

Грибков Е. П.
Малигін С. О.
Бережна О. В.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІД ЧАС ВОЛОЧІННЯ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ З МЕТАЛЕВИМ СЕРДЕЧНИКОМ

На основі спільного рекурентного розв'язання скінченно-різницевої форми умови статичної рівноваги виділеного елементарного об'єму та умови пластичності порошкового середовища розроблено чисельну математичну модель напружено-деформованого стану, що враховує реальний характер розподілів геометричних параметрів, механічних властивостей і умов контактної тертя під час волочіння порошкового дроту з металевим сердечником. У рамках розглянутої математичної моделі напружено-деформованого стану під час волочіння порошкового дроту було прийнято, що поточні значення швидкості переміщення порошкового матеріалу, його механічні властивості і нормальні осьові напруження у межах кожного окремого поперечного перерізу залишаються величинами постійними по всій довжині вогнища деформації, зміни діаметрів, контактних напружень мають лінійний характер, кількісні оцінки дотичних напружень на поверхні контакту порошкової та монометалевої складових відповідають закону Амонтона-Кулона. За умови статистичної рівноваги відокремленого i -го елементарного об'єму порошкового матеріалу, з урахуванням кусочно-лінійної апроксимації, з урахуванням умови пластичності для порошкових матеріалів при осесиметричному навантаженні та впливу значення показника відносної щільності на значення коефіцієнтів, які враховують специфіку деформації порошкового композиту, отримані розрахунки співвідношення показників швидкостей пластичної деформації, головними напруженнями та співвідношення показників ступеня деформації. Розроблена математична модель дозволяє більш точно визначати геометричні та фізико-механічні характеристики отриманих виробів. Отримані залежності відносної щільності порошкового осердя в залежності від діаметру металевого сердечника, обтиснення та натягнення порошкового дроту, що дозволяють знайти раціональні значення цих технологічних параметрів при проектуванні технологічних режимів волочіння.

Ключові слова: моделювання, напружено-деформований стан, порошковий дріт з металевим сердечником, волочіння, умова пластичності для пористих матеріалів, натягнення, пластична деформація, режими обтиснення.

Якість зварювального шва залежить від безлічі чинників, включно з характеристиками електрода - порошкового дроту, які визначаються на етапі його виробництва. Для виготовлення таких електродів спочатку формується дріт шляхом згинання металевий стрічки із заповненням порошком. Параметри обтиснення під час волочіння визначаються необхідними характеристиками електрода: діаметром, товщиною оболонки та щільністю сердечника [1]. Порошковий дріт, який представляє собою порошковий сердечник у металевій оболонці, може використовуватися як кінцевий продукт під час зварювання та легування рідкої сталі, так і заготовлею для виготовлення порошкових стрічок [2].

Процес ущільнення порошкового дроту під час волочіння є динамічним і змінюється з кожним проходом. У перших п'яти проходах матеріал порошку в центрі дроту спочатку розпушується через вплив тиску та деформації. Однак, починаючи з шостого проходу, відбувається процес ущільнення. Це може бути пов'язано з тим, що при досягненні певного рівня деформації структура матеріалу починає адаптуватися до нових умов, що призводить до ущільнення. Було встановлено, що під час волочіння по маршруту з шести проходів з коефіцієнтом обтиснення 8 – 14 % відбувається постійне ущільнення матеріалу оболонки. У той же час, матеріал порошку в центрі дроту спочатку розширюється, а потім після шостого проходу починає ущільнюватися. [3]. Також важливо відзначити, що кількість проходів та коефіцієнт обтиснення можуть варіюватися в залежності від властивостей конкретного матеріалу та вимог до кінцевого продукту. У роботі [4] на основі моделі пружно-пластичного деформування ізотропних пористих матеріалів, що характеризуються різним опором при стисі та розтязі, за допомогою комп'ютерного моделювання досліджено процес ущільнення сердечника порошкового дроту під час його волочіння і встановлена залежність характеру ущільнення порошкового сердечника від початкової пористості та частки плоских дефектів.

Волочіння забезпечує високу продуктивність і точність виготовлення електродів, дає змогу створювати різні конструкції оболонок і змінювати кількість переділів. Ці переваги знижують вартість виробництва порошкових електродів. Однак, не завжди можна досягти необхідної ущільненості сердечника в оболонці під час волочіння, особливо коли сердечник містить тверді та великі частинки [5].

Таким чином, вивчення напружень і деформацій у вогнищі деформації дасть змогу оптимізувати процес волочіння, поліпшити структурні та механічні властивості порошкового дроту, знизити ймовірність дефектів і підвищити ефективність виробництва. У результаті будуть досягнуті економічні вигоди та підвищення конкурентоспроможності продукції на ринку.

Для визначення напружено-деформованого стану спільної деформації порошкової оболонки та металевго осердя під час волочіння порошкового дроту необхідно розглянути скінченно-елементну модель цього процесу, яка дасть змогу розрахувати деформації, напруження та інші характеристики процесу залежно від різних умов і параметрів.

Метою роботи є розробка математичної моделі напружено-деформованого стану під час волочіння порошкового дроту з металевим сердечником, що дасть змогу прогнозувати оптимальні технологічні параметри, оптимізувати процес волочіння та отримати потрібні характеристики порошкового дроту.

Розрахункова схема інтегрального осередку деформації процесу волочіння порошкового дроту містить у собі фільтру 1, монометалеву оболонку 2 із зовнішніми та внутрішніми діаметрами в її початковому D_0 , d_0 і результуючому D_1 , d_1 станах, а також власне порошкову складову 3, представлена на рис. 1,а. При цьому в першому наближенні, нехтуючи опором порошкового середовища 3 його ущільненню, пластичну деформацію оболонки 2 можна вважати такою, що відповідає процесу безопорного волочіння труб, досить докладно вивченому в роботі [6] та інших.

Дотримуючись методик вищеназваних робіт, результуюче значення діаметра внутрішньої поверхні деформованої оболонки d_1 можна вважати відомим, зважаючи на що поточне за довжиною вогнища деформації значення діаметра тієї самої поверхні d_x може бути виражене на основі степеневі залежності вигляду:

$$d_x = d_1 + (d_0 - d_1) \left(\frac{x}{L} \right)^{aa}, \quad (1)$$

де x - геометрична координата, що є паралельною осі волочіння і має свій початок на виході з вогнища деформації (див. рис. 1,а);

L - загальна протяжність осередку деформації, яка визначається, як і в разі традиційних технологічних схем волочіння [6], на основі відомої геометрії волочильного каналу фільтру і заданих значень діаметрів D_0 , D_1 ;

aa - степеневий показник, що враховує реальну форму поверхні контакту оболонки з порошковим матеріалом.

З урахуванням відомих геометричних характеристик інтегрального осередку деформації подальше математичне моделювання полягало в розбивці його протяжності l на скінченну множину n елементарних об'ємів a , b , c , d (див. рис. 1) [7], які мають порядкові номери $i = 1 \dots n$, а також геометричні координати початкового cd (x_{1i}) і кінцевого ab (x_{2i}) граничних перерізів, що відповідають:

$$x_{1i} = l - \Delta x(i - 1) \quad x_{2i} = x_{1i} - \Delta x = l - \Delta x_i, \quad (2)$$

де $\Delta x = l/n$ - крок розбиття всієї протяжності вогнища деформації.

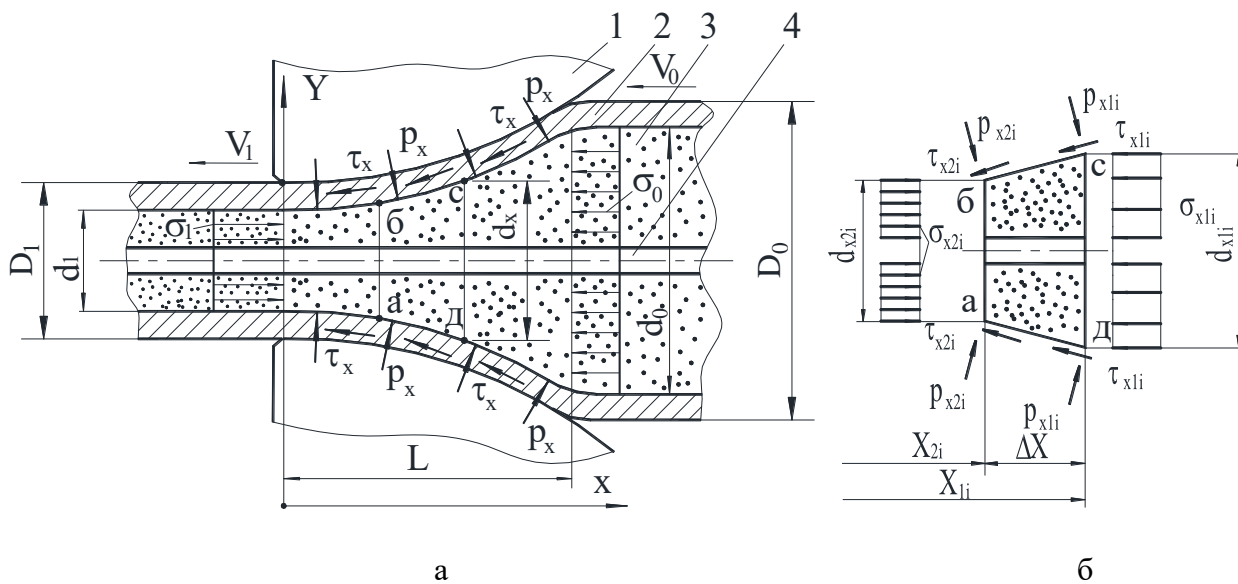


Рис. 1. Розрахункова схема інтегрального вогнища деформації (а) і виділеного елементарного об'єму (б) під час волочіння порошкового дроту

Крім апроксимації геометричних параметрів поверхні контакту порошкового матеріалу і монометалевої оболонки залежністю (1), у рамках розглянутої математичної моделі напружено-деформованого стану під час волочіння порошкового дроту було прийнято ще низку припущень, основними з яких є такі [8]:

- змінюючись по довжині вогнища деформації, поточні значення швидкості переміщення порошкового матеріалу, показники його механічних властивостей і нормальні осьові напруження σ_x у межах кожного окремого поперечного перерізу залишаються величинами постійними;

- зміни діаметрів $d_{x1i} \dots d_{x2i}$, а також нормальних $P_{x1i} \dots P_{x2i}$ і дотичних $\tau_{x1i} \dots \tau_{x2i}$ контактних напружень у межах кожного i -го елементарного об'єму порошкового матеріалу мають лінійний характер.

Унаслідок рівності швидкостей переміщення порошкової та монометалевої складових тільки в перерізі на виході з вогнища деформації дотичні напруження на поверхні їхнього контакту τ_x спрямовані впродовж ходу процесу волочіння, водночас кількісні оцінки таких напружень відповідають закону Амонтона-Кулона:

$$\tau_x = p_x f_x,$$

а аналітичний опис поточних значень коефіцієнтів зовнішнь:

$$f_x = f_1 + (f_0 + f_1) \left(\frac{x}{l} \right)^{a_f}, \tag{3}$$

де f_0, f_1 - опорні значення коефіцієнтів зовнішнього тертя в перерізах на вході та виході з осередку деформації;

a_f - степеневий показник, що визначає характер розподілу коефіцієнтів зовнішнього тертя по довжині вогнища деформації.

Дотримуючись прийнятих припущень і виразивши компоненти напружено-деформованого стану в їхньому скінченно-різницевому вигляді, як це показано на рис. 1,б, умову статистичної рівноваги відокремленого i -го елементарного об'єму порошкового матеріалу $abcd$ за проектування всіх сил на вісь x можна представити у вигляді [9]:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= \frac{\pi\sigma_{x2i}(d_{x2i}^2 - d_c^2)}{4} - \frac{\pi\sigma_{x1i}(d_{x1i}^2 - d_c^2)}{4} + \int_{x_{2i}}^{x_{1i}} \left[p_{x2i} + (p_{x1i} - p_{x2i}) \left(\frac{x - x_{2i}}{\Delta x} \right) \right] \times \\ &\times \left[d_{x2i} + (d_{x1i} - d_{x2i}) \left(\frac{x - x_{2i}}{\Delta x} \right) \right] \frac{\sin \alpha_{xi}}{\cos \alpha_{xi}} dx - \int_{x_{2i}}^{x_{1i}} [P_{x2i} f_{x2i} + (P_{x1i} f_{x1i} - P_{x2i} f_{x2i}) \left(\frac{x - x_{2i}}{\Delta x} \right)] \times \\ &\times [d_{x2i} + (d_{x1i} - d_{x2i}) \left(\frac{x - x_{2i}}{\Delta x} \right)] dx + \int_{x_{2i}}^{x_{1i}} (P_{x1i} + P_{x2i}) f_c d_c dx = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де позитивні значення нормальних осьових напружень σ_x відповідають напруженням стиснення, а цифровий індекс 1 свідчить про приналежність цієї компоненти до правого початкового cd , тоді як цифровий індекс 2 - про приналежність до лівого кінцевого ab граничного перерізу виділеного i -го елементарного об'єму (див. рис. 1,б);

α_{xi} - поточне значення кута контакту порошкової та монометалевої складових деформованої композиції.

З урахуванням кусочно-лінійної апроксимації:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= \frac{\sigma_{x2i}(d_{x2i}^2 - d_c^2)}{4} - \frac{\sigma_{x1i}(d_{x1i}^2 - d_c^2)}{4} + \frac{p_{x1i} + p_{x2i}}{4} (d_{x1i} + d_{x2i})(d_{x1i} - d_{x2i}) - \\ &- \frac{p_{x1i} f_{x1i} + p_{x2i} f_{x2i}}{4} \Delta x (d_{x1i} + d_{x2i}) - \frac{p_{x1i} + p_{x2i}}{4} f_c \Delta x d_c = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Після інтегрування та подальших математичних перетворень, а також з урахуванням умови пластичності для порошкових матеріалів при осесиметричному навантаженні [8]:

$$\alpha_x = P_x \frac{1 - 2\alpha}{1 + \alpha} \pm \sqrt{\frac{\beta \sigma_{sx}^2}{1 + \alpha} - P_x^2 \frac{9\alpha}{(1 + \alpha)^2}}, \quad (6)$$

де σ_{sx} - поточне значення межі плинності твердої фази порошкової композиції даного складу, рівняння (4) можна представити як:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= \frac{\left(\frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} p_{xc2i} - \sqrt{p_{xc2i}^2 \frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} \left[\frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} - 1 \right]} + \frac{1}{1 + \alpha_{x2i}} \beta_{x2i} \sigma_{sx2i}^2 \right) (d_{x2i}^2 - d_{on}^2)}{4} - \\ &- \frac{\sigma_{x1i}(d_{x1i}^2 - d_c^2)}{4} + \frac{p_{x1i} + p_{x2i}}{4} (d_{x1i} + d_{x2i})(d_{x1i} - d_{x2i}) - \\ &- \frac{p_{x1i} f_{x1i} + p_{x2i} f_{x2i}}{4} \Delta x (d_{x1i} + d_{x2i}) - \frac{p_{x1i} + p_{x2i}}{4} f_c \Delta x d_c = 0. \end{aligned}$$

Ввівши позначення, такі що α_x, β_x - поточні по довжині вогнища деформації значення коефіцієнтів, які враховують специфіку деформації саме порошкового середовища і визначаються залежно від поточного значення показника відносної щільності γ_x як [4], отримуємо:

$$\alpha_x = a_a (1 - \gamma_x)^{\tilde{m}_a}; \beta_x = \gamma_x^{2n_a},$$

де a_a, \tilde{m}_a, n_a - постійні для кожного конкретного складу значення коефіцієнтів, що характеризують інтенсивність зміни α_x і β_x залежно від зміни показника відносної щільності γ_x .

Виходячи з аналізу структури рівняння (6), можна дійти висновку, що за відомих згідно з використовуваною рекурентною схемою розв'язування значень геометричних і силових характеристик для правого початкового граничного перетину cd , отриманих на основі результатів розрахунку попереднього ($i-1$) елементарного об'єму, а також за відомих відповідно до

(1)-(3) значень діаметра d_{x2i} й коефіцієнта зовнішнього тертя f_{x2i} для лівого кінцевого граничного перерізу ab дане рівняння містить лише одну невідому величину, а саме нормальні контактні напруження p_{x2i} , по відношенню до яких в остаточному вигляді маємо

$$p_{x2i} = \frac{AN \pm B\sqrt{(A^2M + CN^2 - B^2CM)}}{A^2 - B^2C}, \quad (7)$$

де A, B, C, M, N - допоміжні параметри, що використовуються для спрощення запису і відповідають:

$$A = \frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} (d_{x2i}^2 - d_c^2) + (d_{x1i}^2 - d_{\sigma2i}^2) - f_{x2i}\Delta x(d_{x1i} + d_{x2i}) - f_c\Delta x d_c;$$

$$B = d_{x2i}^2 - d_c^2; \quad C = \frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} \left(\frac{1 - 2\alpha_{x2i}}{1 + 4\alpha_{x2i}} - 1 \right); \quad M = \frac{1}{1 + \alpha_{x2i}} \beta_x \sigma_{sx2i}^2;$$

$$N = (\sigma_{x1i}(d_{x1i}^2 - d_c^2) + p_{x1i}(d_{x1i}^2 - d_{\sigma2i}^2) - p_{x1i}f_{x1i}\Delta x(d_{x1i} + d_{x2i}) - p_{x1i}f_c\Delta x d_c)$$

З урахуванням відомих згідно з (6) і (7) значень нормальних осьових і нормальних контактних напружень може бути визначено і поточне значення відносної щільності порошкового матеріалу, знання якого необхідне для коректного врахування реального характеру розподілу коефіцієнтів і по довжині осередку деформації.

Так, скориставшись залежностями між головними швидкостями пластичної деформації та головними напруженнями, що їх надає теорія течії пористих матеріалів [10], співвідношення швидкостей, а разом із цим і співвідношення показників відповідних деформацій $\varepsilon_d / \varepsilon_l$ може бути визначено як:

$$\frac{\varepsilon_{1x}}{\varepsilon_{3x}} = \frac{\sigma_{1x} - (1 - 2\alpha_x)(\sigma_{1x} + \sigma_{2x} + \sigma_{3x})/3}{\sigma_{3x} - (1 - 2\alpha_x)(\sigma_{1x} + \sigma_{2x} + \sigma_{3x})/3}, \quad (8)$$

де з огляду на те, що стосовно розглянутої осесиметричної схеми навантаження в силу прийнятих допускень має місце виконання співвідношень

$$\varepsilon_{2x} = \varepsilon_{3x} = \varepsilon_{dx}; \quad \varepsilon_{1x} = \varepsilon_{lx}; \quad \sigma_{2x} = \sigma_{3x} = p_x; \quad \sigma_{1x} = \sigma_x,$$

шукана величина співвідношення показників ступеня деформації $\varepsilon_l / \varepsilon_d$ може бути виражена залежністю такого вигляду:

$$\frac{\varepsilon_{lx}}{\varepsilon_{dx}} = \frac{\sigma_x - (1 - 2\alpha) \frac{\sigma_x + 2P_x}{3}}{P_x - (1 - 2\alpha) \frac{\sigma_x + 2P_x}{3}} = \frac{3\sigma_x - (1 - 2\alpha)(\sigma_x + 2P_x)}{3P_x - (1 - 2\alpha)(\sigma_x + 2P_x)}, \quad (9)$$

Дотримуючись залежності (9) може бути визначено показник ступеня деформації ε_{lx2i} :

$$\varepsilon_{dx} = \ln \frac{d_{x1i}^2}{d_{x2i}^2}; \quad \varepsilon_l = -2\varepsilon_d \frac{3\sigma_{xi2} - (1 - 2\alpha)(\sigma_{xi2} + 2P_{xi2})}{3P_x - (1 - 2\alpha)(\sigma_{xi2} + 2P_{xi2})}, \quad (10)$$

З урахуванням чого результуюча в рамках кожного окремого i -го елементарного об'єму відносна щільність порошкового матеріалу відповідатиме:

$$\gamma_{xi2} = \gamma_{xi1} \frac{d_{xi1}^2}{d_{xi2}^2 \exp \varepsilon' e}.$$

Тут слід вказати на те, що за суворої математичної постановки спільне розв'язання рівнянь (6)-(10) є досить громіздким. Тому в межах цієї математичної моделі, що ґрунтується на чисельному рекурентному підході, під час обчислення коефіцієнтів α_{x2i} та β_{x2i} використовували значення відносної щільності γ_{x1i} , що відповідає початковому граничному перерізу кожного окремого виділеного елементарного об'єму [11].

Як векторну спрямованість рекурентного розв'язку використовували напрямок власне процесу волочіння з урахуванням чого початкові умови зв'язку під час переходу від розрахунку i -го до розрахунку $(i+1)$ елементарного об'єму відповідали:

$$x_{1i}|_{i=1} = l; d_{x1i}|_{i=1} = d_0; f_{x1i}|_{i=1} = f_0; \sigma_{x1i}|_{i=1} = \sigma_0; p_{x1i}|_{i=1} = 0; \gamma_{x1i}|_{i=1} = \gamma_0 \quad (11)$$

$$x_{1(i+1)} = x_{2i}; d_{x1(i+1)} = d_{x2i}; f_{x1(i+1)} = f_{x2i}; \sigma_{x1(i+1)} = \sigma_{x2i};$$

$$p_{x1(i+1)} = p_{x2i}; \gamma_{x1(i+1)} = \gamma_{x2i} , \quad (12)$$

де σ_0 - напруження заднього підпору;

γ_0 - показник вихідної відносної щільності.

Як приклад реалізації розробленої математичної моделі на Рис. 2 і Рис. 3 наведено розрахункові розподіли залежності відносної щільності порошкового матеріалу від діаметра металевго сердечника і залежності кінцевої відносної щільності та необхідного натяжіння від обтискання порошкового дроту.

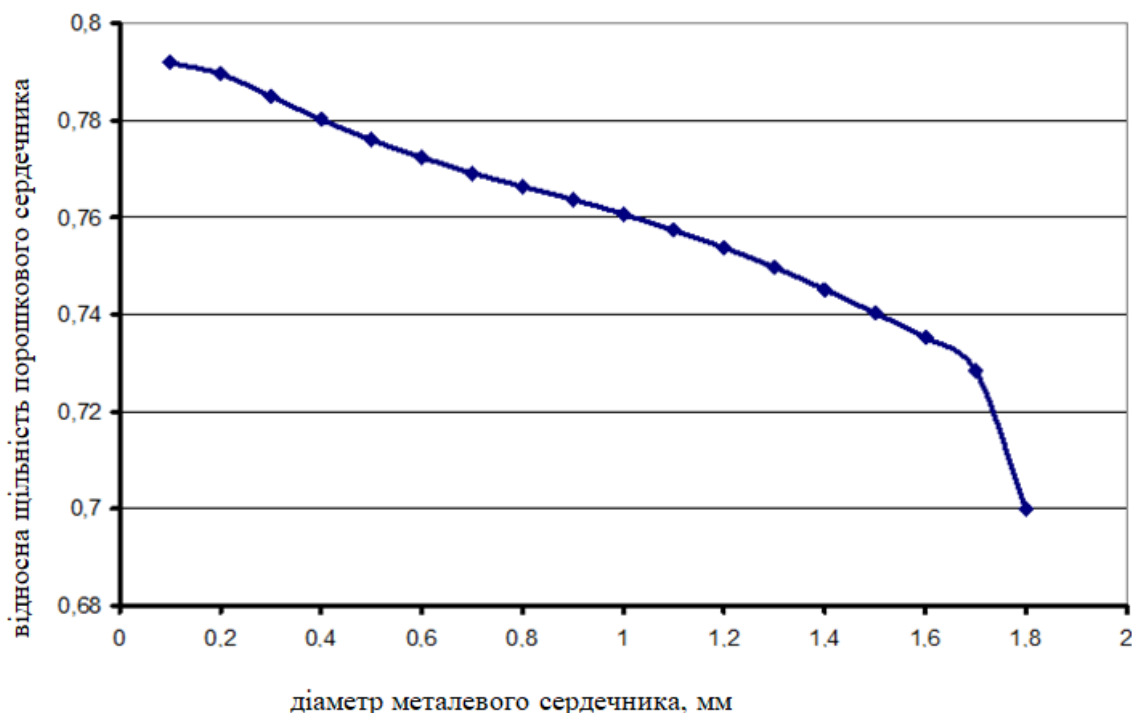


Рис. 2. Розподіл залежності відносної щільності порошкового матеріалу від діаметра металевго сердечника

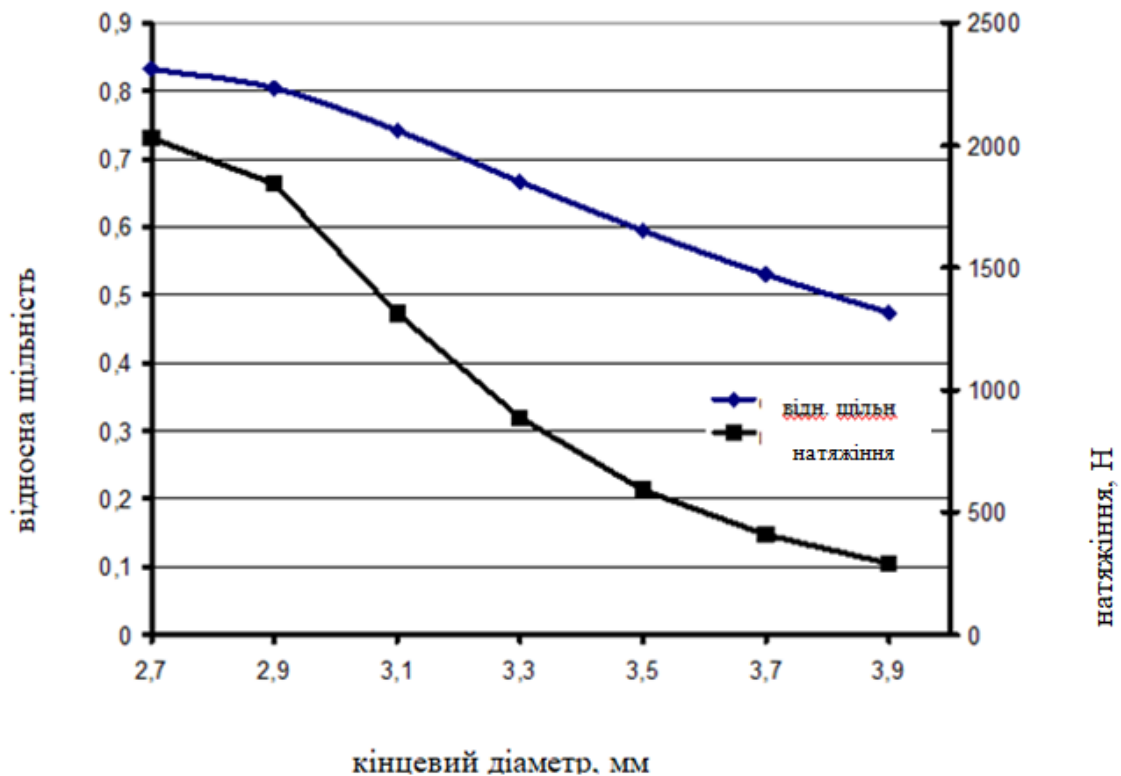


Рис. 3. Розподіл залежності кінцевої відносної щільності порошкового матеріалу та необхідного натяжіння від обтискання порошкового дроту

Загалом, залежності (1)-(12) послужили основою чисельної детермінованої математичної моделі напружено-деформованого стану під час реалізації процесу волочіння порошкового дроту, яка, своєю чергою, була використана як цільова функція під час імітаційного моделювання, а також під час розроблення програмних засобів для автоматизованого проєктування технологій і устаткування цього процесу.

ВИСНОВКИ

В ході теоретичного аналізу було виявлено вплив матеріалу та товщини оболонки на геометричні параметри зони деформації, а також вплив діаметру металевго сердечника на зміну області пластичної деформації та щільності порошкового матеріалу. Було визначено розподіл нормальних контактних напружень та відносної щільності вздовж зони деформації при різних ступенях обтиснення. Було проведено обчислення складових сил волочіння при деформації порошкового матеріалу та металевго сердечника.

Аналіз представлених результатів показав таке. Зі збільшенням натяжіння під час обтиску відносна щільність порошкового матеріалу змінюється, особливо за великих рівнів обтисків, коли відбувається потоншення оболонки, спостерігається перерозподіл епюри напружень уздовж вогнища деформацій (рис. 1, а). За малих обтиснень порошкового дроту пластична деформація матеріалу оболонки відбувається за рахунок витяжки, а порошкової композиції, як і металевго сердечника, - за рахунок пресування, за умови збільшення обтиснення спостерігається потоншення стінки оболонки, причому порошок і металевий сердечник в цьому разі практично не деформуються (рис. 1, б). Зі збільшенням сили натяжіння під час волочіння відносна щільність порошкового сердечника незначно збільшується, при цьому кінцевий діаметр металевго сердечника зменшується на 30 % (рис. 3), що не припустимо. Очевидно, що підвищення ступеня натяжіння при волочінні призведе до деформації оболонки і порушення форми.

На основі реалізації скінченно-різницевої моделі процесу волочіння порошкового дроту з металевим сердечником сформульовано критерії оптимізації, які дають змогу прогнозувати раціональні технологічні параметри, оптимізувати процес волочіння та отримати потрібні характеристики порошкового дроту з металевим сердечником. Також при цьому вирішується задача з вибору раціональних параметрів з матеріалу та товщини металевої оболонки та діаметру металевого сердечника.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Штерн М. Б., Ткаченко Л. Н., Кіркова О. Г., Кузьмов А. В., Майданюк О. П. До питання оптимізації режимів волочіння порошкового дроту. *Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві*. Київ: ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України, 2009. № 11. С. 111–117.
2. Шлепаков В. Н., Гаврилюк Ю. А., Котельчук А. С. Современное состояние разработки и применение порошковых проволок для сварки углеродистых и низколегированных сталей. *Автоматическая сварка*. 2010. № 3 (683). С. 46–51.
3. Ткаченко Л. Н., Кіркова О. Г., Кузьмов А. В., Штерн М. Б. Дослідження процесу ущільнення порошкового осердя під час волочіння порошкового дроту на основі моделі пластичного деформування пористих матеріалів. *Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві*. Київ : ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України, 2012. № 14. С. 116–122
4. Kirkova E. G., Tkachenko L. N., Kuz'mov A. V., Shtern M. B., Maidanyuk A. P. Simulation of Powder-Cored Wire Drawing. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2013. № 52 (7). pp. 393–400. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-013-9539-1>
5. Грибков Е. П., Різак П. І., Малигін С. О. Скінченно-елементне моделювання напруженодеформованого стану під час волочіння заготовки трубчастої форми з порошковим осердям. *Науковий Вісник ДДМА*. 2017. № 3 (24Е). С. 4–9. [URL:http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963\(24%D0%95\)2017/article/3.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963(24%D0%95)2017/article/3.pdf) (дата звернення: 21.10.2017).
6. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. Москва: *Металлургия*, 1971. 448с.
7. Грибков Э. П., Серов И. В. Моделирование процесса изготовления сварочной порошковой проволоки. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали третьої міжнародної науково-технічної конференції ; під заг. ред. В.Д. Ковальова*. Краматорськ : ДДМА, 2005. С. 22.
8. Chigarev V. V., Gavrish P. A., Gribkov E.P. Investigation of the process of drawing flux-cored wire for welding copper to steel. *Welding International*, № 26(9), 2012. pp. 718-722. ISSN 0950-7116 (Print), 1754-2138 (Online). DOI:10.1080/09507116.2011.653152.
9. Гринь А. Г., Грибков Э. П., Свиридов А. В., Бойко И. А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении порошковой проволоки. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр.* Краматорськ : ДДМА, 2007. С. 522–527.
10. Волкогон Г. М., Дмитриев А. М., Добряков Е. П. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудование. Москва: *Машиностроение*, 1991. 320 с.
11. Грибков Э. П., Бережная Е. В., Данилюк В. А., Махмудов К. Д. Математическое моделирование напряжений и деформаций при реализации процесса плющения порошковой проволоки для электродотактной наплавки. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА, 2012. № 1(30). С. 61–64.

REFERENCES

1. Stern M. B., Tkachenko L. N., Kirkova O. G., Kuzmov A. V. To the issue of optimisation of the modes of drawing cored wire. *Mathematical models and computational experiment in materials science*. Kyiv: IPM named after I. M. Frantzevych of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2009. № 11. pp. 111-117.
2. Shlepakov V. N., Gavrilyuk Y. A., Kotelchuk A. S. The current state of development and application of flux-cored wires for welding carbon and low-alloy steels. *Automatic welding*. 2010. № 3 (683). pp. 46-51. (in Russian).
3. Tkachenko L.N., Kirkova O.G., Kuzmov A.V., Stern M.B. Study of the process of compaction of the powder core during drawing of powder wire on the basis of the model of plastic deformation of porous materials. *Mathematical models and computational experiment in materials science*. Kyiv: I.M. Frantzevych Institute of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2012. № 14. pp. 116-122.
5. Gribkov E. P., Rizak P. I., Malygin S. O. Finite-element modelling of the stress-strain state during drawing of a tubular billet with a powder core. *Scientific Bulletin of the DSEA*, 2017. № 3 (24E). pp. 4-9. [URL:http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963\(24%D0%95\)2017/article/3.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963(24%D0%95)2017/article/3.pdf) (in Russian).
6. Perlin I.L., Ermanok M.Z. Theory of drawing. Moscow: *Metallurgiya*, 1971. 448 p.
7. Gribkov E.P., Serov I. V. Modelling of the process of welding flux-cored wire manufacturing. Heavy engineering. *Problems and prospects of development : materials of the third international scientific and technical conference; edited by V.D. Kovalev*. Kramatorsk: DSEA, 2005. pp. 22. (in Russian).

8. Chigarev V. V., Gavrish P. A., Gribkov E.P. Investigation of the process of drawing flux-cored wire for welding copper to steel. *Welding International*, № 26(9), 2012. pp. 718-722. ISSN 0950-7116 (Print), 1754-2138 (Online). DOI:10.1080/09507116.2011.653152.

9. Grin A. G., Gribkov E. P., Sviridov A. V., Boiko I. A. Mathematical modelling of stress-strain state during drawing of cored wire. *Improvement of the processes and equipment of machining by pressing in metallurgy and machine-building : a collection of scientific articles*. Kramatorsk : DSEA, 2007. pp. 522-527. (in Russian).

10. Volkogon G.M., Dmitriev A.M., Dobryakov E.P. Progressive technological processes of stamping of details from powders and equipment. Moscow: *Mashinostroenie*, 1991. 320 p.

11. Gribkov E. P., Berezhnaya E. B., Danilyuk V. A., Makhmudov K. D. Mathematical modelling of stresses and deformations at realization of the process of flattening of a powder wire for electric contact surfacing. *Materials processing by pressure*. Kramatorsk : DSEA, 2012. 1(30). pp. 61-64. (in Russian).

Gribkov E., Malyhin S., Berezhna O. Mathematical modelling of the stress-strain state during drawing of cored wire with a metal core.

On the basis of the joint recurrent solution of the finite-difference form of the condition of static equilibrium of the selected elementary volume and the condition of plasticity of the powder medium, a numerical mathematical model of the stress-strain state was developed, which takes into account the real nature of the distributions of geometric parameters, mechanical properties and contact friction conditions during drawing of a powder wire with a metal core. Within the framework of the considered mathematical model of the stress-strain state during drawing of cored wire, it was assumed that the current values of the speed of movement of the powder material, its mechanical properties and normal axial stresses within each individual cross-section remain constant along the entire length of the deformation focus, changes in diameters, contact stresses are linear, and quantitative estimates of tangential stresses on the contact surface of the powder and monometallic components correspond to Amonton's law Under the condition of statistical equilibrium of the separated i-th elementary volume of the powder material, taking into account the piecewise linear approximation, taking into account the condition of plasticity for powder materials under axisymmetric loading and the influence of the value of the relative density on the values of the coefficients that take into account the specifics of the deformation of the powder composite, calculations of the ratio of plastic deformation rates, principal stresses and the ratio of the degree of deformation were obtained. Calculations of the relative density of the powder material within each individual i-th elementary volume were also obtained. The obtained dependences of the relative density of the powder core depending on the diameter of the metal core, reduction and tension of the powder wire, which make it possible to find rational values of these technological parameters when designing the technological modes of drawing.

Key words: modeling, stress-strain state, powder wire with a metal core, drawing, condition of plasticity for porous materials, tension, plastic deformation, reduction modes

Грибков Едуард Петрович – д-р техн. наук, проф. МІП
Gribkov Eduard – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, MIP
E-mail: eduard.gribkov@mipolytech.education
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1565-6294>

Малигін Сергій Олегович – аспірант, ДДМА
Malygin Sergey – Graduate student, DSEA
E-mail: svmal5.sm@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6978-6107>

Бережна Олена Валеріївна – д-р техн. наук, доц., ДДМА
Berezhna Olena – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, DSEA
E-mail: elena.kassova07@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6205-1987>

МІП – ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя.
MIP – Technical University “Metinvest Polytechnic” LLC, Zaporizhzhia

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.

Стаття надійшла до редакції 10.08.24.