

УДК 621.762.4.04

А.В.Мініцький¹, Д.В.Ведель², О.В. Степанов¹, Н.В.Мініцька¹
Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»¹
Інститут проблем матеріалознавства ім.І.М.Францевича НАНУ²
АНАЛІЗ РІВНЯНЬ ПРЕСУВАННЯ ПЛАКОВАНИХ ЗАЛІЗНИХ ПОРОШКІВ

В роботі проведено аналіз ущільненості залізного порошку плакованого міддю за допомогою основних математичних рівнянь, що описують процеси деформації пористого тіла, як залежність щільності від тиску пресування. Застосовано основні теоретичні положення, що описують щільність порошкового тіла як функцію від тиску до яких відносяться рівняння Куніна-Юрченка, Бальшина М.Ю., Ждановича Г.М. та Штерна М.Б. Показано, що характер ущільнення залізного порошку плакованого міддю відрізняється від ущільнення однокомпонентного залізного порошку, що обумовлено тим, що для композиційних порошків залізо – мідь переважають механізми пластичної деформації. Встановлено, що структура пресовок із композиційних залізних порошків де мідь виступає пластичним прошарком, максимально наближена до суцільного континууму і коректно описується рівнянням, що базується на теорії суцільності середовища, що стискається.

Ключеві слова: залізний порошок, статичне пресування, плакування, ущільнення, рівняння пресування, мідь

А.В.Миницкий, Д.В.Ведель, О.В.Степанов, Н.В.Миницкая
АНАЛИЗ УРАВНЕНИЙ ПРЕССОВАНИЯ ПЛАКИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ПОРОШКОВ

В работе проведен анализ уплотненности железного порошка плакированного медью с помощью основных математических уравнений, которые описывают процессы деформации пористого тела, как зависимость плотности от давления прессования. Применены основные теоретические положения, которые описывают плотность порошкового тела как функцию от давления, к которым относятся уравнения Кунина-Юрченка, Бальшина М.Ю., Ждановича Г.М. и Штерна М.Б. Показано, что характер уплотнения железного порошка плакированного медью отличается от уплотнения однокомпонентного железного порошка, что обусловлено тем, что для композиционных порошков железо - медь преобладают механизмы пластической деформации. Установлено, что структура пресовок из композиционных железных порошков, где медь выступает в качестве пластичной прослойки, максимально приближенная к сплошному континууму и корректно описывается уравнением, которое базируется на теории сплошности сжимаемой среды.

Ключевые слова: железный порошок, статическое прессование, плакирование, уплотнение, уравнение прессования, медь

A.V.Minitzky, D.V.Vedel, O.V.Stepanov, N.V.Minitzka
ANALYSIS OF EQUALIZATIONS PRESSING OF THE PLATED FERROUS POWDERS

The analysis of compactedness of ferrous powder is in-process conducted copper-clad by means of basic mathematical equalizations, that describe the processes of deformation of porous body, as dependence of closeness from pressure of pressing. Substantive theoretical provisions that describe the closeness of powder-like body as function from pressure are applied, equalizations of Kunin-Urchenko, Balshin M.U., Zdanovich G.M. and Shtern M.B behave to that. The character of compression of ferrous powder copper-clad differs from the compression of one component ferrous powder, that it contingently that for composition powders iron is a copper the mechanisms of flowage prevail are showed. It is set that structure of pressing from composition ferrous powders, where a copper comes forward as a plastic layer, maximally close to the continuous continuum and correctly described by equalization that is based on the theories of integrity of coercible environment.

Keywords: ferrous powder, static pressing, cladding, compression, equalization of pressing, copper

Постановка проблеми. Процес статичного формування металевих та металокерамічних порошків залишається однією з головних технологічних операцій в практиці порошкової металургії. Якість порошкових виробів суттєво залежить від стадії пресування суміші порошків, від можливості отримання високощільних брикетів, що зменшує об'ємну усадку деталей при спіканні. При цьому існує багато технологічних прийомів, що дозволяють підвищити ущільнення вихідних порошків, серед яких: рафінуючий відпал, обробка розчинами кислот, механоактивація порошків, підбір за гранулометричним складом для збільшення координаційного числа, введення мастил та добавка пластичних компонентів, що мають краще ущільнення [1]. Найбільш широко застосовується саме введення легуючих добавок до складу основного компоненту, оскільки це активує процес спікання та покращує фізико-механічні властивості виробів. Майже 90 % виробів отриманих методом порошкової металургії є виробами конструкційного призначення на основі залізного порошку [2]. Основним легуючим елементом до порошкових виробів конструкційного

призначення є мідь, яка регулює процес усадки та підвищує міцність деталей [3]. Введення міді до залізу у вигляді порошку має свої труднощі через невисокий вміст останньої (біля 5 %), що ускладнює процес рівномірного розподілення легуючого компоненту по об'єму, до того ж вартість чистого порошку міді збільшує кінцеву собівартість порошкових виробів. В даній роботі запропоновано введення міді шляхом хімічного осадження із сірчаноокислої солі, що дозволяє отримати плакований залізний порошок із мідним покриттям. При цьому характер ущільнюваності плакованих порошоків буде відрізнятися від однокомпонентних порошоків або багатокомпонентних механічних сумішей, що ускладнює прогнозування та вибір оптимального тиску при статичному пресуванні. Тому необхідно провести аналіз ущільнення композиційного порошку системи залізо – мідь за допомогою основних математичних рівнянь, що описують процеси деформації пористого тіла, як залежність щільності від тиску пресування.

Постановка задач. Метою даної роботи є вивчення процесу ущільнення плакованого міддю залізного порошку та визначення основних закономірностей процесу ущільнення згідно з сучасними теоретичними положеннями та уявленнями.

Викладення основного матеріалу. Використовували порошок залізу марки ПЖРВ 200.28, як джерело міді використовували сірчаноокислу мідь $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, комплексоутворювачі – гліцерин та аміак, як відновлювач – формальдегід. Процес хімічного осадження оснований на відновленні міді з її комплексної солі формальдегідом у лужному середовищі. Основними факторами, що впливають на процес осадження є концентрація розчину, час та рН. Процес осадження проводили у спеціальній ванні при кімнатній температурі з $\text{pH} \geq 10$. Дослідження кінетики процесу осадження показало, що після 60 хв товщина покриття складає 10–12 мкм, збільшення часу до 100 хв приводить до збільшення товщини покриття до 15–18 мкм (рис. 1).

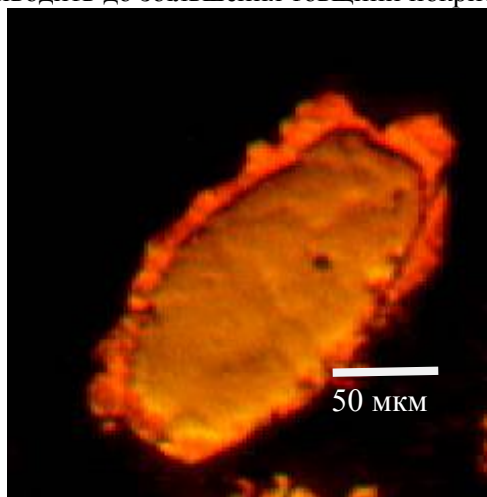


Рис. 1. Частинка залізного порошку, плакованого міддю

Як показали результати металографічного аналізу хімічне осадження дозволяє отримати рівномірний шар мідного покриття на частинках залізного порошку, що змінює форму частинок і наближає її до сферичної. Тобто отримано модельний порошок практично ізометричної форми, який складається із відносно твердого осердя і пластичного покриття. Тому, було цікаво перевірити основні теоретичні положення, що описують процеси деформації пористого тіла, як залежність щільності від тиску пресування на отриманому композиційному порошку.

На сьогодні немає універсальної залежності, що описує щільність як функцію від тиску, більшість відомих рівнянь передбачають введення певних припущень, що пов'язано із сукупністю основних фізичних явищ, які змінюються в процесі стискання порошкового тіла [4].

Графік залежності тиску пресування від щільності зображений на рисунку 2, який показує, що залізо плаковане міддю має більшу щільність пресовки, що може бути обумовлене більшою пластичністю міді. В процесі пресування на першому етапі відбувається пластична деформація міді, а потім починає деформуватися залізо. Враховуючи той факт, що більшість теоретичних рівнянь розраховані для однокомпонентних сумішей, спочатку варто розглянути емпіричне рівняння до яких належить рівняння пресування Куніна-Юрченко, яке має наступний вигляд [5]:

$$\gamma = \gamma_{np} - \frac{k_0}{\alpha} e^{-\alpha p} .$$

γ_{np} – умовна гранична щільність

α – коефіцієнт втрати стисливості, $\text{см}^2/\text{кг}$.

k_0 – початковий коефіцієнт пресування, $\text{г}/(\text{кг}\cdot\text{см})$.

Для початку потрібно визначити початкові константи a відповідно до графіка (рис. 2): У випадку коли графік функції починається від початкових умов, він змінюється та має вигляд параболічної функції, у попередньому випадку бралася тільки ділянка високого тиску. Тому залежність щільності від тиску було перебудовано. Коефіцієнти k_1, k_2, k_3 визначалися як дотичні до приведеної залежності, дані дотичні на графіку вказані штрих пунктирною лінією (рис. 2).

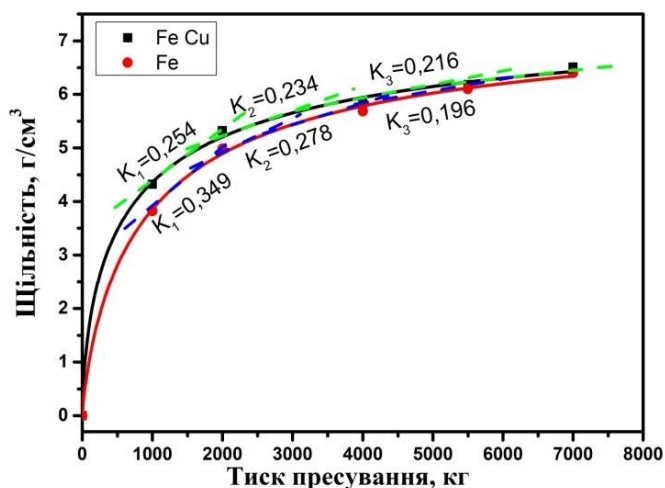


Рис. 2. Визначення констант за рівнянням Куніна-Юрченко для залізних і композиційних порошків

Надалі відповідно до теоретичної моделі визначаємо α побудувавши рівняння у відповідних координатах $Lg(K)-P$, графічна залежність представлена на рисунку 3. Використовуючи графік наведений на рисунку 3 та формулу визначали $\alpha = -1/K (dLgK/dP)$ тобто кут нахилу.

Аналізуючи представлені залежності, можна побачити, що в чистому залізі ми спостерігаємо дві характерні ділянки перегину, даний ефект може вказувати на зміну механізмів, які лежать в процесі ущільнення. Так, на початкових етапах (малих тисках) ми можемо спостерігати пластичну деформацію, яка переходить в об'ємне стиснення компактного тіла. Одна слід звернути увагу, що даних переходів ми не спостерігаємо при плакуванні, що може свідчити про те, що в процесі ущільнення лежить виключно пластична деформація. Тому, порівнявши теоретичні і практичні залежності наведені на рисунку 4, ми спостерігаємо деякі розбіжності.

Таким чином, ми бачимо, що потрібно переходити до рівнянь, які мають в своїй основі припущення та закони, яким підпорядковується система, одним із таких рівнянь є рівняння пресування по Бальшину I [6]:

$$\lg p = -L(\beta - 1) + \lg p_{\max}$$

де P_{\max} – тиск, відповідний максимальному ступеню ущільнення, коли $\beta=1$;

β – відносний об'єм пресовки;

L – чинник пресування.

Для вирішення даного рівняння потрібно знайти коефіцієнти L , β , $\lg P_{\max}$. Дану операцію можна провести побудувавши графік в координатах $Lg(P)-\beta$ який зображений на рисунку 5.

Як видно із отриманих результатів, у випадку чистого заліза ми отримали повний збіг результатів, для заліза плакованого міддю різниця між теорією і практикою не перевищує 10%, що може свідчити про доцільність використання даного методу. Однак для підвищення точності отриманих результатів доцільно провести розрахунки за II рівнянням Бальшина [6]:

$$\lg p + m \lg \beta = \lg p_{\max}$$

де m – показник пресування, приблизно постійний в значному інтервалі тиску

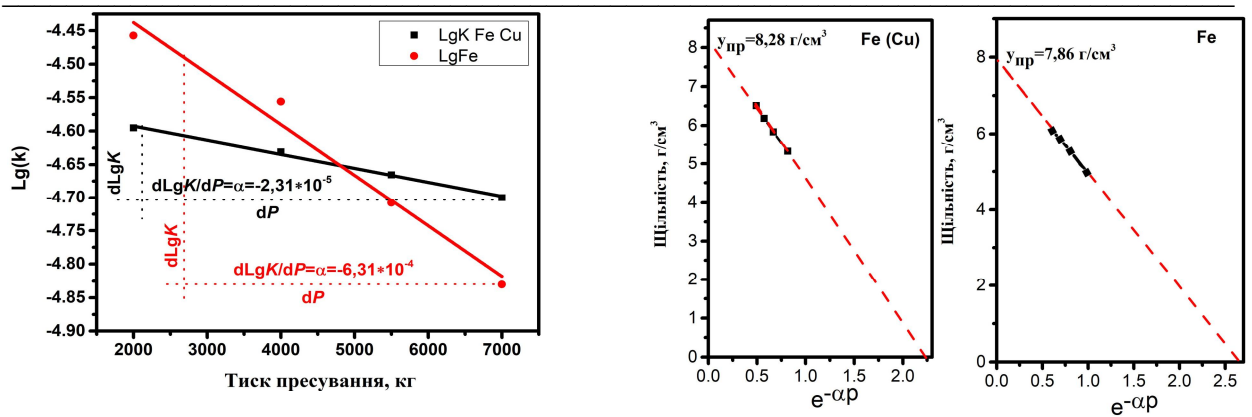


Рис. 3. Залежність $lg(K)-P$

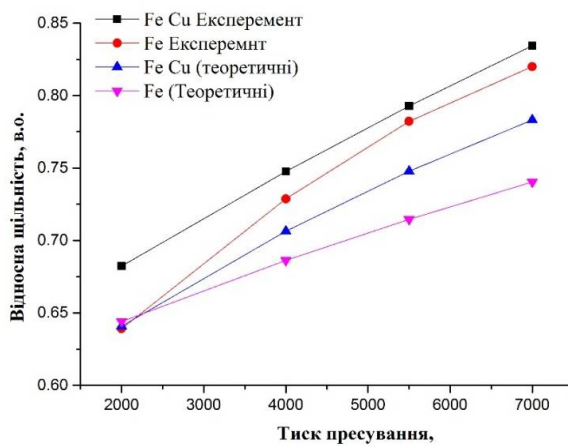


Рис. 4. Теоретичні і практичні залежності за Куніним-Юрченко

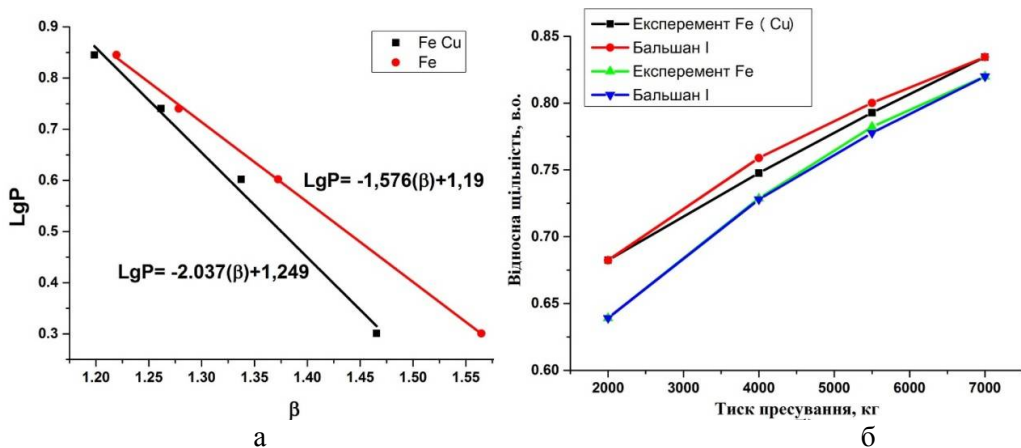


Рис. 5. Графічне розв’язання I рівняння Бальшина (а), та порівняння практичних даних із розрахунковими (б)

Дане рівняння розв’язується в координатах $Lg(P)-Lg(\beta)$, та визначається константа m (рис. 6).

Ще одним математичним рівнянням в якому враховуються контактні явища процесу пресування дискретної системи є рівняння Г.М. Ждановича, яке має наступний вигляд [7]:

$$\theta = \theta_0 \left[1 + (\beta_0^n - 1) \frac{P}{P_k} \right]^{\frac{1}{n}}$$

n – показник який залежить від механічних властивостей порошку;

P_k – максимальний тиск, при якому досягається 100 % щільність;

θ – відносна щільність пресовки.

У одному з випадку рівняння виводиться виходячи з рішення контактної задачі на підставі уявлень про деформаційний механізм ущільнення порошкового тіла. Вирішення рівняння в нашому випадку матиме наступну графічну залежність представлену на рисунку 7.

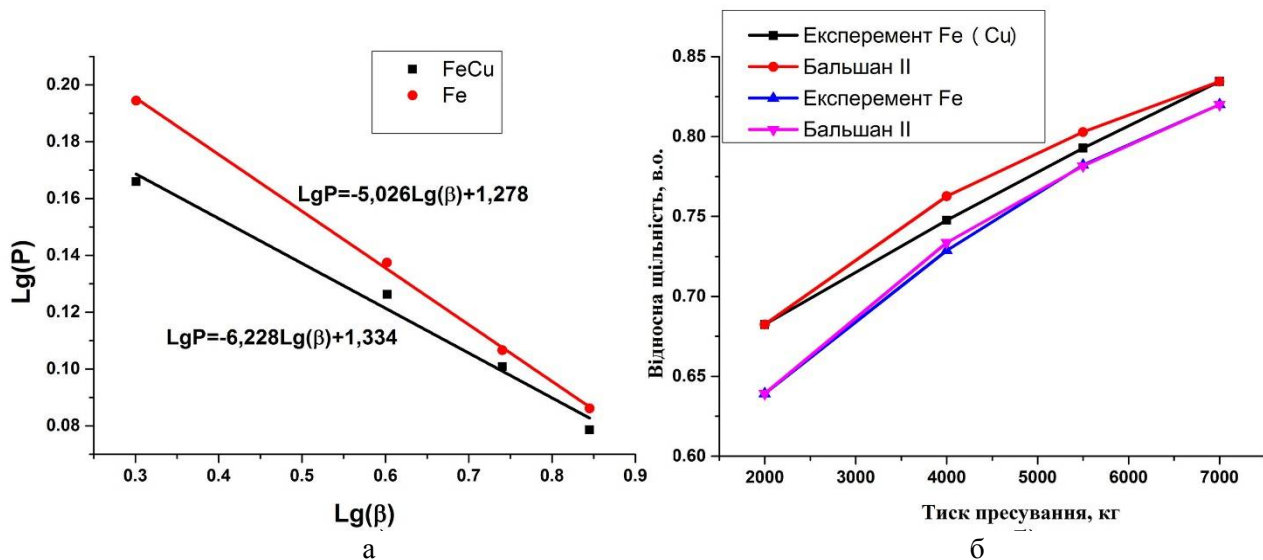


Рис. 6. Графічне розв'язання II рівняння Бальшина(а), та порівняння практичних даних із розрахунковими (б)

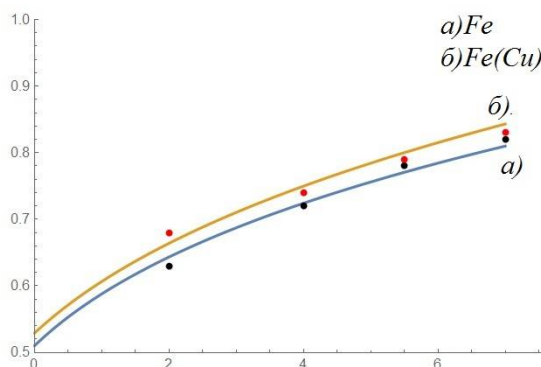


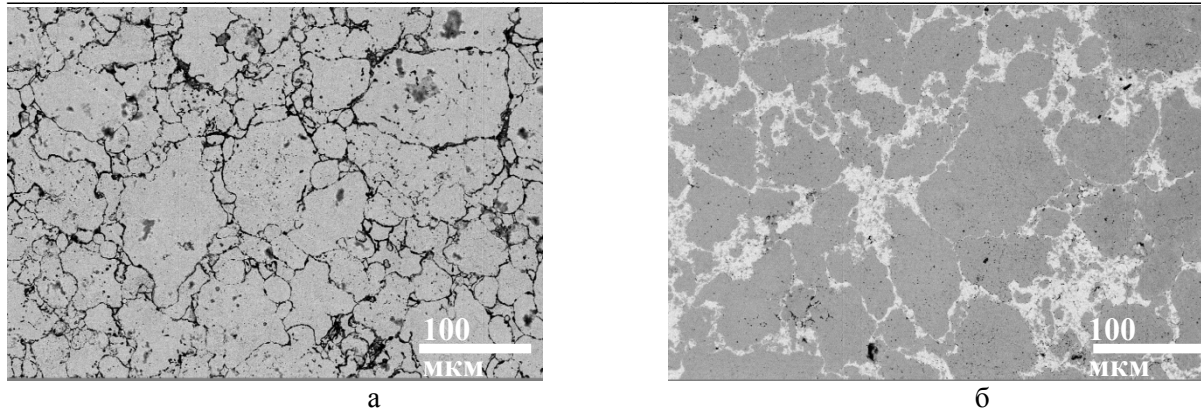
Рис. 7. Рівняння пресування за Ждановичем Г.М.

Отримані модельні параметри показують адекватність при всіх тисках пресування як для чистого заліза так і для заліза плакованого міддю (табл.1). Також слід відмітити, що як і при плакуванні в нас зменшується максимальний тиск P_k та показник n , які в свою чергу вказують на збільшення пластичності матеріалу.

Таблиця 1.

Параметри по рівнянню Ждановича

Матеріал	Θ_0	n	$P_{k,T}$
Fe	0,51	4	18
Fe(Cu)	0,529	3,7	14,5



а – залізо; б – залізо, плаковане міддю
Рис. 8. Мікроструктура спресованих матеріалів

У будь-якому випадку ми спостерігаємо, що процес ущільнення порошку залежить від багатьох параметрів, проте процес пресування плакованих порошків може бути схематично зображено наступним чином (рис. 9).

Тобто, фактично, в процесі деформації, мідь виступає як суцільний прошарок між частинками залізного порошку, тому розглядати дану систему слід з позиції суцільного континууму, і, відповідно, найбільш підходящим рівнянням є рівняння отримане Штерном М.Б., яке має наступний вигляд [8]:

$$p = p_{oc} + \mu \frac{H}{R} p_{\delta}$$

$$p_{oc} = \sigma_z = -\frac{2}{3} k \frac{(1-f)^{2/3}}{\sqrt{f}}$$

$$p_{\delta} = \sigma_R = \frac{2}{3} k \frac{(1-f)^{3/2}}{\sqrt{f}} \left(1 - \frac{3}{2} f\right)$$

де μ - коефіцієнт зовнішнього тертя;
 p_{δ} - бічний тиск;
 p_{oc} - осьовий тиск;
 f - пористість.

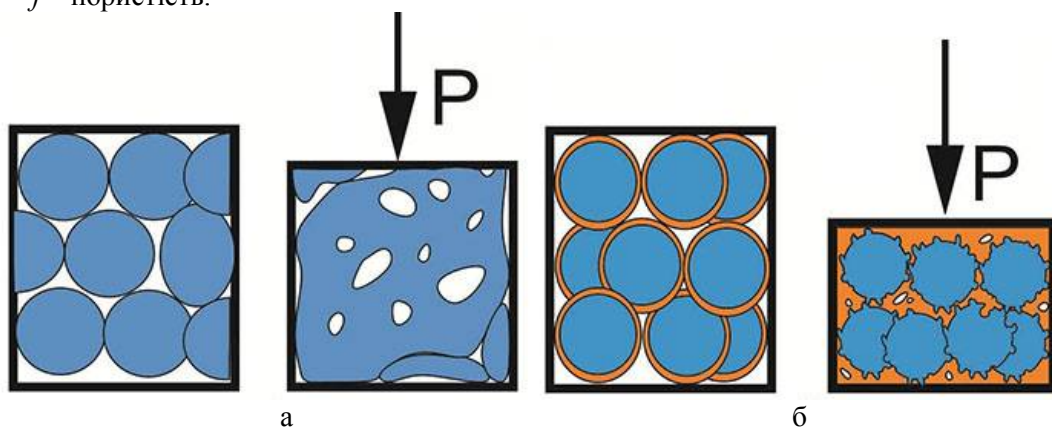


Рис. 9. Схема процесу ущільнення Fe (а), Fe/Cu (б)

У нашому випадку, коефіцієнт зовнішнього тертя був взятий 0,2 у випадку заліза по залізу та 0,53 у випадку заліза по міді. Розв'язавши рівняння ми отримали модельні залежності та порівняли їх з експериментальними, різниця між даними склала до 7 % що свідчить про адекватність моделі у нашому випадку (рис. 10).

У даному випадку на хід кривої впливає зміна параметру k , який в своє чергу є функцією від механічних властивостей порошку, а саме відповідає межі текучості матеріалу частинок порошку,

який визначається експериментально. В даному випадку цей коефіцієнт становить 2 та 3,5 для заліза та заліза плакованого міддю, відповідно.

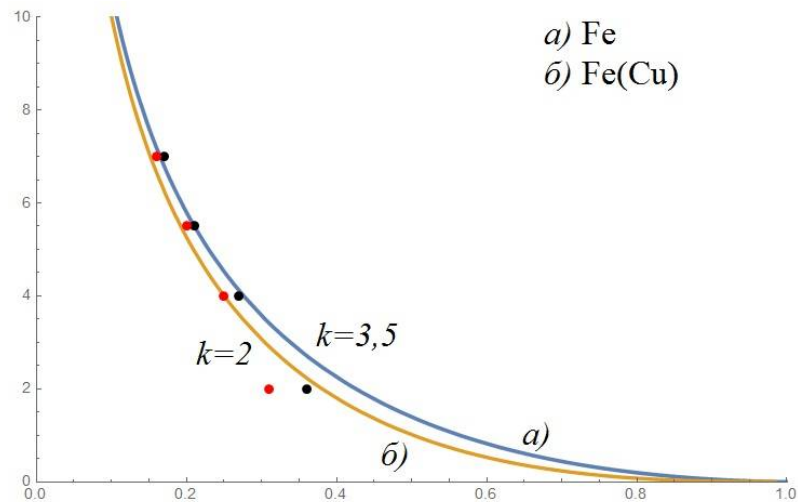


Рис. 10. Графічне розв'язання за Штерном М.Б.

Таким чином, встановлено, що характер ущільнення залізного порошку плакованого міддю відрізняється від ущільнення однокомпонентного залізного порошку, що обумовлено тим, що для композиційних порошків залізо – мідь переважають механізми пластичної деформації.

Висновки.

1. Проаналізовано процес ущільнення композиційних залізних порошків в умовах статичного пресування за допомогою математичних рівнянь, що описують залежності щільності від тиску пресування. Підтверджено, що характер ущільнення композиційних порошків відрізняється від ущільнення однокомпонентного залізного порошку, що обумовлено зміною пластичності поверхневого шару порошків при деформації.

2. Показано, що структура пресовок із композиційних залізних порошків, де мідь виступає пластичним прошарком, максимально наближена до суцільного континууму і коректно описується рівнянням, що базується на теорії суцільності середовища, що стискається.

Література

1. Гогаев К.А. Формование порошковых систем / К.А. Гогаев, А.К. Радченко; Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. – Донецк: Изд-во «Ноулидж», 2011. – 477 с.
2. Коцюба А.А. Порошковые материалы для авиационной и ракетно-космической техники / А.А. Коцюба, А.С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко, И.Г. Лавренко. – К.: КВИЦ, 2016. – 304 с.
3. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения. Справочник. / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысельский и др. Киев: Наук. Думка, 1985. – 624 с.
4. Анциферов В.Н., Перельман В.Е. Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов. М.: Издательский дом «Грааль», 2001. – 632 с.
5. Кунин И.А. Теория упругих сред с микроструктурой. Нелокальная теория упругости. М.: Наука, 1975. – 415 с.
6. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М.: Металлургия, 1972. – 336 с.
7. Жданович Г.М. Теория прессования металлических порошков. М. Металлургия, 1969. – 264 с.
8. Штерн М.Б., Сердюк Г.Г., Максименко Л.А. и др. Феноменологические теории прессования порошков. Киев: Наукова думка, 1982. - 140 с.