

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-686-709>

УДК 621.762.4:622.788.32

**О. Ю. Худяков**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0002-6507-1120

**С. В. Ващенко**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0001-8344-961X

**К. В. Баюл**<sup>1</sup>, д.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0003-1426-7956

**Ю. С. Семенов**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., зав. відділу, ORCID 0000-0003-2299-5742

**П. В. Крот**<sup>2</sup>, к.т.н., ас. проф., ORCID 0000-0002-3347-3862

<sup>1</sup> *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

<sup>2</sup> *Вроцлавський технологічний університет*

## **РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОГО МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЩІЛЬНОСТІ ПРЕСОВОК З СУХИХ ДРІБНОФРАКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ ПОРІВНЯЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ УЩІЛЬНЕННЯ**

**Анотація.** Більшість відомих моделей для прогнозу щільності пресовок з порошкових матеріалів мають емпіричний характер та не можуть бути застосовані до широкої номенклатури матеріалів. З метою створення універсального методу прогнозу щільності, в даній роботі виконане порівняльне дослідження впливу технологічних факторів на ущільнюваність порошоків, а також встановлено фундаментальні зв'язки ущільнюваності з фізичними та енергетичними властивостями речовини частинок шихти. З використанням методу двофакторного дисперсійного аналізу (Two-Way ANOVA), було виконане порівняння впливу дисперсності та природи речовини частинок сухого порошку на коефіцієнт інтенсивності його ущільнення. Встановлено, що в умовах, коли крупність великих та дрібних часток відрізняються не більше, ніж на один порядок, домінуючим фактором впливу на ущільнюваність порошку являються характеристики природи часток. Отримані надійні, фундаментальні зв'язки ущільнюваності порошоків з термодинамічно-тепловими (температурою плавлення, теплотою сублимації, тощо) та механічними (модуль Юнга, модуль сдвигу, твердість, тощо) властивостями речовини частинок. Також отримано статистичні зв'язки ущільнюваності порошоків з енергетичними характеристиками кристалічної речовини частинок порошку: енергією кристалічної іонної решітки, енергією атомізації та енергією остовно-електронної взаємодії. Максимальна тіснота кореляції залежностей оцінюється за шкалою Чеддока як висока та дуже висока. На основі вищевказаних залежностей, розроблено множинну регресійну модель сукупного впливу енергетичних та структурних характеристик кристалічної решітки речовини на ущільнюваність шихти. Коефіцієнт детермінації моделі складає 0,98. Також, з використанням

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

отриманих залежностей, розроблено універсальний метод прогнозування щільності пресовок з сухих порошків в залежності від прикладеного тиску пресування. Погрішність прогнозу при застосуванні методу не перевищує 9,5%. Розроблений метод може бути застосований для виконання, без проведення експериментальних досліджень, попередньої оцінки можливості досягнення необхідної щільності брикету, вибору технологічних режимів, визначення енергосилових характеристик процесу і технічних характеристик пресового обладнання.

**Ключові слова:** сухі дрібнофракційні матеріали, прогнозування щільності пресовок, технологічні фактори, крупність частинок, фізичні властивості речовини, енергетичні характеристики речовини, двофакторний дисперсійний аналіз.

**Посилання для цитування:** Розробка універсального методу прогнозування щільності пресовок з сухих дрібнофракційних матеріалів на основі результатів порівняльного дослідження факторів ущільнення / О. Ю. Худяков, С. В. Ващенко, К. В. Баюл, Ю. С. Семенов, П. В. Крот // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 686-709. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-686-709>.

### **Вступ і аналіз стану проблеми**

В залежності від властивостей перероблюваних дрібнофракційних матеріалів, призначення отриманого продукту та вимог до нього, процес пресування може бути допоміжним або основним етапом у технологічній схемі окускування. Але у будь-якому разі його результати чинять значний вплив на характеристики кінцевого продукції цілого ряду галузей: чорної та кольорової металургії, керамічної, фармацевтичної промисловості тощо [1]. У випадку, коли за етапом пресування слідує етап термічної обробки (наприклад у виробництві металевих [2], керамічних виробів [3], чи при попередньому брикетуванні агломераційної шихти [4]) розмір зерна та загалом мікроструктура спеченого продукту, залежать від пористості «сирої» пресовки. У випадку, коли етап «холодного» пресування є основним способом окускування, його результати безпосередньо визначають структурні і міцнісні характеристики продукту [5, 6]. Таким чином, в обох випадках від якості пресовки залежить цілий комплекс характеристик готового продукту: розмір агрегатів, здатність утримувати задану форму і конфігурацію, міцність на удар, стирання, зносостійкість тощо, а також спеціальні технологічні характеристики (такі як калорійність паливних брикетів, або відновлюваність та гаряча міцність металургійних брикетів).

При розробці та вдосконаленні технологій пресування дрібнофракційних матеріалів особлива увага приділяється

модельованню процесу пресування з метою його прогнозування та оптимізації. Проте більшість відомих моделей є емпіричними, а отже і придатними для використання виключно в тих умовах та з тими матеріалами, для яких були проведені експерименти. Результати, отримані від застосування подібних емпіричних моделей не мають узагальнюючого характеру та не можуть бути застосовані до широкої номенклатури матеріалів. Прикладами реалізації такого підходу можуть слугувати моделі, розроблені в статтях [7-16], які дають можливість дослідити вплив технологічних параметрів на показники якості пресовок для тільки конкретних виробничих схем.

Окремо слід відзначити дослідження, автори яких встановлюють емпіричні зв'язки між вихідними технологічно-контрольованими параметрами процесу та міцністю окускованого продукту, без урахування, в якості проміжного етапу, процесу ущільнення і його результатів: щільності, пористості, площі поверхні зерен та інших характеристик [18-24]. Обмеженість подібного підходу очевидна, оскільки при найменших змінах характеристик матеріалів чи обладнання, моделі втрачають коректність.

В попередній роботі авторів [17] розроблено класифікацію факторів ущільнення шихт, згідно з якою надається можливим виділити три групи факторів: 1) властивості рідкої фази в шихті, 2) властивості речовини частинок шихти, 3) індивідуальні та сукупні властивості частинок. Якщо характер впливу першого фактору був достатньо вивченим в роботі [17], то проблема сукупного впливу двох останніх груп факторів потребує додаткового дослідження. Більш того, в спеціальній літературі існують взаємно суперечливі погляди на дане питання. Так автори робіт [25-27] встановили на якісному рівні наявність зв'язку між поведінкою порошків різних хімічних елементів при пресуванні та властивостями речовини частинок порошку, а саме з електронною будовою атомів відповідних хімічних елементів. В той же час автор робіт [28,29] піддає сумніву вирішальну роль впливу природи речовини частинок порошку на його ущільнюваність, та стверджує, що поведінка сипких тіл при пресуванні визначається головним чином індивідуальними та сукупними властивостями частинок, а саме їх дисперсністю та морфологією.

**Мета дослідження:** розробка універсального методу прогнозування щільності пресовок та перевірка його працездатності.

**Завдання дослідження:** порівняння впливу на ущільнюваність сухих дрібнофракційних матеріалів двох груп факторів: властивостей речовини частинок шихти і індивідуальних та сукупних властивостей частинок; встановлення, на основі отриманих результатів порівняльного дослідження, фундаментальних зв'язків між факторами

ущільнення та ущільнюваністю порошкових матеріалів.

### Матеріали та методи дослідження

Для проведення дослідження використані три типи матеріалів: дрібнофракційні матеріали чорної металургії, порошки хімічно чистих гетероатомних сполук та порошки хімічних елементів. Всі матеріали не містять вологи, або містять тільки її сліди.

Сировинні матеріали, які застосовуються в чорній металургії представлені магнетитовою рудою Криворізького залізорудного басейну (Україна) та кам'яним вугіллям марки Ж Львівсько-Волинського вугільного басейну (Україна). Гранулометричний склад матеріалів визначали методом ситового аналізу в лабораторних умовах ІЧМ НАНУ. Магнетитова руда містить: 38,9% фр. 0-0,25мм; 14,6% фр. 0,25-0,5мм; 6,7% фр. 0,5-1мм; 29,3% фр. 1-2мм; 10,5% фр. 2-3 мм. Кам'яне вугілля містить: 37,3% фр. 0-0,25мм; 13,9% фр. 0,25-0,5мм; 5,5% фр. 0,5-1мм; 29,8% фр. 1-2мм; 13,5% фр. 2-3 мм. Магнетитова руда містить: 60,0% Fe<sub>заг</sub>, 1,58% FeO, 84,0% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10,4% SiO<sub>2</sub>, 1,53% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,3% CaO, 0,41% MgO. Кам'яне вугілля містить: 86,2% C<sub>заг</sub>, 34,33% V, 5,31% A, 2,68% S<sub>заг</sub>.

Перелік та відомості про властивості порошків хімічно чистих гетероатомних сполук, спресованих в лабораторні пресові установці Інституту чорної металургії НАНУ, (ІЧМ НАНУ) приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Властивості порошків гетероатомних хімічних сполук, спресованих в ІЧМ

№	Порошок та джерело з описом властивостей	Тип / марка	Хімічний склад	Вміст вологи
1	Хлорид калію [30]	ChDA	> 99,8 % KCl	<0,05%
2	Карбонат кальцію [31]	Ch	> 98 % CaCO <sub>3</sub>	<0,5%
3	Оксид міді (I) [32]	ChDA	> 99 % Cu <sub>2</sub> O	<0,05%
4	Фторид кальцію [33]	FF-95	> 96 % CaF <sub>2</sub>	<0,1%
5	Оксид заліза (II) [32]	ChDA	> 99 % FeO	<0,05%
6	Оксид титану (IV) [34]	R-1	> 98 % TiO <sub>2</sub>	<0,3%
7	Оксид кремнію (IV) [35]	ChDA	> 98 % SiO <sub>2</sub>	<0,05%
8	Оксид алюмінію [36]	G-00	> 97 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,6%

Властивості та експериментальні криві ущільнення порошків решти хімічно чистих матеріалів отримані з наступних літературних джерел. З роботи [37] взяті експериментальні криві пресування та відомості, щодо властивостей більшості порошків хімічних елементів з *s,p,d,f*- блоків Періодичної таблиці. Данні щодо порошків Be, Ві отримані з роботи [38], порошків Th, U – з роботи [39]. Результати експериментів по пресуванню WC, TiC взяті в дослідженні [40],

бромідів срібла – в роботі [41],  $Al_2O_3$  – в роботі [42],  $KCl$ ,  $NaCl$ ,  $CaCO_3$  – в дослідженні [43], розпиленого порошку  $Al_2O_3$  - в роботі [44].

Докладний опис параметрів лабораторної установки, методик проведення експериментів і аналітичної обробки дослідних даних наведені в попередній роботі авторів [16].

В якості показника ущільнюваності порошків в роботі застосований коефіцієнт інтенсивності ущільнюваності дрібнофракційних матеріалів  $a$ , який характеризує схильність матеріалу до скорочення об'єму, ущільнення під час прикладання тиску пресування і визначається як  $a = \frac{d \ln(\rho_s^2 - \rho^2)}{d\sqrt{P}}$ . Зазначений коефіцієнт  $a$  являється постійним параметром рівняння пресування порошків, розробленого авторами в роботах [15-16]:

$$\ln(\rho_s^2 - \rho^2) = -a\sqrt{P} + \ln(\rho_s^2 - \rho_0^2), \quad (1)$$

де  $\rho$  - щільність пресовки,  $г/см^3$ ;  $\rho_0$  - насипна щільність порошку,  $г/см^3$ ;  $\rho_s$  - істинна щільність частинок порошку,  $г/см^3$ ;  $P$  - тиск пресування, МПа;  $a$  - коефіцієнт інтенсивності ущільнення дрібнофракційного матеріалу під час пресування.

Крім коефіцієнту  $a$ , в даному дослідженні застосована також зворотня до нього величина, а саме коефіцієнт  $1/a$ , який визначається як  $1/a = \frac{d\sqrt{P}}{d \ln(\rho_s^2 - \rho^2)}$ . Коефіцієнт  $1/a$  має протилежний до коефіцієнту ущільнюваності фізичний зміст та може бути названий коефіцієнтом резистентності порошкового матеріалу, оскільки відображає здатність матеріалу чинити опір зовнішній механічній дії, а саме тиску пресування.

Для аналітичної обробки експериментальних даних, при порівнянні впливу технологічних факторів на ущільнюваність, використовувався метод двофакторного дисперсійного аналізу (Two-Way ANOVA) [45-47].

### **Результати дослідження та їх обговорення**

**Порівняння впливу природи речовини та крупності частинок на ущільнюваність дрібнофракційних матеріалів.** При плануванні експериментів для порівняльного дослідження технологічних факторів ущільнюваності дрібнофракційних матеріалів, досліджуваною ознакою являвся коефіцієнт інтенсивності ущільнюваності порошків  $a$ . Групу факторів, що відображують властивості твердофазної речовини частинок порошку, представлено показником опору речовини руйнуванню (фактор  $A$ ). Оскільки цей показник в даному дослідженні мусить одночасно характеризувати міцність на стиск та мінералогічну

твердість матеріалу, то він має не кількісний, а якісний характер. Групу факторів, що відображують індивідуальні та сукупні властивості частинок порошку, представлено показником крупності, а саме фракцією частинок (фактор  $B$ ).

Фактори варіювалися максимальному та мінімальному рівнях. Авторами зроблене припущення, що максимальне значення опору речовини руйнуванню, має відповідати твердому та міцному матеріалу ( $A1:HM=2-3$ ,  $\sigma_{cm}=4-7$ МПа), а мінімальне – м'якому та крихкому ( $A2:HM=5-6$ ,  $\sigma_{cm}=20-25$ МПа). Два рівня крупності часток відповідають категоріям: дрібні ( $B1$ : фр.0-0,25мм) та крупні частки ( $B2$ : фр.0,25-3мм). Для фізичного втілення рівнів факторів при проведенні експериментів по пресуванню шихт, було використано два дрібнодисперсні матеріали ГМК: магнетитову руда і кам'яне вугілля з дрібним та крупним розміром часток.

Експерименти сплановано відповідності до повного плану експериментів для двох факторів на двох рівнях ПФЕ  $2^2$  [45, 46]. Досліди для кожної комбінації факторів повторювали тричі. Матриця плану ПФЕ  $2^2$  та результати експериментів, приведені в таблиці 2, утворили масив вихідних даних для проведення дисперсійного аналізу впливу природи речовини і крупності часток на ущільнюваність дрібнодисперсних матеріалів.

Таблиця 2 – Матриця плану ПФЕ  $2^2$  та результати експериментів

№	Комбінація факторів	Коефіцієнт інтенсивності ущільнення $a$		
1	$A1B1$	0,078	0,079	0,083
2	$A1B2$	0,109	0,104	0,105
3	$A2B1$	0,021	0,021	0,018
4	$A2B2$	0,025	0,024	0,023

При проведенні дисперсійного аналізу було прийнято наступні вихідні умови:  $a=b=2$  (тобто фактори  $A$  та  $B$  варіюються на двох рівнях згідно з табл. 2),  $n=3$  (кількість повторів в кожній точці досліду рівняється трьом),  $N=12$  (загальна кількість дослідів дорівнює 12). Попередні розрахунки сум значень признаков  $C_0, C_i, C_j, C_{ij}$ , необхідні для встановлення сум квадратів ефектів  $Q_A, Q_B, Q_{AB}, Q_Z$ , являються суто обчислювальними етапами, які не мають самостійного наукового значення, і тому в даному дослідженні не приводяться.

Результати розрахування суми квадратів ефектів  $Q$ , кількості ступенів свободи  $\nu$ , виправленої дисперсії  $S^2$ , критерія Фішера  $F$  та долі впливу  $\eta$  для факторів та їх комбінацій приведені в підсумковій таблиці двофакторного дисперсійного аналізу (див. табл. 3).

Таблиця 3 – Двофакторний дисперсійний аналіз

Фактори	$Q$	$\nu$	$S^2$	$F$	$\eta, \%$
$A$	0,015123	1	0,015123	3360,67	93,37
$B$	0,000675	1	0,000675	150	4,17
$AB$	0,000363	1	0,000363	80,67	2,24
$z$	0,000036	8	0,0000045	-	0,22

Оскільки  $\nu_A = \nu_B = \nu_{AB} = 1$  та  $\nu_z = 8$ , то для досліджуваних факторів та їх комбінації, критичні значення критерію  $F_{табл}$  при рівні значимості  $P=0,05$  однакові та дорівнюють  $F_{табл} = 5,32$ . Безпосереднім порівнянням отриманих значень критеріїв Фішера  $F_A, F_B, F_{AB}$  з критичним значеннями критерію  $F_{табл}$  встановлено, що  $F_A (F_B, F_{AB}) > F_{табл}$ , отже нульова гіпотеза відкидається, а фактори та їх комбінація суттєво впливають на досліджувану ознаку (ущільнюваність). Крім того, як свідчать дані дисперсійного аналізу з таблиці 3, доля впливу фактору  $A$  (опір речовини руйнуванню) на коефіцієнт інтенсивності ущільнення порошкового матеріалу  $a$  складає 93,37 %, впливу фактору  $B$  - 4,17 %, взаємодії факторів  $AB$  - 2,24 %. При цьому частка впливу неврахованих факторів  $z$  дорівнює лише 0,22 %, тобто ущільнюваність сухих порошоків повністю залежить від обраних факторів.

Оскільки встановлено суттєвий вплив факторів на мінливість досліджуваної ознаки, то було вивчено значимість його середніх величин на окремих рівнях. Результати відповідних розрахунків приведені в таблиці 4. При цьому слід зазначити, що табличні значення  $t$ -критерію Стьюдента обрані при рівні значимості  $P = 0,05$  та кількості ступенів свободи  $\nu = \nu_z = 8$ .

Таблиця 4 – Оцінювання значимості середніх досліджуваної ознаки (ущільнюваності)

	$\overline{a_{\Phi n}}$	$\overline{a_{\Phi n}} - \overline{a_{\Phi m}}$	$t$	$\overline{S}$	$\overline{S} \cdot t \cdot 10^{-3}$
$A$	$\overline{a_{A1}} = 0,093$ ; $\overline{a_{A2}} = 0,022$	$\overline{a_{A1}} - \overline{a_{A2}} = 0,071$	2,31	1,225	2,289
$B$	$\overline{a_{B1}} = 0,05$ ; $\overline{a_{B2}} = 0,065$	$\overline{a_{B1}} - \overline{a_{B2}} = 0,015$	2,31	1,225	2,289
$AB$	$\overline{a_{A1B1}} = 0,08$ ; $\overline{a_{A1B2}} = 0,106$ ; $\overline{a_{A2B1}} = 0,02$ ; $\overline{a_{A2B2}} = 0,024$	$\overline{a_{A1B1}} - \overline{a_{A1B2}} = 0,026$ ; $\overline{a_{A2B1}} - \overline{a_{A2B2}} = 0,004$ ; $\overline{a_{A1B1}} - \overline{a_{A2B2}} = 0,056$ ; $\overline{a_{A2B1}} - \overline{a_{A1B2}} = 0,086$	2,31	1,732	4

де  $\overline{a_{\Phi n}}$  - середні значення признаку на рівнях факторів;  $\overline{a_{\Phi n}} - \overline{a_{\Phi m}}$  - різниця середніх значень признаку;  $\overline{S}$  - стандартна похибка різниці середніх.

Аналіз даних, приведених в таблиці 4, свідчить, що різниця середніх значень ущільнюваності для факторів  $A$  та  $B$  більша за вираховану для них граничну похибку різниці середніх  $\overline{S} \cdot t$ , отже

надається можливим прийти до висновку, що фактори  $A$  і  $B$  на обох рівнях суттєво впливають на коефіцієнт інтенсивності ущільнення дрібнодисперсного матеріалу  $a$ . Аналіз ефектів взаємодії факторів показує, що різниці середніх значень признаку для всіх комбінацій факторів та їх рівнів, окрім випадку  $\overline{a_{A2B1}} - \overline{a_{A2B2}}$ , перевищують відповідну граничну похибку  $\overline{S} \cdot t$ , тобто є значимими та чинять суттєвий вплив на досліджувану ознаку. Водночас, оскільки  $\overline{a_{A2B1}} - \overline{a_{A2B2}} = \overline{S} \cdot t$ , то можна стверджувати, що різниця середніх значень ущільнюваності при порівнянні комбінації та факторів  $A2B1$  і  $A2B2$  наявна, але є не надто суттєвою, що і проілюстровано на рисунку 1.

Аналізуючи дані табл. 4 та рис. 1, слід зазначити, що  $max$  значення  $a=0,106$  спостерігається для комбінації факторів  $A1B2$ , тобто найбільшою ущільнюваністю при пресуванні характеризується дрібнодисперсний матеріал зі слабким опором руйнуванню (низькою твердістю та міцністю) і крупними частками. Мінімальне ж значення  $a = 0,02$  спостерігається для комбінації факторів  $A2B1$ , тобто найменшою ущільнюваністю при пресуванні характеризується твердий та міцний матеріал з дрібними частками.

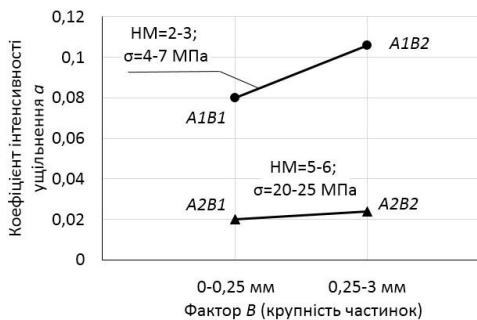


Рисунок 1 – Вплив природи речовини часток та їх крупності на ущільнюваність

Також очевидно, що хоча ущільнюваність і зростає при підвищенні крупності часток, але різниця в величині  $k$ -та  $a$ , для матеріалу з високим ступенем опору руйнуванню при зміні крупності часток в досліджуваному діапазоні (з 0-0,25 мм до 0,25-3 мм), є значно меншою, ніж для матеріалу з низьким ступенем опору руйнуванню. Дійсно, різниця між  $\overline{a_{A2B1}} = 0,02$  та  $\overline{a_{A2B2}} = 0,024$  складає лише  $\Delta a = 0,004$  та, як вказувалося вище, дорівнює граничній похибці, водночас різниця між  $\overline{a_{A1B1}} = 0,08$  та  $\overline{a_{A1B2}} = 0,106$  дорівнює вже  $\Delta a = 0,026$  та є суттєвою. За результатами проведеного двофакторного дисперсійного аналізу, надається можливим константувати, що досліджувані фактори  $A$  та  $B$  суттєво впливають на коефіцієнт



інтенсивності ущільнення  $a$ . Проте, на величину ущільнюваності дрібнодисперсного матеріалу набагато сильніше впливають властивості речовини часток матеріалу, ніж його фракційний склад, що підтверджується насамперед розрахунком питомої ваги впливу факторів ( $\eta_A = 93,37\%$  проти  $\eta_B = 4,175$ , див. табл. 3) та аналізом середніх значень признаку на різних рівнях факторів та їх комбінацій (див. рисунок 1, табл. 4). Отримані висновки дисперсійного аналізу дозволяють перейти до встановлення, на основі отриманих результатів порівняльного дослідження, фундаментальних зв'язків між факторами ущільнення та ущільнюваністю порошкових матеріалів. При цьому очевидно, що оскільки відносний вплив фізичних властивостей часток шихти  $\eta_A$  набагато перевершує вплив крупності часток  $\eta_B$ , то останній чинник в подальшому дослідженні допустимо не розглядати.

**Зв'язок ущільнюваності порошків з фізичними властивостями речовини частинок.** Шляхом апроксимації експериментальних кривих пресування порошків хімічних елементів з  $s,p,d,f$  - блоків за допомогою рівняння пресування (1) розраховано відповідні коефіцієнти інтенсивності ущільнення  $a$ . З використанням утвореного масиву даних, авторами проведений статистичний аналіз зв'язків між ущільнюваністю порошків з хімічних елементів, з одного боку, та фізичними і механічними властивостями хімічних елементів, відомості про які отримано з літературних джерел [48-52]. Результати порівняння приведені на рисунку 2.

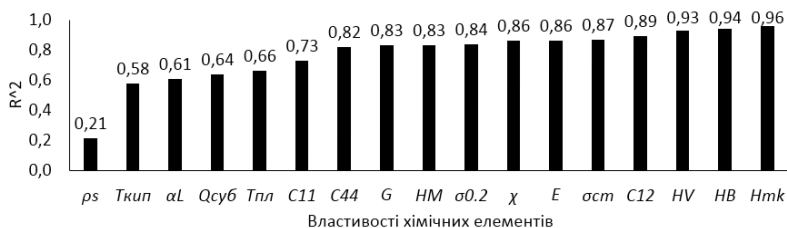


Рисунок 2 – Статистичний зв'язок ущільнюваності порошків хімічних елементів з властивостями елементів

Найменшою тісніотою кореляційного зв'язку з ущільнюваністю порошку  $a$  характеризується показник істинної щільності хімічних елементів  $\rho_s$  ( $R^2 = 0,21$ ), який не характеризує сили хімічного зв'язку, що діють між елементами кристалічної решітки, а відображує лише структурні параметри будови решітки. Тіснота кореляційного зв'язку з коефіцієнтом  $a$  для групи термодинамічних і теплових властивостей речовини часток лежить в межах значень коефіцієнту детермінації  $R^2$  від 0,58 до 0,66, а для групи механічних властивостей  $R^2$  складає від

0,73 до 0,96. Зазначимо, що термодинамічні і теплові властивості речовини мають однакову енергетичну природу, оскільки відображають кількість енергії, яку необхідно докласти для руйнування кристалічної решітки речовини. При цьому група термодинамічних і теплових властивостей відображає здатність решітки чинити опір зовнішній термічній дії, а група механічних властивостей – опір зовнішній механічній деформації. Тобто, чим сильніша сила зв'язку між атомами в кристалічній решітці, тим більше енергії необхідно витратити для її руйнування термічним або механічним шляхом.

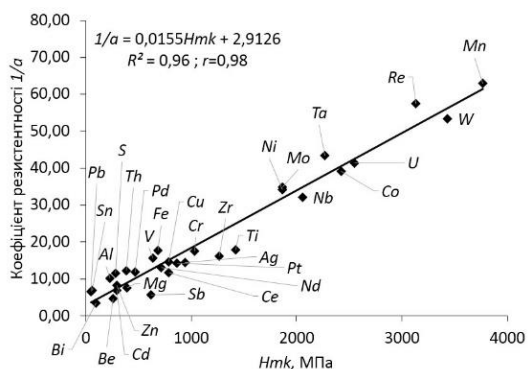


Рисунок 3 – Залежність к-та резистентності від мікротвердості частинок порошку

Максимальну кореляцію, виявлено між мікротвердістю речовини  $Hmk$  та коефіцієнтом резистентності  $1/a$  (рис. 3), можливо стверджувати про наявність майже функціонального зв'язку, адже  $R^2=0,96$ , що відповідає коефіцієнту кореляції  $r=0,98$ . Приймаючи до уваги ви-соку тісноту зв'язку та універсальний характер кореляційних залежностей, встановлених між ущільнюваністю порошку та властивостями речовини частинок порошку, які характеризують зовнішню енергетичну дію, прикладену термічним або механічним способом, надається можливим висунути наступну робочу гіпотезу. На думку авторів, ущільнюваність порошку має енергетичну природу та залежить, насамперед, від дії міжатомних та міжмолекулярних сил зв'язку в речовині частинок порошку.

**Зв'язок ущільнюваності порошків з енергетичними характеристиками речовини.** З метою перевірки висунутої гіпотези, був виконаний кореляційний аналіз зв'язків ущільнюваності порошків з енергетичними характеристиками міжатомних сил зчеплення в порошках гетеро-атомних хімічних сполук. Експериментальні криві пресування матеріалів з табл. 1 зображені на рис. 4. Криві пресування решти, використаних в роботі, порошків містяться з літературних

першоджерелах [40-44]. Методика розрахунку коефіцієнтів інтенсивності ущільнення  $a$  порошків досліджуваних матеріалів аналогічна застосовуваній в попередньому підрозділі статті.

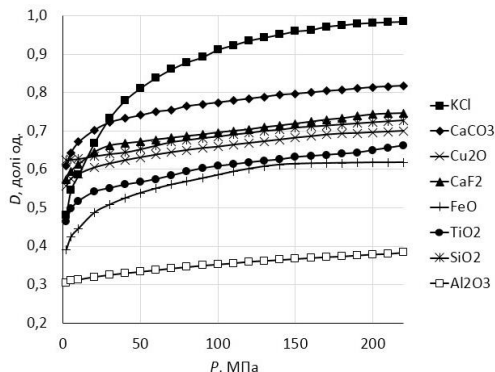


Рисунок 4 – Залежності відносної щільності пресовок від тиску пресування (експерименти, виконані в ІЧМ НАНУ)

На даний час надається можливим виділити три найбільш відомі концепції для оцінки енергетичної характеристики кристалічної речовини: енергію кристалічної іонної решітки  $U$ , Дж/моль, енергію атомізації  $E_a$ , Дж/моль та енергію остовно-електронної взаємодії  $W$ , Дж/моль. Вказані показники визначається за термохімічним циклом Борна-Габера наступним чином:

$$U = \Delta H_{298}^0 - \sum_M \Delta H_{298}^0 (M) - \sum_X \Delta H_{298}^0 (X) - \sum_M I + \sum_X F; \quad (2)$$

$$E_a = \Delta H_{298}^0 - \sum_M \Delta H_{298}^0 (M) - \sum_X \Delta H_{298}^0 (X); \quad (3)$$

$$W = \Delta H_{298}^0 - \sum_M \Delta H_{298}^0 (M) - \sum_X \Delta H_{298}^0 (X) + \sum I_n. \quad (4)$$

де  $\Delta H_{298}^0$  – теплота утворення кристалічної сполуки з елементів;  $\sum_M \Delta H_{298}^0 (M)$ ,  $\sum_X \Delta H_{298}^0 (X)$  – суми теплот утворення газоподібних атомів металів та металлоїдів, відп.;  $\sum_M I$  – сума потенціалів іонізації всіх катіонів;  $\sum_X F$  – сума спорідненості до електронів всіх аніонів.

Для енергетичних характеристик гетероатомних сполук використані наступні формули:

1) формула А.Ф. Капустинського для розрахунку енергії кристалічної іонної решітки  $U$  [53] (для одноатомних іонів використані кристалохімічні радіуси системи Гольдшміда для КЧ= 6 [53], а для багатоатомних іонів використані термохімічні радіуси, наведені в роботі К.Б. Яцмірського [54]);

2) формула В.С. Урусова для розрахунку енергії атомізації  $E_a$  бінарних сполук [55] (електронегативності елементів визначалися за шкалою Полінга [56]);

3) для розрахунку енергії атомізації  $E_a$  комплексних сполук використаний метод К.С. Краснова [57], згідно з яким енергетична характеристика складного з'єднання приблизно дорівнює сумі енергій більш простих нейтральних складових частин;

4) формула В.В. Зуєва для розрахунку енергії остовно-електронної взаємодії  $W$  [58,59].

Крім розрахунку мольних величин енергій за вищепереліченими формулами виконаний також і розрахунок питомих енергій: масової та об'ємної (позначених надалі підстроковими індексами  $m$  та  $v$ , відповідно).

Отриманий масив енергетичних характеристик був використаний для встановлення статистичних зв'язків між ущільнюваністю порошків з гетероатомних сполук та енергетичними характеристиками речовини часток. Встановлено, що між ними існують лінійні кореляції з коефіцієнтом детермінації в межах від  $R^2=0,6$  до  $R^2=0,87$ . На рис. 5 приведені результати порівняння коефіцієнтів детермінації отриманих залежностей для бінарних сполук.

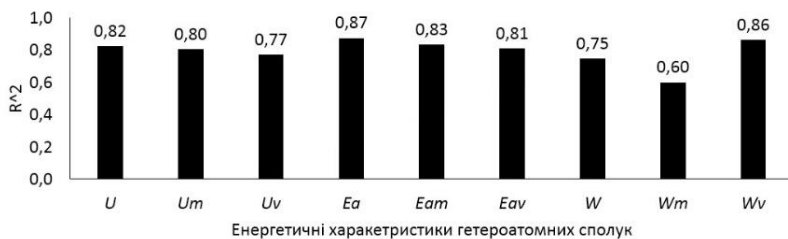


Рисунок 5 – Статистичний зв'язок ущільнюваності порошків гетероатомних сполук з енергетичними характеристиками речовини часток

Встановлення тах значення коефіцієнту детермінації на рівні  $R^2=0,87$  для зв'язку між  $k$ -том резистентності  $1/a$  та енергією атомізації  $E_a$  порошків з бінарних сполук (див. рис. 6), дозволяє оцінити ступень кореляції за шкалою Чеддока, як дуже високий. Відповідно, висунута авторами гіпотеза, щодо енергетичної природи ущільнюваності порошків може вважатися підтвердженою.

Разом з тим, як вказують автори робіт [53-60], фізичні властивості речовини, а значить і ущільнюваність порошків, мають залежати не тільки від величини сил зв'язку між атомами та молекулами, але й від способу їх просторового розміщення в кристалічній решітці. Для врахування останнього фактору, в якості інтегрального структурного показника будови кристалу в даному дослідженні використаний модифікований коефіцієнт щільності пакування атомів  $d$ , розроблений авторами на основі однойменного коефіцієнту  $x$ , запропонованого в

роботі [61]:

$$d = \frac{Z}{Z_{NaCl}} \sqrt[3]{\frac{V_{NaCl}}{V}}, \quad (5)$$

де  $Z$ ,  $Z_{NaCl}$  – кількість самостійних структурних одиниць в кристалічній решітці умовної молекули досліджуваного мінералу та галіту, відповідно;  $V$ ,  $V_{NaCl}$  – об'єм елементарної ячейки мінералу та корунду, галіту, відп.

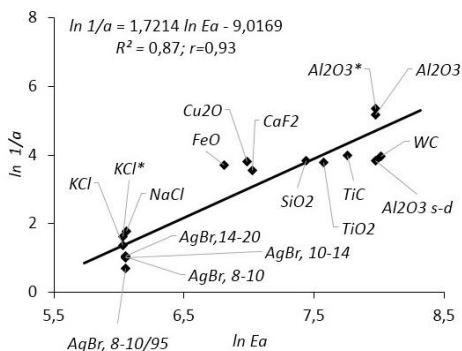


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнту резистентності від енергії атомізації  $E_a$

Спільне використання енергії активації  $E_a$  та модифікованого коефіцієнту щільності пакування  $d$  дозволили отримати математичний вираз для визначення коефіцієнту резистентності  $1/a$  у вигляді неповного квадратичного поліному (6):

$$1/a = 57,74 + 0,02E_a - 124,36d + 61,67d^2. \quad (6)$$

Коефіцієнт детермінації отриманої залежності (6) становить  $R^2=0,98$ . Зауважимо, що залежність, встановлена вище між коефіцієнтом резистентності  $1/a$  та тільки енергетичним показником  $E_a$ , характеризувалась коефіцієнтом детермінації  $R^2=0,87$  (див. рис. 6).

Отриманий результат підтверджує одночасну залежність ущільнюваності порошків від величини сил зв'язку між атомами (енергетична характеристика) та від їх просторового розміщення в кристалічній решітці (структура характеристика). Графічний аналіз залежності (6) свідчить, що зі збільшенням енергії взаємодії атомів в кристалічній решітці мінералу та скороченням відстаней між ними (збільшенням величини коефіцієнту  $d$ ) збільшується резистентність порошків, тобто їх опір стисканню, та, відповідно, одночасно зменшується їх ущільнюваність.

Зазначимо, що оскільки модель (6) впливу енергії атомізації  $E_a$  та модифікованого коефіцієнту щільності пакування атомів  $d$  на

ущільнюваність порошків була отримана з використанням невеликої кількості експериментального матеріалу, в якому до того ж були представлені тільки бінарні хімічні сполуки, то очевидно, що вона потребує уточнення за рахунок аналізу більшої кількості експериментальних даних, отриманих при пресуванні порошків не тільки бінарних, а й комплексних сполук. Цей напрям є перспективним для подальших досліджень.

**Розробка та перевірка універсального методу прогнозування щільності пресовок.** Для розробки методу прогнозування щільності пресовок авторами використане рівняння пресування (1), єдиним змінним параметром в якому є коефіцієнт інтенсивності ущільнення порошку  $a$ . Згідно з отриманими в даному дослідженні результатами, для сухого порошку з відносно невеликою різницею з крупності фракцій (лінійні розміри великих та дрібних часток відрізняються приблизно на один порядок), домінуючим фактором впливу на ущільнюваність порошку являються характеристики природи часток.

Як свідчать дані порівняння, приведеного на рис. 3, найбільшою тісніотою кореляційних зв'язків характеризується залежність між коефіцієнтом  $a$  та мікротвердістю  $Hmk$ . Однак необхідно зазначити, що коло мінералів з експериментально визначеною мікротвердістю є доволі обмеженим, тому в даній роботі використано відому формулу залежності між мікротвердістю  $Hmk$  та твердістю за мінералогічною шкалою Мооса  $HM$  [62]:  $HM = 0,7 \sqrt[3]{Hmk}$ .

Виразимо рівняння пресування (1) через відносну щільність брикету та визначимо коефіцієнт  $a$  з використанням статистичної моделі  $1/a=f(Hmk)$ , приведеної на рисунку 3, представивши мікротвердість  $Hmk$ , як функцію твердості за шкалою Мооса  $HM$ . Після виконання зазначених операції отриманий вираз має вигляд:

$$D = \sqrt{1 - \frac{1 - D_0^2}{\exp\left(\frac{\sqrt{P}}{0,46HM^3 + 2,37}\right)}}, \quad (7)$$

де  $D$ ,  $D_0$  – відносна щільність пресовки та шихти у насипному стані, відповідно;  $P$  – тиск пресування, МПа.

Перевірку точності роботи моделі (7) виконали шляхом порівняння експериментальних та розрахункових значень щільності пресовок при однакових тисках пресування. В якості таких експериментальних даних використали криві пресування порошків хімічних сполук з твердістю від 2-2,5 од. до 9 од. за шкалою Моосу, приведені вище на рис. 4.

Згідно з проведеними розрахунками, мінімальне значення помилки

прогнозу складо 1,9 % для порошку  $\text{CaF}_2$ , а максимальне 9,5% для порошку  $\text{FeO}$ . Середнє значення помилки прогнозу дорівнює 5,9 %, Оскільки жодне з отриманих значень помилки не перевищує 10%, то модель (7) може вважатись достатньо точною для використання в практичних цілях.

На рис. 7 представлено експериментальні та розрахункові криві пресування для порошків  $\text{CaF}_2$  та  $\text{FeO}$ , які наочно демонструють найбільшу та найменшу точність прогнозу, отриманих при застосуванні моделі (7).

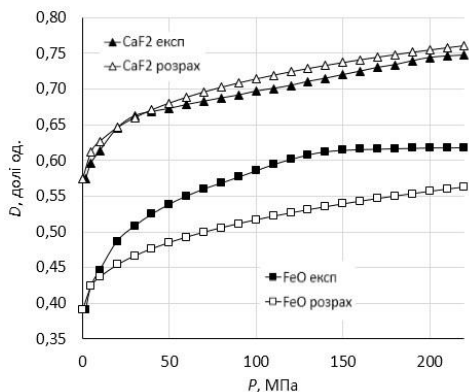


Рисунок 7 – Експериментальні і розрахункові криві пресування порошків  $\text{CaF}_2$  та  $\text{FeO}$

На рис. 8 приведені значення помилок прогнозу для всіх використаних порошків. Перевірку методу, розробленого на основі аналізу експериментальних кривих пресування порошків хімічних елементів, виконано для на масиві експериментальних кривих пресування порошків хімічних сполук, що, на думку авторів, є підтвердженням його універсальності.

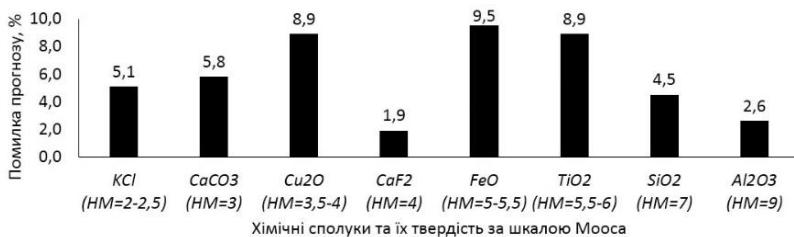


Рисунок 8 – Величини помилок при розрахнку кривих пресування за моделлю

Таким чином, модель (7) являється універсальним методом, який може бути використаний для прогнозування щільності пресовок в залежності від тиску, за умови, що заздалегідь відомі насипна

щільність порошку та мінералогічна твердість його частинок. В якості недоліку розробленого методу необхідно вказати на певну обмеженість сфери його застосування, оскільки характеристика природи речовини часток порошку, виражена через мінералогічну твердість, може бути використана тільки при прогнозуванні щільності пресовок з монокомпонентної шихти, тобто такої шихти, яка складається з одного матеріалу.

### Висновки

1. Виконано порівняльне дослідження впливу на ущільнюваність сухих дрібнофракційних матеріалів двох груп технологічних факторів: властивостей речовини частинок шихти і індивідуальних та сукупних властивостей частинок. Встановлено, що за умов, коли середня крупність великих та дрібних частинок в порошку відрізняється не більше ніж в 10 раз, ущільнюваність порошку майже повністю визначається фізичними властивостями речовини частинок. Так питома вага впливу властивостей речовини частинок на ущільнюваність порошку досягає 93,37%, тоді як аналогічний показник впливу крупності складає лише 4,175%.

2. Встановлені статистичні зв'язки між ущільнюваністю порошків і термодинамічно-тепловими властивостями ( $R^2=0,58-0,66$ ) та механічними властивостями речовини ( $R^2=0,73-0,96$ ). Найбільшою тісністю зв'язку з ущільнюваністю порошків характеризується мікротвердість речовини частинок порошку  $H_{mk}$ . Встановлені статистичні зв'язки між ущільнюваністю порошків і енергетичними характеристиками кристалічної речовини частинок. ( $R^2=0,6-0,87$ ) Найбільшою тісністю зв'язку з ущільнюваністю порошків характеризується енергія атомізації кристалічної речовини  $E_a$ .

3. Розроблено модель сукупного впливу енергії атомізації  $E_a$  та щільності пакування атомів  $d$  на ущільнюваність порошків. Модель потребує подальшого вдосконалення за рахунок аналізу даних додаткових експериментів по пресуванню порошків, в особливості порошків комплексних хімічних сполук.

4. Розроблено універсальний метод прогнозування щільності пресовок  $D$  з однокомпонентних шихт в залежності від прикладеного тиску пресування  $P$ . В якості постійних параметрів методу використовуються насипна щільність шихти  $D_0$  та твердість матеріалу за мінералогічною шкалою Мооса  $HM$ . Помилка при застосуванні методу не перевищує 9,5%, середня помилка складає 5,9%.

### Перелік посилань

1. Comoglu T. An overview of compaction equations. Journal Fac. Pharm. 2007. Vol. 36, Iss. 2. P. 123-133.



2. Öztürk B., Topcu A., Cora Ö.N. Influence of processing parameters on the porosity, thermal expansion, and oxidation behavior of consolidated Fe<sub>22</sub>Cr stainless steel powder. *Powder Technology*. 2021. Vol. 382. P.199-207.
3. Kempen D., Piccolroaz A., Bigoni D. Thermomechanical modelling of ceramic pressing and subsequent sintering. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 156. P.146-158.
4. Improving Sintering Performance of Specularite Concentrates by Pre-briquetting Process / J. Pan, B. Shi, D. Zhu et al. // *ISIJ International*. 2016. Vol. 56, Is. 5. P. 777-785.
5. Experimental verification of new compaction equations for fine materials of the mining and metallurgical complex. Part 1. Basic compaction equation / A. Yu. Khudyakov, S. V. Vashchenko, K. V. Baiul et al. // *Refract. Industr. Ceram*. 2021. Vol. 62, No. 1. P. 15-24.
6. Optimization of wastes compaction parameters in case of gradual wear of the briquetting press rolls / K. V. Baiul, S. V. Vashchenko, A. Yu. Khudyakov et al. // *Structural Integrity*. 2022. Vol. 25. P. 293-302.
7. Modelling the Compaction Step of a Platform Direct Compression Process / R. V. G. Peddapatla, C. Slevin, G. Sheridan et al. // *Pharmaceutics*. 2022. Vol. 14, 695.
8. Compression prediction accuracy from small scale compaction studies to production presses / K. G. Pitt, R. J. Webber, K. A. Hill et al. // *Powder Technology*. 2015. Vol. 270, Part B. P. 490-493.
9. Persson A. S., Alderborn G. A hybrid approach to predict the relationship between tablet tensile strength and compaction pressure using analytical powder compression. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2018. Vol. 125. P. 28-37.
10. Liang Y., Gregory N., Binner J. Green Forming with Nanoparticles. *Key Engineering Materials*. 2004. Vol. 264-268. P. 2319-2322.
11. Obradović N., Djordjevic N., Peles A. The influence of compaction pressure on the density and electrical properties of cordierite-based ceramics. *Science of Sintering*. 2015. Vol. 47, Iss. 1. P.15-22.
12. Munir Z., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M. The Effect of Electric Field and Pressure on the Synthesis and Consolidation of Materials: A Review of the Spark Plasma Sintering. *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41, Iss. 2. P.763-777.
13. Effect of pressure on density, porosity and flexural strength during cold isostatic press of alumina-ysz-chromia cutting tool / T. Norfauzi, A. B. Hadzley, U. A. A. Azlan et al. // *Journal of Physics: Conference Series, IRTTEC 2020*. 2021. Vol. 1793, 012073.
14. Evaluation of pressure and temperature effect on the structure and properties of Ca<sub>2.95</sub>Sr<sub>0.07</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> ceramic materials / M. A. Torres, M. A. Madre, O. J. Dura et al. // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48, Iss. 6. P.7730-7747.
15. Study on the Manufacturing of Ultra-Fine Ore Briquettes for Charging in a Sintering Machine / B. Jong-Ho, K. Kang-Min, L. Kyeong-Uk et al. // *Korean Journal of Metals and Materials*. 2021. Vol. 59, Iss. 1. P. 14-20.
16. New method for predicting the compactability of charges made from fine materials of the mining and smelting industry / A. Yu. Khudyakov, S. V. Vashchenko,

K. V. Baiul et al. // *Metallurgist*. 2022. Vol. 65, No. 9-10. P. 941-951.

17. Optimization of briquetting technology of fine-grained metallurgical materials based on statistical models of compressibility / A. Khudyakov, S. Vashchenko, K. Baiul et al. // *Powder Technology*. 2022. Vol. 412, No. 5, 118025.

18. Sen R. Mitra K., Dey R. Effect of grading of chromite ores on the quality of briquettes. *ISIJ International*. 2010. Vol. 50, Iss. 2. P. 200-206.

19. Influence of fly ash and ground granulated blast furnace slag on the mechanical properties and reduction behavior of cold-agglomerated blast furnace briquettes / M. Mäkelä, T. Paananen, J. Heino et al. // *ISIJ International*. 2012. Vol. 52, Iss. 6. P. 1101-1108.

20. Singh M., Björkman B. Effect of Processing Parameters on the Swelling Behaviour of Cement-bonded Briquettes. *ISIJ International*. 2004. Vol. 44, Iss. 1. P. 59-68.

21. Basic examination of briquetting technology for ferro-coke process on 0.5 t/d bench scale plant / T. Anyashiki, H. Fujimoto, T. Yamamoto et al. // *Tetsu-to-Hagane*. 2015. Vol. 101, Iss.10. P. 515-523.

22. Das R., Mondal M. K., Pramanik S. Strengthening behaviour and microstructural properties during the compaction of reduced blast furnace flue dust - fly ash - iron metal matrix composite fines using powder metallurgy route. *Transactions of Indian Institute of Metals*. 2022. Vol. 75, Iss. 3. P. 2255-2263.

23. Study on the Pore Structure and Fractal Characteristics of Briquettes with Different Compression Loads / L. Qi, X. Zhou, X. Peng et al. // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, 12148.

24. Effect of Briquetting Pressure on the Properties, Reduction Behavior, and Reduction Kinetics of Cold-Bonded Briquette Prepared From Return Fines of Sinter / Y. Li, Y. Zang, Y. Xiong et al. // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023. Vol. 54. P. 355-369.

25. Dvilis E. S. Zakonomernosti processov konsolidacii poroshkovykh sistem pri izmenenii uslovij deformacii i fizicheskikh vozdeystvij: dis. dokt. fiz.-mat. nauk : 01.04.07. Tomsk : Tomskij politeh. un-t, 2014. 386 p.

26. Samsonov G. V., Ristić M. M. Au Essay on the Generalization of the Sintering Theory. International Team for Studying Sintering. Beograd. 1973.

27. Andreeva N. V., Radomyselski I. D., Shcherban N. I. Compressibility of powders. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1975. Vol. 14, Iss. 6. P. 457-464.

28. Andrievskii R. A. Role of the nature of the chemical bond and the dispersion in the formation of powder materials. *Powder Metall Met Ceram*. 1988. Vol. 27, No. 8. P. 627-633.

29. Andrievskii R. A. Poroshkovoe materialovedenie. M. : Metallurgiya, 1991. 205 p

30. GOST 4234-77. Reagents .Potassium chloride. Specifications. M. : Standards Publishing, 2001. 28 p.

31. GOST 4530-76. Reagents. Calcium carbonate. Specifications. M. : Standards Publishing, 1992. 12 p.

32. Brudz V. H., Rakovskaia V. A., Uskova L. Ie. Spravochnik pokazatelei kachestva khimicheskikh rieaktivov. Kniha 2. M. : Khimiia, 1968. 992 p.

33. GOST 29219-91. Fluorite concentrates for acids and ceramics.

Specifications. M. : Standards Publishing, 2004. 7 p.

34. GOST 9808-84. Pigment titanium dioxide. Specifications. M. : Standards Publishing, 1998. 17 p.

35. GOST 9428-73. Reagents. Silicon (IV) oxide. Specifications. M. : Standards Publishing, 1993. 10 p.

36. GOST 30558-98. Alumina, metallurgical. Specifications. M. : Standards Publishing, 2002. 7 p.

37. Andreeva N. V., Radomyselski I. D., Shcherban N. I. Compressibility of powders. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 1975. Vol. 14, Iss. 6. P.457-464.

38. Kunin N. F., Yurchenko B. D. Regularities in the compacting of powders of different materials. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 1963. Vol. 2, Is. 6. P. 433-439.

39. Yemelianov V. S., Yevstiukhyn A. I. Metalurhiia yadernoho horiucheho. M. : Atomizdat, 1968. 482 p.

40. Ge R. A new powder compaction equation. International Journal of Powder Metallurgy. 1991. Vol. 27, Iss. 3. P.211-216.

41. Shapiro I., Kolthoff I. M. The compressibility of Silver Bromide Powders. The Journal of Physical and Colloid Chemistry. 1947. Vol. 51, Iss.2. P. 483-493.

42. Panelli R., Filho F. A. Compaction Equation and Its Use to Describe Powder Consolidation Behavior. Powder Metallurgy. 1998. Vol. 41, Is. 2. P. 131-133.

43. Walker E. E. The properties of powders. Part VI. The compressibility of powders. Transactions of the Faraday Society. 1923. Vol. 19. P. 73-82.

44. Automated generation and analysis of powder compaction diagrams / P. R. Mort, R. Sabia, D. E. Niesz et al. // Powder Technology. 1994. Vol. 79, Iss. 2. P. 111-119.

45. Seltman H. J. Experimental Design and Analysis. Pittsburgh : Carnegie Mellon University, 2018. 428 p.

46. Handbook of Design and Analysis of Experiments / A. Dean, M. Morris, J. Stufken, et al. Boca Raton : Taylor and Francis Group, 2016. 946 p.

47. Yudenkov V. A. Dispersionnyi analiz. M. : Biznesofsiet, 2013. 76 p.

48. Emsley J. The elements. Oxford : Clarendon Press, 1998. 292 p.

49. Samsonov G. V. Handbook of the Physicochemical Properties of the Elements. NY : Springer New York, 2012. 942 p.

50. Haynes W. M. Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2014. 2665 p.

51. Dric E. M. Svoystva elementov. M. : Metallurgiya, 1985. 672 p.

52. Lidin R. A., Andreeva L. L., Molochko V. A. Konstany neorganicheskikh veshstv. M. : Drofa, 2006. 685 p.

53. Bacanov S. S. Strukturnaya himiya. M. : Dialog - MGU, 2000. 292 p.

54. Yacmirskij K. B. Termohimiya kompleksnyh soedinenij. M. : Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1951. 253 p.

55. Urusov V. S. Energeticheskaya kristallohimiya. M. : Nauka, 1975. 335 p.

56. Pauling L. General Chemistry. NY : Dover Publications, 1988. 992 p.

57. Krasnov K. S. Molekuly i himicheskaya svyaz. M. : Vysshaya shkola, 1984. 295 p.

58. Zuev V. V. Concept of core electron structure of minerals. Gornyi Zhurnal.

2015. Iss. 5. P. 23- 29.

59. Zuev V. V. Ostovno-elektronnaya kristallohimiya i svoystva mineralov. SPb. : Nauka, 2009. 270 p.

60. Prihodko E. V. Metallohimiya mnogokomponentnykh sistem. M. : Metallurgiya, 1995. 320 p.

61. Sobolev V. S. Vvedenie v mineralogiyu silikatov. Novosibirsk : Geo, 2007. 229 p.

62. Hasanov O. L., Struc V. S., Dvilis E. S. Soprotivlenie materialov. Tverdst i treshinnostjokost nanostrukturnyh keramik. T. : Yurajt, 2015. 150 p.

### References

1. Comoglu, T. (2007). An overview of compaction equations. *Journal Fac. Pharm.*, 36(2), 123-133

2. Öztürk, B., Topcu A., & Cora Ö. N. (2021). Influence of processing parameters on the porosity, thermal expansion, and oxidation behavior of consolidated Fe<sub>22</sub>Cr stainless steel powder. *Powder Technology*, 382, 199-207

3. Kempen, D., Piccolroaz, A., & Bigoni, D. (2019). Thermomechanical modelling of ceramic pressing and subsequent sintering. *International Journal of Mechanical Sciences*, 156, 146-158

4. Pan, J., Shi, B., Zhu, D. et al. (2016). Improving Sintering Performance of Specularite Concentrates by Pre-briquetting Process. *ISIJ International*, 56(5), 777-785

5. Khudyakov, A. Yu., Vashchenko, S. V., Baiul, K. V. et al. (2021). Experimental verification of new compaction equations for fine materials of the mining and metallurgical complex. Part 1. Basic compaction equation. *Refract. Industr. Ceram.*, 62(1), 15-24

6. Baiul, K. V., Vashchenko, S. V., Khudyakov, A. Yu. et al. (2022). Optimization of wastes compaction parameters in case of gradual wear of the briquetting press rolls. *Structural Integrity*, 25, 293-302

7. Peddapatla, R. V. G., Slevin, C., Sheridan, G. et al. (2022). Modelling the Compaction Step of a Platform Direct Compression Process. *Pharmaceutics*, 14, 695.

8. Pitt, K. G., Webber, R. J., Hill, K. A. et al. (2015). Compression prediction accuracy from small scale compaction studies to production presses. *Powder Technology*, 270, Part B, 490-493

9. Persson, A. S., & Alderborn, G. (2018). A hybrid approach to predict the relationship between tablet tensile strength and compaction pressure using analytical powder compression. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 125, 28-37

10. Liang, Y., Gregory, N., & Binner, J. (2004). Green Forming with Nanoparticles. *Key Engineering Materials*, 264-268, 2319-2322

11. Obradović, N., Djordjevic, N., & Peles, A. (2015). The influence of compaction pressure on the density and electrical properties of cordierite-based ceramics. *Science of Sintering*, 47(1), 15-22

12. Munir, Z., Anselmi-Tamburini, U., & Ohyanagi, M. (2006). The Effect of Electric Field and Pressure on the Synthesis and Consolidation of Materials: A Review of the Spark Plasma Sintering. *Journal of Materials Science*, 41(2), 763-777

13. Norfauzi, T., Hadzley, A. B., Azlan, U. A. A. et al. (2021). Effect of pressure on density, porosity and flexural strength during cold isostatic press of alumina-ysz-chromia cutting tool. *Journal of Physics: Conference Series, IRTTEC 2020*, 1793, 012073
14. Torres, M. A., Madre, M. A., Dura, O. J. et al. (2022). Evaluation of pressure and temperature effect on the structure and properties of  $\text{Ca}_{2.93}\text{Sr}_{0.07}\text{Co}_4\text{O}_9$  ceramic materials. *Ceramics International*, 48(6), 7730-7747
15. Jong-Ho, B., Kang-Min, K., Kyeong-Uk, L. et al. (2021). Study on the Manufacturing of Ultra-Fine Ore Briquettes for Charging in a Sintering Machine. *Korean Journal of Metals and Materials*, 59(1), 14-20
16. Khudyakov, A. Yu., Vashchenko, S. V., Baiul, K. V. et al. (2022). New method for predicting the compactability of charges made from fine materials of the mining and smelting industry. *Metallurgist*, 65(9-10), 941-951
17. Khudyakov, A., Vashchenko, S., Baiul, K. et al. (2022). Optimization of briquetting technology of fine-grained metallurgical materials based on statistical models of compressibility. *Powder Technology*, 412(5), 118025
18. Sen, R. Mitra, K., & Dey, R. (2010). Effect of grading of chromite ores on the quality of briquettes. *ISIJ International*, 50(2), 200-206
19. Mäkelä, M., Paananen, T., Heino, J. et al. (2012). Influence of fly ash and ground granulated blast furnace slag on the mechanical properties and reduction behavior of cold-agglomerated blast furnace briquettes. *ISIJ International*, 52(6), 1101-1108
20. Singh, M., & Björkman, B. (2004). Effect of Processing Parameters on the Swelling Behaviour of Cement-bonded Briquettes. *ISIJ International*, 44(1), 59-68
21. Anyashiki, T., Fujimoto, H., Yamamoto, T. et al. (2015). Basic examination of briquetting technology for ferro-coke process on 0.5 t/d bench scale plant. *Tetsu-to-Hagane*, 101(10), 515-523
22. Das, R., Mondal, M. K., & Pramanik, S. (2022). Strengthening behaviour and microstructural properties during the compaction of reduced blast furnace flue dust - fly ash - iron metal matrix composite fines using powder metallurgy route. *Transactions of Indian Institute of Metals*, 75(3), 2255-2263
23. Qi, L., Zhou, X., Peng, X. et al. (2022). Study on the Pore Structure and Fractal Characteristics of Briquettes with Different Compression Loads. *Sustainability*, 14, 12148
24. Li, Y., Zang, Y., Xiong, Y. et al. (2023). Effect of Briquetting Pressure on the Properties, Reduction Behavior, and Reduction Kinetics of Cold-Bonded Briquette Prepared From Return Fines of Sinter. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 54, 355-369
25. Dvilis, E. S. (2014). *Zakonomernosti procesov konsolidacii poroshkovykh sistem pri izmenenii uslovij deformacii i fizicheskikh vozdeystvij*. Dis. dokt. fiz.-mat. nauk : 01.04.07. Tomskij politeh. un-t
26. Samsonov, G. V., & Ristić, M. M. (1973). *Au Essay on the Generalization of the Sintering Theory*. International Team for Studying Sintering. Beograd
27. Andreeva, N. V., Radomyselski, I. D., & Shcherban, N. I. (1975). Compressibility of powders. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 14(6), 457-464

28. Andrievskii, R. A. (1988). Role of the nature of the chemical bond and the dispersion in the formation of powder materials. *Powder Metall Met Ceram*, 27(8), 627-633
29. Andrievskii, R. A. (1991). *Poroshkovoe materialovedenie*. Metallurgiya
30. GOST 4234-77. (2001). *Reagents. Potassium chloride. Specifications*. Standards Publishing
31. GOST 4530-76. (1992). *Reagents. Calcium carbonate. Specifications*. Standards Publishing
32. Brudz, V. H., Rakovskaia, V. A., & Uskova, L. Ie. (1968). *Spravochnik pokazatelei kachestva khimicheskikh rieaktivov*. Book 2. Khimiia
33. GOST 29219-91. (2004). *Fluorite concentrates for acids and ceramics. Specifications*. Standards Publishing
34. GOST 9808-84.(1998). *Pigment titanium dioxide. Specifications*. Standards Publishing
35. GOST 9428-73. (1993). *Reagents. Silicon (IV) oxide. Specifications*. Standards Publishing
36. GOST 30558-98. (2002). *Alumina, metallurgical. Specifications*. Standards Publishing
37. Andreeva, N. V., Radomyselski, I. D., & Shcherban, N. I. (1975). Compressibility of powders. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 14(6), 457-464
38. Kunin, N. F. & Yurchenko, B. D. (1963). Regularities in the compacting of powders of different materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2(6), 433-439
39. Yemelianov, V. S., & Yevstiukhyn, A. I. (1968). *Metalurhiia yadernoho horiucheho*. Atomizdat
40. Ge, R. (1991). A new powder compaction equation. *International Journal of Powder Metallurgy*, 27(3), 211-216
41. Shapiro, I., & Kolthoff, I. M. (1974). The compressibility of Silver Bromide Powders. *The Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 51(2), 483-493
42. Panelli, R., & Filho, F. A. (1998). Compaction Equation and Its Use to Describe Powder Consolidation Behavior. *Powder Metallurgy*, 41(2), 131-133
43. Walker, E. E. (1923). The properties of powders. Part VI. The compressibility of powders. *Transactions of the Faraday Society*, 19, 73-82
44. Mort, P. R., Sabia, R., Niesz, D. E. et al. (1994). Automated generation and analysis of powder compaction diagrams. *Powder Technology*, 79(2), 111-119
45. Seltman, H. J. (2018). *Experimental Design and Analysis*. Carnegie Mellon University
46. Dean, A., Morris, M., Stufken, J., et al. (2016). *Handbook of Design and Analysis of Experiments*. Boca Raton : Tailor and Francis Group
47. Yudenkov, V. A. (2013). *Dispersionnyi analiz*. Biznesofsiet
48. Emsley, J. (1998). *The elements*. Oxford : Clarendon Press
49. Samsonov, G. V. (2012). *Handbook of the Physicochemical Properties of the Elementes*. NY : Springer New York
50. Haynes ,W. M. (2014). *Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton : Taylor & Francis Group

51. Dric, E. M. (1985). *Svojstva elementov*. Metallurgiya
52. Lidin, R. A., Andreeva, L. L., & Molochko, V. A. (2006). *Konstanty neorganicheskikh veshestv*. Drofa
53. Bacanov, S. S. (2000). *Strukturnaya himiya*. Dialog - MGU
54. Yacmirskij, K. B. (1951). *Termohimiya kompleksnyh soedinenij*. Izd-vo Akad. nauk SSSR
55. Urusov, V. S. (1975). *Energeticheskaya kristallohimiya*. Nauka
56. Pauling, L. (1988). *General Chemistry*. NY : Dover Publications
57. Krasnov, K. S. (1984). *Molekuly i himicheskaya svyaz*. Vysshaya shkola
58. Zuev, V. V. (2015). Concept of core electron structure of minerals. *Gornyi Zhurnal*, (5), P. 23- 29.
59. Zuev, V. V. (2009). *Ostovno-elektronnaya kristallohimiya i svojstva mineralov*. Nauka
60. Prihodko, E. V. (1995). *Metallohimiya mnogokomponentnyh sistem*. Metallurgiya
61. Sobolev, V. S. (2007). *Vvedenie v mineralogiyu silikatov*. Geo
62. Hasanov, O. L., Struc, V. S., & Dvilis, E. S. (2015). *Soprotivlenie materialov. Tverdot i treshinnostjokost nanostrukturnyh keramik*. Yurajt

**O. Yu. Khudyakov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, Senior Researcher of Technological Equipment and Control Systems Department, ORCID 0000-0002-6507-1120

**S. V. Vashchenko**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, Senior Researcher of Technological Equipment and Control Systems Department, ORCID 0000-0001-8344-961X

**K. V. Bayul**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, Senior Researcher of Technological Equipment and Control Systems Department, ORCID 0000-0003-1426-7956

**Yu. S. Semenov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior researcher, Head of Technological Equipment and Control Systems Department, ORCID 0000-0003-2299-5742

**P. V. Krot**<sup>2</sup>, Ph. D. (Tech.), Assistant Professor, ORCID 0000-0002-3347-3862

<sup>1</sup> Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

<sup>2</sup> Wroclaw University of Science and Technology

#### **DEVELOPMENT OF THE UNIVERSAL METHOD FOR PREDICTING THE DENSITY OF BRIQUETTES FROM DRY FINE-FRACTIONAL MATERIALS BASED ON THE RESULTS OF A COMPARATIVE STUDY OF COMPRESSION FACTORS**

**Abstract.** Most of the known models for predicting the density of powdered materials are empirical in nature and cannot be applied to a wide range of materials. In order to create a universal method for predicting density, a comparative study of the influence of technological factors on the compressibility of powders was performed in this paper, and the fundamental connections between compressibility and the physical and energy properties of the charge particles were established. Using the method of two-factor analysis of variance (two-way ANOVA), the

influence of size and the nature of dry powder's particles on the compression intensity factor was compared. It was found that under conditions when the size of large and small particles differs by no more than one order of magnitude, the dominant factor affecting the compression of the powder is the characteristics of the nature of the particles. Reliable connections between the compressibility of powders and thermodynamic, thermal (melting point, heat of sublimation, etc.) and mechanical (Young's modulus, shear modulus, hardness, etc.) properties of the particle substance have been obtained. We also obtained statistical correlations between the compressibility of powders and the energy characteristics of the crystalline substance of the powder particles: the energy of the crystal ion lattice, the energy of atomization, and the energy of the core-electron interaction. The maximum closeness of correlation of the dependences is estimated by the Chaddock scale as high and very high. Based on the above dependencies, a multiple regression model of the combined effect of the energy and structural characteristics of the particles' crystal lattice of on the compressibility of a powder was developed. The coefficient of determination of the model is 0.98. Also, using the obtained dependencies, a universal method for predicting the density of dry powder compacts depending on the applied pressing pressure was developed. The prediction error when applying the method does not exceed 9.5%. The developed method can be used to perform, without conducting experimental studies, a preliminary assessment of the possibility of achieving the required briquette density, selecting technological modes, determining the energy and power characteristics of the process and technical characteristics of pressing equipment.

**Key words:** dry powder materials, prediction of briquette density, technological factors, particle size, physical properties of the particle, energy characteristics of the particle, two-factor analysis of variance.

**For citation:** Khudyakov, O. Yu., Vashchenko, S. V., Baiul, K. V., Semenov, Yu. S., & Krot, P. V. (2024). Development of the universal method for predicting the density of briquettes from dry fine-fractional materials based on the results of a comparative study of compression factors / *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 686-709. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-686-709>.

*Стаття надійшла до редакції збірника 30.08.2024 р.*  
*Рекомендовано до друку реколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)*