



УДК 537.623

## THE USE OF KONDORSKY STRESS THEORY TO PREDICTION OF THE COERCIVE FORCE OF IRON POWDER

### ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ НАПРУГ КОНДОРСЬКОГО ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВЕЛИЧИНИ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ ЗАЛІЗНОГО ПОРОШКУ

Kotvytska K. A. / Котвицька К. А.

cand. of ph.-math. sc., assoc. prof. / к.ф.-м.н., доц.

ORCID: 0000-0001-6629-5102

Ukrainian State University of Railway Transport,

Ukraine, Kharkiv, Feuerbach Square 7, 61050

Український державний університет залізничного транспорту,

Україна, Харків, майдан Фейєрбаха 7, 61050

**Анотація.** У статті досліджено вплив підвищення внутрішньої напруги в залізному порошку на його коерцитивну силу. Модель, що описує цю залежність, була розроблена та використана для прогнозування коерцитивної сили інших зразків. Внутрішні напруги створювалися кульовим млином, оскільки використання кульових млинів в даний час є популярним завдяки його ефективності та економічним перевагам.

Отримані результати мають практичне застосування в різних галузях, включаючи порошкову металургію, магнітні матеріали та технологію літій-іонних акумуляторів, для покращення якості та властивостей виробів із порошкових матеріалів, що сприяє подальшому прогресу в цих галузях.

**Ключові слова:** матеріалознавство, порошкова металургія, теорія Кондорського, гістерезис, коерцитивна сила, кульковий млин.

#### Вступ.

Матеріалознавство відіграє значущу роль в сучасній науці, досліджуючи властивості існуючих матеріалів та спрямовуючи зусилля на створення нових матеріалів з покращеними хімічними та фізичними характеристиками [1].

Однією з галузей матеріалознавства є металургія, зокрема порошкова металургія [2], яка є важливим методом для виготовлення виробів із порошків металів та неметалічних елементів. Виробництво деталей методами порошкової металургії є одним із найбільш енерго- та матеріалоефективних методів. Проте недоліком є те, що цей метод не завжди є економічно доцільним для великого серійного виробництва. В даний час чавун використовується в багатьох галузях промисловості. Порівняно з деревиною чи міддю він набагато міцніший, і при правильному нагріванні йому відносно легко надається форма та він може витримувати відносно високі температури. Залізний порошок, як основа сировини дуже часто використовується в порошковій металургії, магнітних матеріалах, катодах літій-іонних батареї та в багатьох інших сферах застосування через його відносно низьку ціну, оскільки залізо становить приблизно 5 % земної кори і залізної руди може містити до 70 % вмісту заліза [3].

#### Основний текст.

В даний час загальна уніфікована теорія магнітного гістерезису все ще не може бути розроблена через те, що ми відносно мало знаємо про мікрофізичну природу структури внутрішнього безладу в твердих тілах. Петля гістерезису є



проявом магнітного гістерезису на макроскопічному рівні. Зазвичай це описується в основному залишковою магнітною поляризацією та коерцитивною силою [4]. У цій роботі досліджено вплив збільшення величини внутрішніх напружень у феромагнітному порошку заліза на значення його коерцитивної сили, і за допомогою теорії напружень Кондорського визначено прогнозовані значення коерцитивної сили, які порівнювали з експериментально визначеними значеннями. Дослідження коерцитивної сили також є важливим у зв'язку з тим, що зміни коерцитивної сили феромагнітних матеріалів переносяться на зміни енерговитрат під час їх експлуатації [5].

В основу своєї теорії напружень Є. І. Кондорський поклав уявлення про наявність внутрішніх напружень  $\sigma$  у кожній реальній феромагнітній речовині [6]. Ці внутрішні напруження можуть бути обумовлені різноманітними факторами, такими як дефекти в кристалічній решітці або явище магнітострикції. Вважаючи, що амплітуда внутрішніх напружень  $\Delta\sigma$  дорівнює порядку середньому значенню внутрішніх напружень  $|\bar{\sigma}|$ , то має місце рівняння

$$H_c = p \frac{3}{2} \lambda_s |\bar{\sigma}| \frac{1}{I_s}, \quad (1)$$

де  $p$  є функцією частки товщини стінки Блоха  $\lambda_s$  і довжини хвилі внутрішньої напруги, а її максимальне значення становить приблизно 0,87 при довжині хвилі внутрішньої напруги, порівнянній з товщиною стінки Блоха. Для цього максимального значення ми можемо записати

$$H_c = \frac{3}{2} \frac{\lambda_s |\bar{\sigma}|}{I_s}. \quad (2)$$

Серед найважливіших висновків теорії напружень Кондорського є висновок що зростання  $H_c$  є прямо пропорційне зростанню середньої амплітуди внутрішніх напружень  $|\bar{\sigma}|$ .

#### **Вхідні дані та методи.**

У даній роботі ми досліджували залежність коерцитивної сили від внутрішнього напруження в частках залізного порошку. Внутрішнє напруження було створено в планетарному кульовому млині (рисунок 1)



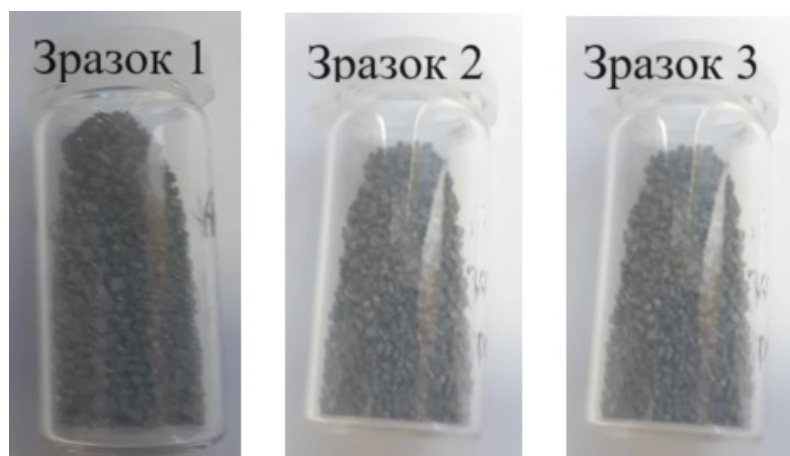
**Рисунок 1 - Планетарний кульовий млин.**

у млиновому посуді без куль (рисунок 2) при обертах 200 об/хв протягом різних проміжків часу.



**Рисунок 2 - Контейнер для подрібнення та внутрішня частина контейнера для подрібнення.**

У першій частині дослідження було створено три зразки порошку з різними тривалостями обробки: зразок 1 - обробки протягом 2 годин, зразок 2 – 3 години, зразок 3 – 6 годин (рисунок 3).



**Рисунок 3 - Зразки № 1, 2 і 3.**

Вимірювання значень коерцитивної сили було здійснено за допомогою вимірювального пристрою, заснованого на ферозондовому магнітометрі [7].



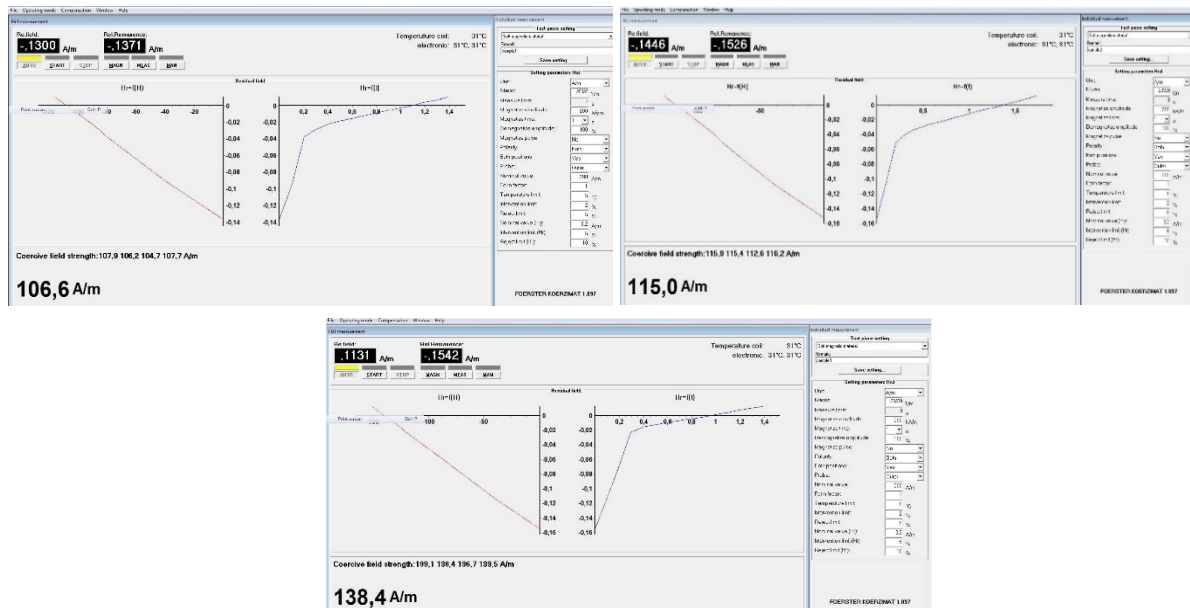
**Рисунок 4 - Зразки № 4, 5 і 6.**



На основі теорії, запропонованої Кондорським, була розроблена математична модель, яка апроксимує отримані дані за допомогою лінійної функції. Згодом ми розрахували очікувані значення коерцитивної сили для часів 2 години 30 хвилин - зразок 4, 3 години 45 хвилин - зразок 5 і для 4 годин 30 хвилин - зразок 6 (рисунок 4). Визначали абсолютні відносні відхилення та середнє абсолютне відносне відхилення

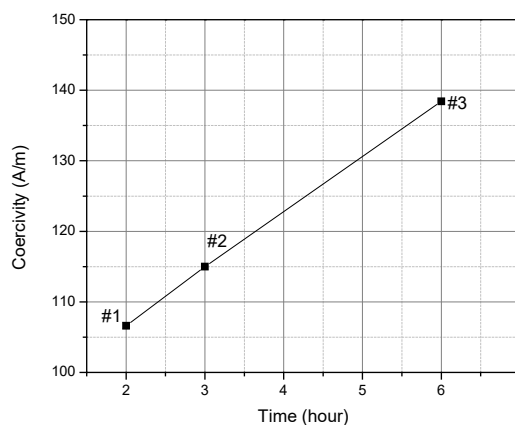
**Результати досліджень.**

Результати вимірювання коерцитивної сили для зразків 1, 2 і 3 вказують, що зі збільшенням часу в млині коерцитивна сила зростає (рисунок 5).



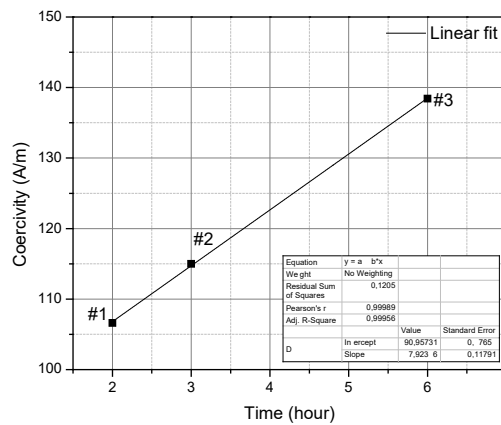
**Рисунок 5 - Коерцитивна сила зразків 1, 2 і 3.**

Відповідно до теорії Кондорського, ми враховуємо цю залежність, за допомогою лінійної апроксимації (рисунок 6).



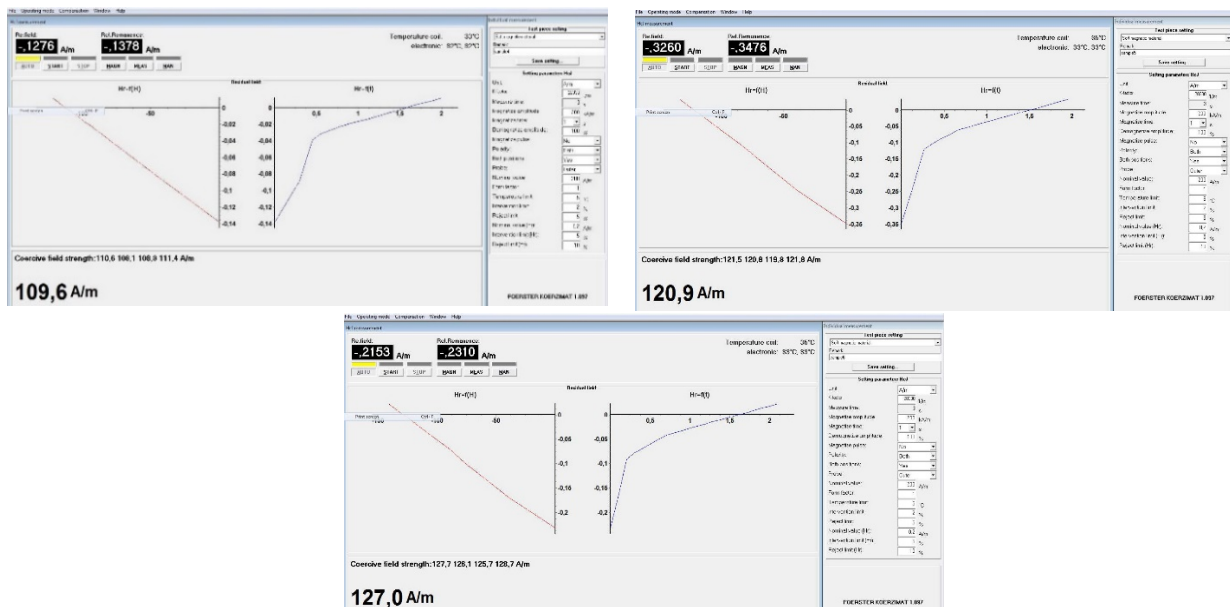
**Рисунок 6 - Залежність коерцитивної сили від часу 1, 2 і 3.**

Ми отримали залежність  $H_c = 7,92346 \cdot t + 90,95731$ , за допомогою якої можна розрахувати очікувані значення коерцитивної сили для наступних трьох зразків. Згідно з теорією Кондорського, ми підігнали залежність лінійною функцією (рисунок 7).

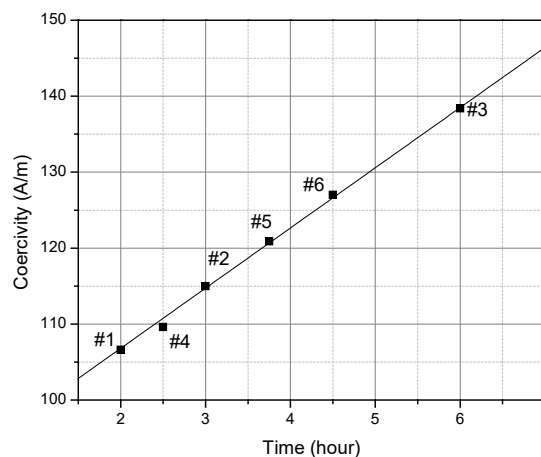


**Рисунок 7 - Апроксимація за допомогою лінійної функції.**

Для зразка 4 (2 год і 30 хв) ми очікуємо 110,77 А/м, для зразка 5 (3 год і 45 хв) ми очікуємо 120,67 А/м і для зразка 6 (4 год і 30 хв) ми очікуємо 126,61 А/м. Ми виміряли коерцитивну силу для зразків 4, 5 і 6 (рисунок 8) і внесли їх у загальний графік з попередніми результатами (рисунок 9).



**Рисунок 8 - Коерцитивна сила зразків 4, 5 і 6**



**Рисунок. 9. Залежність коерцитивної сили від часу для всіх зразків.**





Порівняли прогнозовані значення коерцитивної сили з розрахунковими та визначили абсолютні відносні відхилення та середнє абсолютне відносне відхилення (таблиця 1).

**Таблиця 1 - Розраховані та експериментально визначені значення коерцитивної сили для зразків 4,5 та 6.**

	<b>Зразок 4</b>	<b>Зразок 5</b>	<b>Зразок 6</b>
Розрахункова коерцитивна сила (А/м)	110,77	120,67	126,61
Експериментально визначена коерцитивна сила (А/м)	109,6	120,9	127
Абс. відносне відхилення (%)	1,06	0,19	0,31
Середнє значення = 52 %			

### **Висновки.**

У роботі ми створили дві групи з трьох зразків порошку заліза, щоб вивчити вплив збільшення внутрішніх напруг на коерцитивну силу. З першої серії ми отримали математичну модель  $H_c = 7,92346 \cdot t + 90,95731$ , яка описує досліджувану залежність для цього матеріалу. Оцінили очікувані значення коерцитивної сили для другої серії зразків і порівняли їх з вимірними. Середнє абсолютне відносне відхилення становило 0,52 %, що означає, що наші міркування та методи придатні для цього матеріалу. Загалом, робота відкриває нові можливості для вивчення та розуміння властивостей порошоків металів, сприяє подальшому розвитку цих галузей у майбутньому.

### **Література.**

1. F. Lemoisson, L. Froyen Understanding and improving powder metallurgical processes, Fundamentals of Metallurgy, 2005, P.471-502.  
<https://doi.org/10.1533/9781845690946.2.471>
2. C. Selcuk Non-destructive evaluation of powder metallurgy parts, Advances in Powder Metallurgy, 2013, P. 437-454.  
<https://doi.org/10.1533/9780857098900.3.437>
3. Jintian Wu, Bin Xu, Yujuan Zhou, Zhoglin Dong, Shouguo Zhong, Tao Jiang A novel process of reverse flotation-hydrogen reduction for preparation of high-purity iron powder with superior magnetite concentrate, Separation and Purification Technology, 2023, Vol. 307(7):122784.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122784>
4. Peng Wang, Jian Hu, Tingyi Liu, Guilin Han, Wen-min Ma, Jun Li New insights into ball-milled zero-valent iron composites for pollution remedation: An overview, Journal of Cleaner Production, 2023, Vol. 385, 135513.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135513>
5. Frederik Janssen, Eline Lambrechts, Ines Pynket, Arno G.B. Wouters Ball milling alters the extractability and colloidal state of oat proteins, Journal of Cereal Science, 2023, Vol. 112(6), 103725.



<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103725>

6. A. Garduno-Medina, F.J. Flores-Ruiz, Enrique Camps, O. Garcia-Zaldivar, F. Perez-Rodriguez Coercive field modified via partial ion substitution, mechanical load and charge injection in (Ba, Ta, Cr) doped BiFeO<sub>3</sub> films, Ceramics International, 2023, Vol. 49 (19), 31046-31056.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.049>

7. W.D. Schubert, R. Steinlechner, R. de Oro Calderon On the constitution and cobalt alloy formation in WC-1.4wt% Ru-9.5wt% Co cemented carbides, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, Vol. 116, 106346.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106346>

**Abstract.** *The article examines the effect of increasing the internal stress in iron powder on its coercive force. A model describing this dependence was developed and used to predict the coercive force of other samples. The internal stresses were created by a ball mill, as the use of ball mills is currently popular due to its efficiency and economic advantages.*

*The obtained results have practical applications in various fields, including powder metallurgy, magnetic materials, and lithium-ion battery technology, to improve the quality and properties of powder material products, contributing to further progress in these fields.*

**Key words:** *materials science, powder metallurgy, Kondorsky theory, hysteresis, coercive force, ball mill.*

Статья отправлена: 18.03.2024 р.

© Котвицька К.А.