

## **Кореляції між балом формованості порошку, показником міцності пресовок та середньою величиною фактора круглості частинок порошку**

О. К. Радченко

*Досліджено залежності між балом формованості, показником міцності  $\bar{\Phi}$  та середньою величиною фактора круглості  $F_c$  пласкої проекції частинок шести порошків (двох газорозпиленої швидкорізальної сталі марки Р6М5Ф3, нікелю електролітичного марки ПНЭ-1, залізного відновленого, магнію та силікобарію) на предмет наявності між ними кореляції. Встановлено, що зміна величини бала формованості зі зміною величини фактора круглості може бути апроксимована лінійною обернено пропорційною залежністю з досить високою величиною достовірності апроксимації ( $R^2 = 0,857$ ). Між  $\bar{\Phi}$  та  $F_c$  існує обернено пропорційна гіперболічна залежність. Виявлено також прямо пропорційну лінійну залежність між відносною насипною густиною та  $F_c$ . Показано, що фактор круглості може бути легко і швидко розрахований з використанням напівавтоматичної системи аналізу зображень SLAMS-600.*

### **Вступ**

Комплексна оцінка формованості порошку включає визначення бала формованості (БФ) та показника міцності [1]. Враховуючи, що формованість залежить від багатьох параметрів порошку (фізичного стану матеріалу частинок, гранулометричного складу, форми частинок та наявності оксидів на їх поверхні [2]), дослідження ступеню кореляції між ними дозволить ранжувати останні по значимості. Раніше було показано, що існує прямо пропорційний лінійний кореляційний зв'язок між відносною насипною густиною (ВНГ) порошку та мінімальною відносною густиною пресовок [3], обернено пропорційний лінійний кореляційний зв'язок між ВНГ порошку та балом формованості [4], а також між коефіцієнтом шорсткості та показником міцності [5]. Коефіцієнт шорсткості, введений І. М. Федорченко у роботі [6], представляє собою відношення питомої поверхні 1 грама порошку до розрахованої питомої поверхні 1 грама сферичних частинок з розміром, що відповідає середньому розміру частинок. Недоліком методики розрахунку коефіцієнта шорсткості є те, що для порошків середньої тонкості та крупних утруднене точне визначення питомої поверхні, а для тонких порошків — середнього розміру частинок. Крім того, знаходження середнього розміру частинок ситовим методом [7, с. 9] дає значну помилку при відхиленні форми частинок від рівновісної. Похибка також виникає при дослідженні порошків з широким гранулометричним розподілом. Представляє інтерес встановлення зв'язку між балом формованості, показником міцності та формою частинок порошку. Для кількісної оцінки форми частинок існує багато моделей та показників, аналіз яких проведений в роботі [5]. Для частинок з однаковими або близькими розмірами у трьох взаємоперпендикулярних напрямках в якості показника форми може бути використаний нормований показник круглості, що описує форму (контур) пласкої проекції частинок [8]. Хоча треба пам'ятати, що контур пласкої проекції практично

ніколи повно не відображає структуру, форму поверхні та шорсткість частинок і такий опис форми є наближеним.

### Матеріали та методики досліджень

Об'єктом дослідження були порошки газорозпиленої швидкоріжучої сталі марки Р6М5Ф3 — вихідний та оброблений по описаній раніше технології [9], нікелю електролітичного марки ПНЭ-1 (ГОСТ 9722-79), залізний, що одержаний відновленням індійського суперконцентрату blue dust [10], магнію та силікобарію, що отриманий подрібненням зливка силікобарію марки СБ-20. Властивості порошків наведені в таблиці.

Вимірювання середнього діаметра Фере [7, с. 45] та фактора форми частинок виконано за допомогою спеціалізованого матеріалознавчого комплексу аналізу зображень SIAMS-600 [8]<sup>1</sup>. Відносну насипну густину порошків визначали за стандартною методикою з використанням лійки (ДСТУ 2495-94). Міцність пресовок  $\sigma_{\text{вн}}$  (МПа), що одержані за стандартною методикою випробування на ущільнюваність порошків (ГОСТ 25280-90), визначали при діаметральному стисненні та розраховували за формулою [11]

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{2P}{\pi DH}, \quad (1)$$

де  $P$  — величина руйнуючого зусилля, мН;  $D$  та  $H$  — діаметр та висота пресовки, м.

Показник міцності  $\bar{\Phi}$  дорівнює

$$\bar{\Phi} = \frac{\sigma_{\text{вн}}}{p}, \quad (2)$$

де  $p$  — величина тиску пресування, МПа.

Коефіцієнт кореляції був розрахований за формулою

$$R_{x,y} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (3)$$

де  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  — стандартні відхилення середнього  $X$  та  $Y$ ; коваріацію двох змінних  $\text{Cov}(X, Y)$  знаходили за формулою

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \mu_x)(y_j - \mu_y), \quad (4)$$

де  $x_j$  та  $y_j$  — поточні величини  $x$  та  $y$ ;  $\mu$  відповідає величині  $x$  на лінійній апроксимаційній залежності  $Y$  від  $X$ , одержаній за методом найменших квадратів.

### Характеристики досліджених порошків

Матеріал порошку	Фракційний склад, мкм	Густина матеріалу частинок, г/см <sup>3</sup>	Середній діаметр Фере, мкм	Відносна насипна густина	$F_c$	Бал формованості	$\bar{\Phi}$ *
Mg	315—400	1,74	482	0,260	0,775	7	0,027
Fe	10—200	7,87	71,9	0,261	0,791	6	0,060
Ni	5—65	8,96	16,3	0,362	0,812	5	0,024
Р6М5Ф3 обр.	-50	8,61	43,6	0,340	0,835	5	—
SiBa	200—315	3,94	379	0,434	0,815	4	0
Р6М5Ф3 вих.	-50	8,61	18,2	0,540	0,931	2	0,000

\* Тиск пресування 400 МПа.

<sup>1</sup> Середній діаметр Фере та фактор форми частинок визначені ст. наук. співроб. О. І. Гетьман.

Для обрахунку результатів експериментів та побудови графіків використовували програму Microsoft Excel.

### Результати дослідження

Фактори круглості  $F_c$ , бали формованості, а також відповідні величини показника міцності  $\bar{\Phi}$  були розраховані для тиску пресування 400 МПа (табл. 2). Фактор круглості визначали як відношення довжини кола з площею, що дорівнює площі частинки  $S$ , до її периметра  $\Pi$  [8]:

$$F_c = 2\sqrt{\pi S}/\Pi. \quad (5)$$

Залежність бала формованості від фактора круглості (в інтервалі від 0,95 до 0,775) порошоків, що представлена на рис. 1, може бути апроксимована обернено пропорційною лінійною залежністю з досить високою величиною достовірності апроксимації ( $R^2 = 0,857$ ):

$$\text{БФ} = 28,71 - 28,89F_c. \quad (6)$$

Залежність показника міцності  $\bar{\Phi}$  від фактора круглості при тиску пресування 400 МПа, що представлена на рис. 2, близька до гіперболічної. Частинки порошоків заліза відновленого та нікелю електролітичного ( $\bar{\Phi} = 0,060$  та  $0,024$  відповідно, див. таблицю) завдяки методу їх одержання мають розвинену форму і величина фактора круглості, що розрахована по їх тіньовому контуру, буде заниженою [12, 13], тому стрілками вказані ймовірні місця розташування істинних величин  $F_c$ . Такий хід залежності можна пояснити тим, що сама зміна фактора круглості від величини середнього периметра проекції частинок при незмінному їх середньому діаметрі описується також обернено пропорційною гіперболічною залежністю (рис. 3), хоча прямого зв'язку між середнім периметром проекції частинок та показником міцності поки не встановлено. Велика розбіжність даних обумовлена тим, що міцність пресовок на розрив, яка входить у формулу (2) для розрахунку показника міцності, залежить від більшого числа чинників, ніж формованість [14], а також тим, що ця інтегральна характеристика пресовки залежить від однорідності її структури та характеризує найслабший перетин, який утворився при пресуванні за умови статистичного розташування частинок.

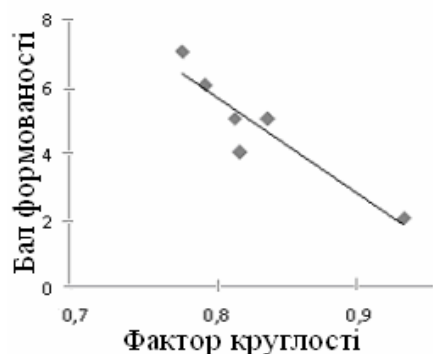


Рис. 1. Залежність бала формованості від середнього значення фактора круглості.

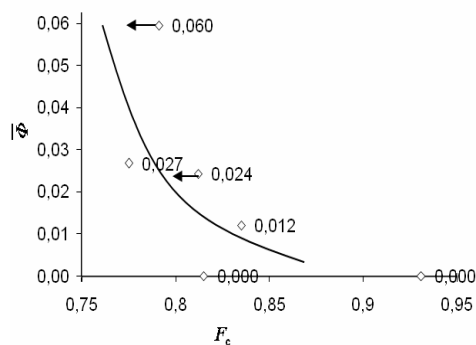


Рис. 2. Залежність показника міцності  $\bar{\Phi}$  від середнього значення фактора круглості контуру проекції частинок  $F_c$  при тиску пресування 400 МПа.

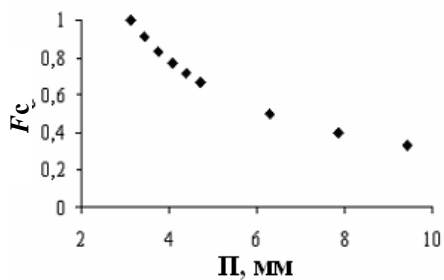


Рис. 3. Залежність фактора круглості від периметра контуру частинки з середнім діаметром 1 мм.

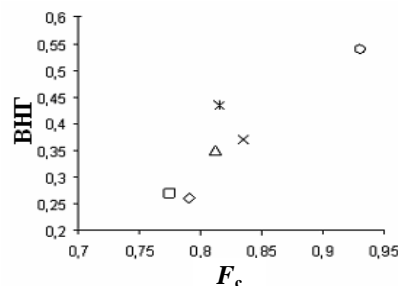


Рис. 4. Залежність ВНГ порошків від середнього значення фактора круглості.

Питання залежності технологічних властивостей порошку (зокрема, формованості та ВНГ) від форми його частинок ще потребує дослідження. Відносно формованості більшість авторів дотримуються думки, що на формованість та міцність пресовки з пластичних порошків впливає механічна компонента, а саме заклинення фрагментів частинок між іншими фрагментами або групами частинок [15]. У такому випадку важливу роль відіграють відповідність розмірів, форм та розташування виступів та западин сусідніх частинок для створення зачеплення або заклинення типу “блискавка”. Таку відповідність демонструють електролітичні порошки, які мають високу формованість та міцність пресовок [16]. Відносна насипна густина досліджених порошків майже лінійно зменшується зі зменшенням  $F_c$  (рис. 4). Більша, ніж у інших порошків, ВНГ характерна лише для порошку SiBa, що може бути обумовлене його фрикційними властивостями та неметалевим походженням.

Як відмічалось раніше [6], складність оцінки впливу форми частинок на формованість та міцність пресовок полягає у відсутності факторів форми, які б адекватно описували об’ємну будову частинки, макро- та мікроструктуру її поверхні, а, крім того, частинки порошку, що відрізняються від сферичних, мають нерегулярну форму і не можуть характеризуватися простими математичними виразами. Важливу роль відіграє також розмірний фактор або співвідношення між розмірами виступів та западин на поверхнях частинок та розмірів самих частинок [17].

### Висновки

Встановлено кореляцію між кількісними характеристиками формованості (балом формованості та показником міцності), а також відносною насипною густиною порошку та фактором круглості контуру плоскої проекції частинки  $F_c$ . Залежності балу формованості та ВНГ порошку від  $F_c$  можуть бути апроксимовані обернено та прямо пропорційною лінійними залежностями відповідно. Залежність показника міцності від  $F_c$  є обернено пропорційною гіперболічною. Фактор круглості може бути легко і швидко розрахований з використанням напівавтоматичної системи аналізу зображень SIAMS-600.

1. Радченко О. К., Гогаєв К. О. Комплексна оцінка формуємості сумішей порошків композиційних припойних матеріалів на нікелевій основі // Обработка материалов давлением. — Краматорск: ДГМА. — 2008. — № 1 (19). — С. 236—242.

2. *Айзенкольб Ф.* Порошковая металлургия. — М.: Металлургия, 1959. — 518 с.
3. *Радченко О. К., Гогаев К. О., Грибков В. К., Аскеров М. Г.* Формуємість металевих порошків та технологічна міцність одержаних з них пресовок // Современные проблемы физического материаловедения. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2006. — Вып. 14. — С. 13—23.
4. *Радченко О. К., Гогаев К. О., Аскеров М. Г.* Визначення формуємості порошку за допомогою балу формуємості // Зб. наук. праць "Вісник Донбаської державної машинобудівної академії". — Краматорськ: ДДМА. — 2007. — № 1 (7). — С. 28—33.
5. *Радченко А. К.* Выбор критерия формы частиц порошка применительно к его формуемости // Современные проблемы физического материаловедения. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2002. — С. 42—50.
6. *Федорченко И. М.* Исследование удельной поверхности металлических порошков // Изв. АН СССР. Техн. науки. — 1951. — № 3. — С. 411—418.
7. *Буланов В. Я., Кватер Л. И., Долгаль Т. В. и др.* Диагностика металлических порошков. — М.: Наука, 1983. — 280 с.
8. *SIAMS – 600.* Анализатор изображения. — Екатеринбург, 1998. — 120 с.
9. *Радченко О. К., Гетьман О. І.* Вплив форми частинок на технологічні властивості газорозпиленних порошків швидкоріжучої сталі // Порошковая металлургия. — 2006. — № 1/2. — С. 12—18.
10. *Федоров Д. Н., Бондаренко Б. И., Покопило Е. П. и др.* Влияние параметров отжига на свойства железного порошка, полученного из индийского суперконцентрата // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 1999. — № 5. — С. 20—27.
11. *Осипов В. Г.* Определение прочности пресовок из металлических порошков // Завод. лаборатория. — 1960. — XXVI, № 1. — С. 122—125.
12. *Радченко О. К., Гогаев К. О., Ковальченко М. С.* Порівняння Фур'є та металографічного аналізу форми частинок // Зб. наук. праць "Вісник Донбаської державної машинобудівної академії". — Краматорськ: ДДМА. — 2010. — У друку.
13. *Радченко А. К.* Механические свойства неспеченных формовок. I. Анализ феноменологических зависимостей, описывающих прочность неспеченных формовок // Порошковая металлургия. — 2004. — № 9/10. — С. 12—27.
14. *Анциферов В. Н., Перельман В. Е.* Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов. — М.: Издательский дом "Грааль", 2001. — 628 с.
15. *Радченко А. К.* Механические свойства неспеченных формовок. II. Влияние относительной насыпной плотности порошка на прочность формовок при различных температурных условиях формования // Порошковая металлургия. — 2004. — № 11/12. — С. 5—19.
16. *Радченко О. К.* Визначення факторів форми частинок порошків електролітичного нікелевого та залізного відновленого // Электронное строение и свойства тугоплавких соединений, сплавов и металлов. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2004. — С. 207—214.
17. *Katainen J., Paajanen M., Ahtola E. et al.* Adhesion as an interplay between particle size and surface roughness // [J. of Colloid and Interface Science.](#) — 2006. — [304, No. 2.](#) — P. 524—529.