

УДК 621.762

О. І. ХОМЕНКО, канд. техн. наук, ст. наук. сотр., ІПМ НАНУ, Київ**Г. А. БАГЛЮК**, докт. техн. наук, зав. відділом ІПМ НАНУ, Київ**В. С. КУРІХІН**, провідний інж., аспірант, ІПМ НАНУ, Київ**УРАХУВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ШВИДКОСТІ ПЛИНУ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ В ЗАКРИТОМУ ШТАМПІ**

Розглянуто вплив радіальної складової швидкості плинину при моделюванні ущільнення порошкової заготовки в закритому штампі. Показано, що радіальна складова помітно впливає на характер ущільнення при достатньо великій початковій густині заготовки (порядку 50 %), що дає змогу при вивченні процесів ущільнення виробів складної форми користуватися багаточаровими моделями з плакованих порошків.

Ключові слова: порошковий матеріал, пресування, комп'ютерне моделювання, прямий варіаційний метод.

Більшість моделей ущільнення циліндричної пористої заготовки у жорсткому закритому штампі побудовано у припущенні про відсутність плинину матеріалу у радіальному напрямку. Це припущення зроблено внаслідок граничних умов нульової радіальної складової швидкості плинину на осі заготовки та на внутрішній поверхні матриці. Однак це не визначає нульової радіальної складової швидкості плинину в будь-якій іншій точці заготовки. Для коректного опису цієї складової потрібно спочатку розглянути випадок, коли матеріал явно рухається у радіальному напрямку, зокрема вільне осадження циліндричної заготовки.

Зазвичай при моделюванні вільного осадження циліндричної заготовки прямим варіаційним методом приймають лінійний закон плинину матеріалу в осьовому і радіальному напрямках [1]

$$\left. \begin{aligned} v_z &= -v_0 \frac{z}{h}; \\ v_r &= v_0 \frac{r}{h} a \nu; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де v_0 – швидкість переміщення робочого інструменту;

© Хоменко О. І., Баглюк Г. А., Куріхін В. С., 2012

ν - коефіцієнт Пуассона, $\nu = \frac{2-3\theta}{4-3\theta}$, де θ – пористість;

h - висота циліндра;

a - деякий параметр.

У цьому випадку обидві складові енергетичного функціоналу можна отримати у аналітичному вигляді. Проте така модель недостатньо добре відтворює зміну форми циліндричної заготовки – "бочкуватість". Квадратичний закон зміни радіальної складової швидкості плинину матеріалу краще відтворює більшу швидкість плинину у середньому перерізі заготовки, ніж на торцях, що приводить до характерної бочкуватості. Якщо обмежитися одним параметром, така модель призводить до нульової швидкості плинину на торцях, чого у дійсності не трапляється

$$\left. \begin{aligned} v_z &= -v_0 \frac{z}{h}; \\ v_r &= v_0 \frac{a_3 r \nu}{h} (1 + a_4 z (h - z)); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де a_3, a_4 - деякі параметри,

.Компоненти тензора деформації у цьому випадку можна записати у наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} e_r &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{a_3 v_0 r v (1 + a_4 z (h - z))}{h} \right) = \frac{a_3 v_0 v (1 + a_4 z (h - z))}{h}; \\ e_z &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{v_0}{h}; \\ e_\varphi &= \frac{v_r}{r} = \frac{a_3 v_0 v (1 + a_4 z (h - z))}{h}; \\ \gamma_{rz} &= \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} = \frac{a_3 a_4 v_0 v (h - 2z)}{h} \end{aligned} \right\} \cdot (3)$$

Інтенсивність деформації

$$H = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{(e_r - e_z)^2 + (e_z - e_\varphi)^2 + (e_r - e_\varphi)^2 + 6\gamma_{rz}^2}. \quad (4)$$

Складова варіаційного функціоналу, що визначається внутрішніми силами опору деформації, з урахуванням того, що елемент об'єму заготовки $dV = r dr dz d\varphi$, прийме наступний вигляд

$$J_1 = \iiint_V \sqrt{(e_r + e_\varphi + e_{iz})^2} f_1(\theta) + H_i^2 f_2(\theta) dV, \quad (5)$$

а складова, що зумовлена тертям на торцях,

$$J_2 = \sqrt{3}\mu \iint_{F_2} \sqrt{2f_2(\theta)v_r^2} dF, \quad (6)$$

де $f_1(\theta) = \frac{4(1-\theta)^4}{9\theta}$ і $f_2(\theta) = \frac{(1-\theta)^3}{3}$ - деякі функції пористості.

Задачу моделювання у цьому випадку доречно вирішувати чисельно. Подумки розіб'ємо переріз заготовки на прямокутні елементи, що утворюють ортогональну сітку. Будемо вважати пористість у межах комірки сітки постійною. Задамо значення швидкості робочого інструменту v_0 і обчислюватимемо інтеграли у виразах для J_1 і J_2 у фіксовані моменти часу Δt . Мінімізуючи суму $J_1 + J_2$ варіюванням параметрів a_3 і a_4 , розрахуватимемо положення вузлових точок сітки у означені моменти часу. Природно, що прямокутні комірки сітки будуть перетворюватися у довільні чотирикутники. Розрахунок закінчимо, коли буде досягнуто потрібного кінцевого значення висоти заготовки.

Для перевірки відповідності результатів моделювання провели експеримент з вільного осаджування циліндричної заготовки, виготовленої з залізного порошку пресуванням та подальшим спіканням (рис. 1а). Діаметр заготовки до деформації складав 10,5 мм, висота - 15,75 мм, об'єм 1363,795 мм³, маса 8.5 г. Оскільки маса суцільного залізного циліндру з такими ж розмірами дорівнювала б 10,638 г, відносна густина заготовки дорівнюватиме 0,8 або 80%, а пористість, відповідно, 0,2 або 20%.

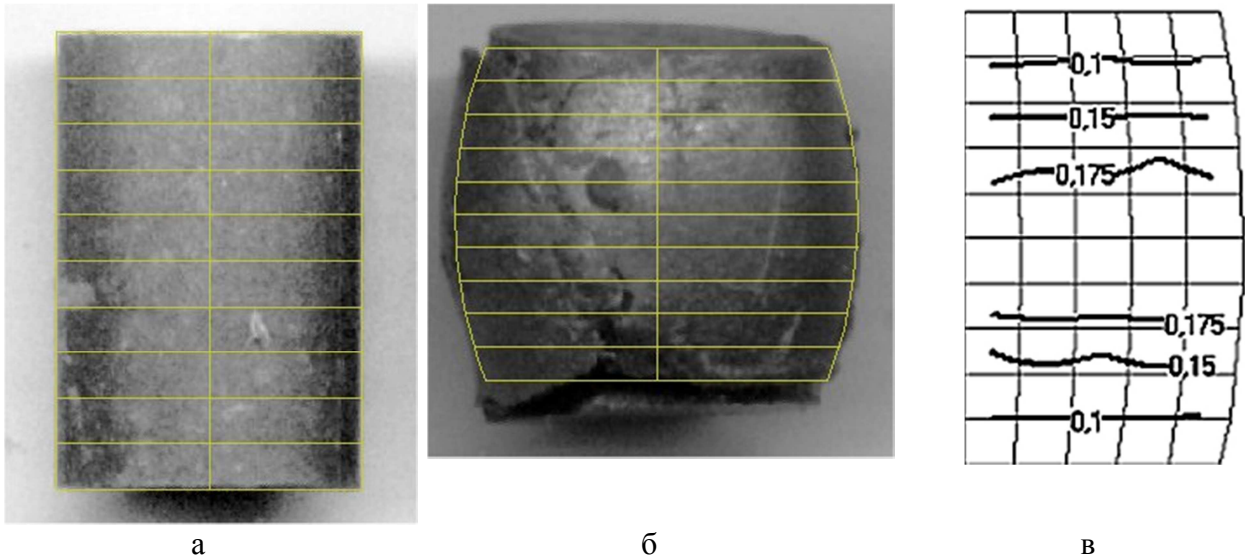


Рис 1 – Порошкова заготовка: а – до вільного осаджування, б – після вільного осаджування, в – лінії рівної пористості за результатами моделювання.

Після деформації заготовка набула характерної бочкуватої форми (рис. 1б). Її висота зменшилася до 10,5 мм, діаметри торців збільшилися до 10,8 мм, а об'єм склав $1211,445 \text{ мм}^3$. Оскільки об'єм було розраховано чисельним методом, то за рахунок заміни кривої ламаною слід було очікувати від'ємної похибки. Виходячи з закону збереження маси, нижня оцінка середньої інтегральної густини заготовки мала скласти 0,9 або 90%, відповідно середня інтегральна густина – 0,1 або 10%. За рахунок від'ємної похибки у визначенні об'єму реальне значення має бути дещо меншим.

Геометричні характеристики заготовки було розраховано за допомогою приведеної вище моделі. Максимальне значення похибки у визначенні координат точок зовнішнього контуру заготовки склало 8,7%, а середнє – 2,9 %, тобто модель задовільно відтворює зміни форми циліндричної заготовки при вільному осаджуванні. Розрахункове значення інтегральної пористості 14 %, з урахуванням зроблених зауважень, теж задовільно погоджується з результатом експерименту. Лінії рівної пористості, побудовані за результатами моделювання, показано на рис. 1 в.

Тепер спробуємо урахувати радіальну складову швидкості плинину матеріалу при ущільненні циліндричної порошкової заготовки у жорсткій закритій матриці за схемою двостороннього пресування (рис. 2).

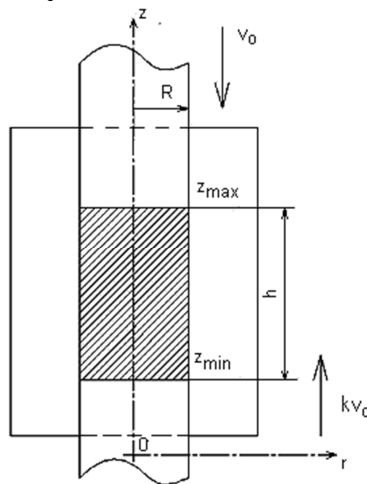


Рис. 2 – Схема ущільнення циліндричної заготовки у закритому штампі

Для того, щоб граничні умови не порушувалися, припустимо, що у межах $0 < r < R$, де R – радіус основи циліндричної заготовки, матеріал у радіальному напрямі рухається так, що

$$\left. \begin{aligned} v_r &= 0 \Big|_{r=0} \\ v_r &= 0 \Big|_{r=R} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Цим умовам задовольняє функція вигляду

$$f(r) = a_5 \left(\frac{R^2}{4} - \left(r - \frac{R}{2} \right)^2 \right), \quad (8)$$

де a_5 - деякий параметр.

Після розкриття дужок та приведення подібних функція приймає вигляд

$$f(r) = a_5 r(R - r). \quad (9)$$

Але ця функція не ураховує залежність радіальної складової швидкості плинину матеріалу від координати z та висоти заготовки, що у загальному випадку невірно. Тому радіальну складову швидкості плинину слід шукати, як добуток цієї функції на вираз для радіальної складової у системі (2), тобто як поліном третього ступеню відносно координати r

$$V_r = v_0 \frac{a_3 a_5 V}{h} r^2 (R - r) \cdot (1 + a_4 z(h - z)).$$

Добуток параметрів $a_3 a_5$ будемо розглядати як єдиний параметр a_3 . Оскільки при двобічному пресуванні висота циліндра весь час змінюється, доцільно записати її у явному вигляді $h = z_{\max} - z_{\min}$, де z_{\max} і z_{\min} - відповідно найбільша і найменша координати по осі заготовки. Тоді

$$v_r = \frac{a_3 v_0 V}{z_{\max} - z_{\min}} r^2 (R - r) \cdot (1 + a_4 z(z_{\max} - z_{\min} - z)). \quad (10)$$

Граничні умови для двобічного пресування можна записати у вигляді

$$\left. \begin{aligned} v_r(R, z) &= 0; \\ v_r(0, z) &= 0; \\ v_z(r, z_{\max}) &= -v_0; \\ v_z(r, z_{\min}) &= kv_0. \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

де $0 \leq k \leq 1$ – відношення швидкостей нижнього і верхнього пуансонів.

З урахуванням того, що при двобічному пресуванні існують точки з координатою $z = z_{mid} = (kz_{\max} + z_{\min}) / (1 + k)$, у яких осьова складова швидкості плинину дорівнюватиме нулю, осьова складова швидкості плинину матеріалу згідно [2]

$$\left. \begin{aligned} v_{1z} &= -v_0 \frac{(1+k)z - kz_{\max} - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \left(1 - a_1 \left(1 + a_2 \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{(1+k)(z - z_{\min})}{k(z_{\max} - z_{\min})} \right) \\ v_{2z} &= -v_0 \frac{(1+k)z - kz_{\max} - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \left(1 - a_1 \left(1 + a_2 \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{(1+k)(z_{\max} - z)}{z_{\max} - z_{\min}} \right) \end{aligned} \right\}, (12)$$

де $v_{1z} = v_z|_{z < z_{mid}}$;

$v_{2z} = v_z|_{z \geq z_{mid}}$.

Тоді компоненти тензора швидкостей деформації можна обчислити як

$$\left. \begin{aligned} e_r &= \frac{a_3 v_0 V (2rR - 3r^2) (1 + a_4 z (z_{\max} - z_{\min} - z))}{z_{\max} - z_{\min}}; \\ e_{1z} &= -\frac{2v_0(1+k)}{z_{\max} - z_{\min}} \left(1 + a_1 \left(1 + a_2 \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{2(1+k)z - ((2+k)z_{\min} + kz_{\max})}{k(z_{\max} - z_{\min})} \right); \\ e_{2z} &= -\frac{v_0(1+k)}{z_{\max} - z_{\min}} \left(1 - a_1 \left(1 + a_2 \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{(1+2k)z_{\max} + z_{\min} - 2(1+k)z}{z_{\max} - z_{\min}} \right); \\ e_\varphi &= \frac{a_4 v_0 V}{z_{\max} - z_{\min}} r(R-r) \cdot (1 + a_5 z (z_{\max} - z_{\min} - z)); \\ \gamma_{1rz} &= \frac{2v_0 a_1 a_2 r}{R^2} \left(\frac{(1+k)z - kz_{\max} - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \right) \left(\frac{(1+k)(z - z_{\min})}{k(z_{\max} - z_{\min})} \right) + \\ &+ \frac{a_3 a_4 v_0 V (z_{\max} - z_{\min} - 2z)}{z_{\max} - z_{\min}} r^2 (R-r); \\ \gamma_{2rz} &= \frac{2v_0 a_1 a_2 r}{R^2} \left(\frac{(1+k)z - kz_{\max} - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \right) \left(\frac{(1+k)(z_{\max} - z)}{z_{\max} - z_{\min}} \right) + \\ &+ \frac{a_4 a_5 v_0 V (z_{\max} - z_{\min} - 2z)}{z_{\max} - z_{\min}} r^2 (R-r). \end{aligned} \right\} (13)$$

Тут, як у (12), індекс 1 стосується точок заготовки з координатою $z < z_{mid}$, а індекс 2 – усіх інших точок заготовки.

Інтенсивність деформації

$$\begin{aligned} H_1 &= H|_{z < z_{mid}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{(e_r - e_{1z})^2 + (e_{1z} - e_\varphi)^2 + (e_r - e_\varphi)^2 + 6\gamma_{1rz}^2}; \\ H_2 &= H|_{z \geq z_{mid}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{(e_r - e_{2z})^2 + (e_{2z} - e_\varphi)^2 + (e_r - e_\varphi)^2 + 6\gamma_{2rz}^2}. \end{aligned} (14)$$

Складова варіаційного функціонала, що визначається внутрішніми силами опору деформації, матиме наступний вигляд

$$J_1 = \sum_{i=1}^2 \iiint_V \sqrt{(e_r + e_\varphi + e_{iz})^2 f_1(\theta) + H_i^2 f_2(\theta)} dV, (15)$$

а складова, обумовлена тертям на торцях та бічній стінці матриці

$$J_2 = \sqrt{3} \left(\iint_{F_1} \mu_{\phi} \sqrt{f_2(\theta)} v_z^2 dF_1 + \iint_{F_2} \mu_m \sqrt{2f_2(\theta)} v_r^2 dF_2 \right),$$

або, якщо вважати коефіцієнти тертя на бічній стінці μ_{ϕ} та торцях μ_m однаковими, що дорівнюють μ ,

$$J_2 = \sqrt{3}\mu \left(\iint_{F_1} \sqrt{f_2(\theta)} v_z^2 dF_1 + \iint_{F_2} \sqrt{2f_2(\theta)} v_r^2 dF_2 \right). \quad (17)$$

Елемент бічної поверхні циліндра $dF_1 = R d\phi dz$, а швидкість ковзання по бічній поверхні

$$\left. \begin{aligned} v_{1z}(R, z) &= -v_0 \frac{(1+k)z - kz_{\max} - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \left(1 - a_1(1+a_2) \frac{(1+k)(z - z_{\min})}{k(z_{\max} - z_{\min})} \right); \\ v_{2z}(R, z) &= -v_0 \frac{(1+k)z - kz_{\max} - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \left(1 - a_1(1+a_2) \frac{(1+k)(z_{\max} - z)}{z_{\max} - z_{\min}} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

Елемент поверхні торця циліндра $dF_2 = r dr d\phi$ і швидкість ковзання на торцях

$$v_r|_{z=z_{\max}} = v_r|_{z=z_{\min}} = v_0 \frac{a_3 r^2 v}{h} (R - r). \quad (19)$$

Виконавши моделювання так само, як у попередньому випадку, з'ясували, що плин матеріалу у радіальному напрямку тим інтенсивніше, чим вище початкова густина матеріалу. Зокрема при початковій густині заготовки 30% числові значення параметрів a_3 і a_4 приблизно на порядок менші за значення параметрів a_1 і a_2 , тож радіальна складова швидкості плину матеріалу набагато менша осьової складової і плин матеріалу у радіальному напрямку не призводить до помітного викривлення вертикальних ліній сітки (рис. 4, а). Навпаки, при початковій густині заготовки 50% плин матеріалу у радіальному напрямку проявляється сильніше, бо числові значення параметрів a_3 і a_4 сумірні зі значеннями параметрів a_1 і a_2 , що призводить до помітного викривлення вертикальних ліній сітки (рис. 4, б). Розподіл пористості за рахунок плину матеріалу у радіальному напрямку помітно змінюється (рис. 4 в, г).

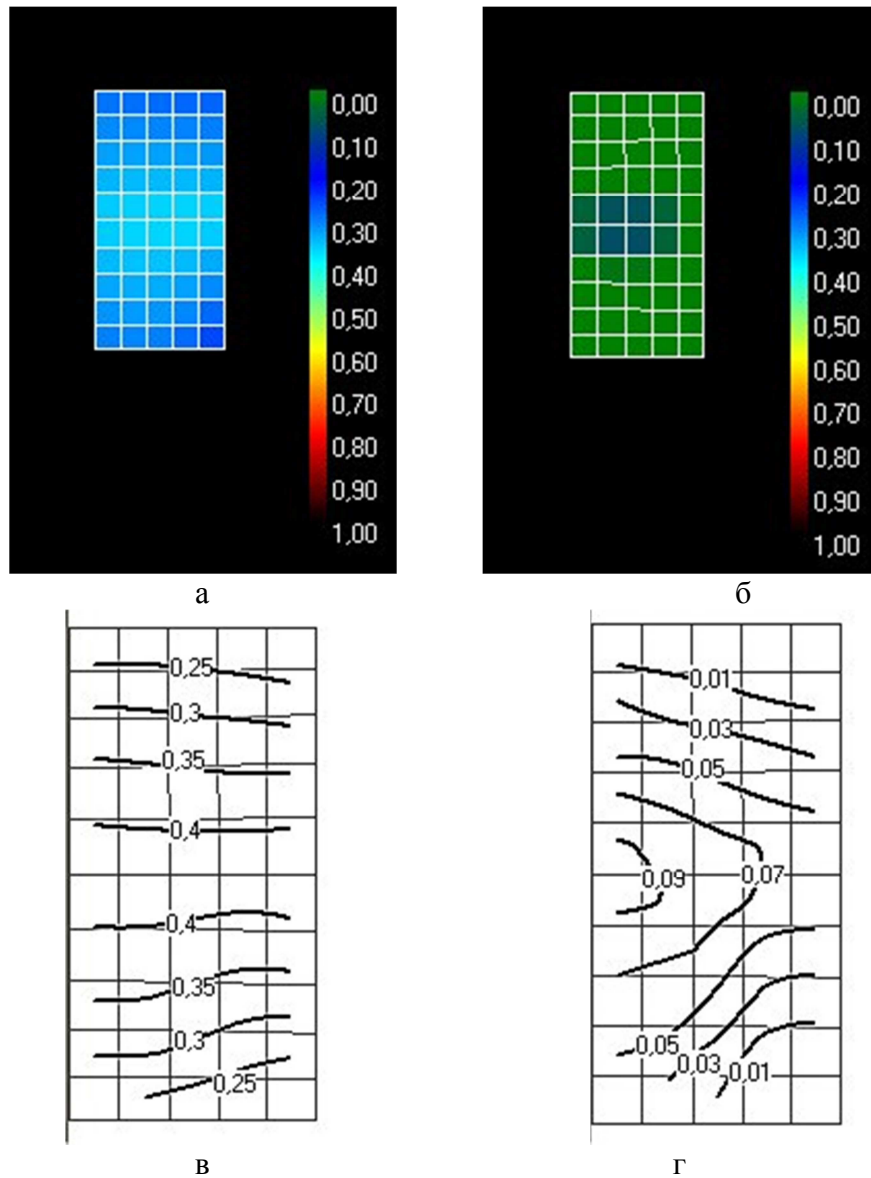


Рис 3 -. Результати моделювання ущільнення в закритому штампі: а – діаграма розподілу пористості при початковій густині 30%, б – те ж саме, 50%, в – лінії рівної пористості при початковій густині 30%, г – те ж саме, 50%

Для експериментальної перевірки відповідності моделі провели дослід з ущільнення порошкової заготовки, складеної з зовнішньої обойми у вигляді порожнистого циліндра та циліндричного осердя, зовнішній діаметр якого дорівнював внутрішньому діаметру обойми. Обойму та осердя виготовили з одного й того ж поршку, що мав різні кольори, зокрема у даному експерименті обойму зовнішнім діаметром 12 мм, а внутрішнім – 6 мм виготовили з окисненого порошку міді ПМС-1, а осердя – зі стабілізованого порошку тієї ж марки. Для забезпечення технологічної міцності використовували полівініловий спирт у якості пластифікатора. Після пресування визначили геометричні розміри та масу виготовлених деталей і розрахували їхню інтегральну густину. Інтегральна пористість при початковій густині 30% виявилася рівною 33%, а при початковій густині 50% – близько 3% (розрахункові значення за моделлю відповідно 33% і 2,6%). Потім виготовлені деталі розрізали по діаметральній площині, відшліфували та сфотографували розріз (рис. 4). Дійсно, при ущільненні заготовки з низькою початковою густиною (рис. 4а) твірна осердя не здобула істотних геометричних спотворень, тоді як твірна осердя при відносно великій початковій густині помітно викривлена (рис. 4 б).

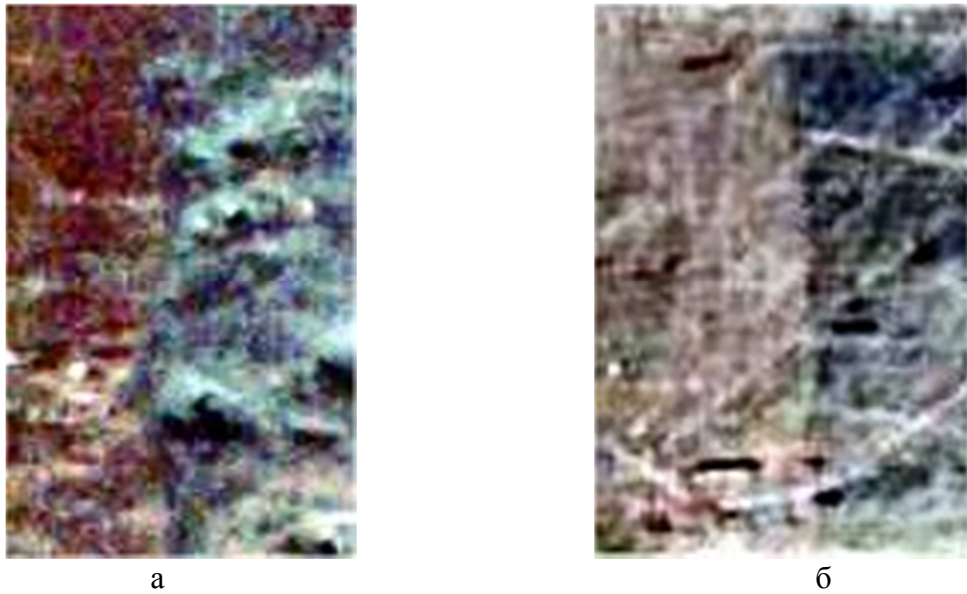


Рис. 4. – Макроструктура матеріалу складеної заготовки після пресування на перерізі по діаметральній площині: а – початкова густина 30%, б – початкова густина 50 %

Таким чином запропонована модель ущільнення з урахуванням радіальної складової плинину матеріалу задовільно відповідає експериментальним даним. Слабко виражений плин матеріалу у радіальному напрямку надає можливість користуватися для дослідження ущільнення натурними шаруватими моделями, тобто деталями, виготовленими з реальних порошків, забарвлених у контрастні кольори. Так, дослідження ущільнення циліндричної заготовки, що складається з шарів звичайного залізного порошку, що чергуються з шарами такого ж порошку, плакованого міддю, показало добре співпадіння розрахункових даних, отриманих візіопластичним методом, з експериментальними. При цьому вертикальні лінії сітки проводили рівномірно без урахування будь-якого їх викривлення при ущільненні (рис. 5).

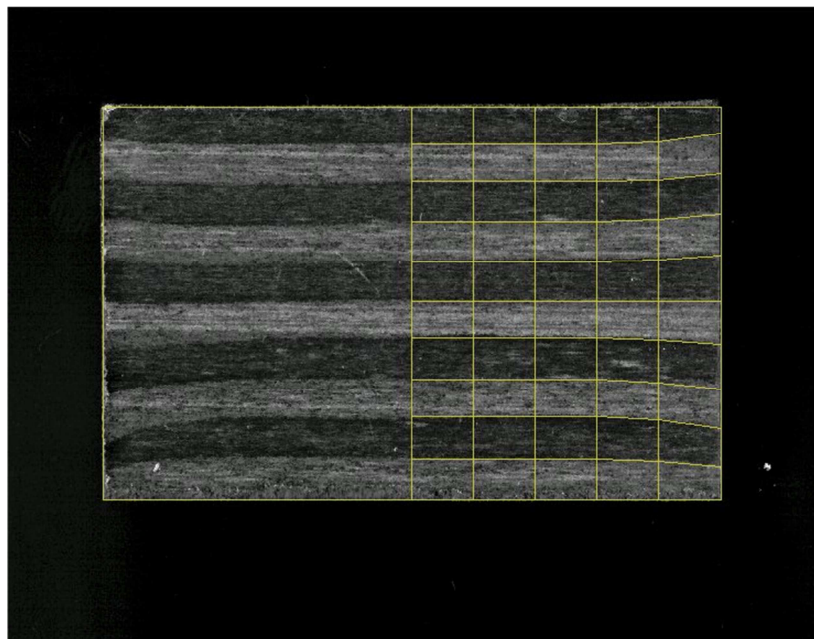


Рис. 5. – Шарувата деталь після ущільнення

Висновки.

1. Плин пористого порошкового матеріалу в радіальному напрямку при ущільненні у закритому штампі тим сильніший, чим вища початкова густина заготовки.

2. Відсутність урахування радіальної складової швидкості плину пористого порошкового матеріалу може привести до похибки визначення розподілу пористості по товщі заготовки.

3. Слабко виражений плин матеріалу при малій початковій густині заготовки дозволяє користуватись для дослідження ущільнення натурними шаруватими моделями, подумки реконструюючи вертикальні лінії сітки для реалізації візюопластичного методу.

Список літератури: 1. Баглюк Г.А. Анализ кинематики процесса свободной осадки пористого цилиндра с учетом контактного трения [Текст]/ Г.А.Баглюк.//Порошковая металлургия. – 1993. – № 1. – С.17-21. 2. Хоменко О.І., Баглюк Г.А., Хоменко А.О. Вплив схеми пресування на розподіл густини порошкової заготовки при ущільненні в закритій матриці [Текст]/ О.І.Хоменко.//Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2011. – №45. – С.108 – 113.

Надійшла до редколегії 25.10.2012

УДК 621.762

Урахування радіальної складової швидкості плину порошкових матеріалів при моделюванні процесу ущільнення в закритому штампі / Хоменко О. І., Баглюк Г. А., Куріхін В.С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 46(952) – С.135-143. - Библиогр.: 2 назв.

Рассмотрено влияние радиальной составляющей скорости течения материала при моделировании уплотнения порошковой заготовки в закрытом штампе. Показано, что радиальная составляющая заметно влияет на характер уплотнения при достаточно большой начальной плотности заготовки (порядка 50 %), что дает возможность при изучении процессов уплотнения изделий сложной формы пользоваться многослойными моделями из плакированных порошков.

Ключевые слова: порошковый материал, прессование, компьютерное моделирование, прямой вариационный метод.

The paper deals with radial component of material flow influence on powder materials compaction in the closed die. It was shown that mentioned component affects compaction nature distinctly at comparably high billet density (50 % order). This allows to use multi-layer models made of clad powders to investigate complicated powder details compaction.

Keywords: powder material, pressing, computer simulation, direct variation method.

УДК 621.797

В. Ю. ЧЕРКАЩЕНКО, аспирант, Кременчугский национальный университет им. М. Остроградского, Кременчуг

В. В. ЛОТОУС, председатель правления ОАО «Полтавский ГОК, Комсомольск

В. В. ДРАГОБЕЦКИЙ, докт. техн. наук, проф., Кременчугский национальный университет им. М. Остроградского, Кременчуг

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГИБКИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДУГ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Обоснована целесообразность применения профильных заготовок из разнородных материалов для изготовления гибкой элементов каркаса транспортных средств. Рассмотрено растяжение бинарной системы при наличии внешнего трения. Напряжения контактного трения определяются по зависимостям молекулярно-механической теории. Представлена методика определения параметров процесса гибки с растяжением дуг пассажирских вагонов из биметаллической заготовки: нержавеющая сталь + углеродистая сталь.

Ключевые слова : гибка, растяжение, биметалл, профиль, трение.

Вступлення. Слоистые металлы нашли широкое применение во многих отраслях промышленности. Их применение обусловлено возможностью создания изделий с комплексом физико-механических свойств недостижимых в монометаллах, при экономии

© В. Ю. Черкащенко, В. В. Лотоус, В. В. Драгобецкий, 2012