical Wastes: A Review of Recycling and Re-use Practices. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 118(8), 2018. PP. 825-844.

2. Deus A., Bertani M.-A., Matinde E., Simate, G. S. The Comprehensive Utilization of Steel Slag in Agricultural Soils. Chapter in Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste, 2019. PP. 51-66.
3. Brandaleze, E., Benavidez, E. R. Treatments and Recycling of Metallurgical Slags. Chapter in Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste, 2019. 19-34.
4. Zhang, Y. (Ed.) Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste. IntechOpen, 2019. 112 p.
5. Motz, H., Geiseler, J. Products of Steel Slags: An Opportunity to Save Natural Resources. Waste Management, 21(3), 2001. PP. 285–293.
6. Potysz, A. Metallurgical Recycling Processes: Sustainability Ratios and Environmental Performance Assessment. Waste Management, Elsevier, 2018. PP.345-356.
7. Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J. "The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of 'Green Concrete'." Cement and Concrete Research, Elsevier, 2007/ PP. 1590–1597.