

УДК 621.762

**О. І. ХОМЕНКО**, канд. техн. наук, ст. наук. сотр., ІПМ НАНУ;  
**Г. А. БАГЛЮК**, докт. техн. наук, заст. директора, ІПМ НАНУ, Київ

## МОДЕЛЮВАННЯ УЩІЛЬНЕННЯ КОНІЧНОЇ ПОРОШКОВОЇ ЗАГОТОВКИ В ЗАКРИТІЙ ЖОРСТКІЙ МАТРИЦІ

Розглянуто математичну модель однобічного ущільнення конічної заготовки двома пуансонами в закритій жорсткій матриці в припущенні наявності радіальної складової плинності матеріалу у циліндричних (технологічних) частинах матриці. Описано методику комп'ютерного моделювання процесу при ущільненні окремо верхнім та нижнім пуансонами. З'ясовано, що комп'ютерне моделювання у порівнянні з натурним призводить до якісно подібної картини розподілу пористості. Деякі кількісні відхилення можна пояснити як припущеннями при моделюванні, так і похибками експерименту.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, порошковий матеріал, ущільнення, матриця, пуансон.

**Вступ.** Досить часто створення машин та механізмів потребує деталей конічної чи близької до конічної форми. Виготовлення таких деталей литтям не завжди забезпечує потрібну точність, а механічною обробкою циліндричних заготовок – до підвищених втрат матеріалу. Крім того, подальше ущільнення конічних заготовок у циліндричній матриці цікаве ще й з точки зору отримання матеріалів з високою густиною. Перспективними для отримання конічних деталей уявляються методи порошкової металургії. Виготовленню конічних деталей цими методами присвячено ряд праць, але у більшості з них акцент зроблено на технологічних особливостях процесу (режим ущільнення, конструкція обладнання, тощо), в той час, як теоретичні питання висвітлено недостатньо всебічно. Ця стаття є спробою в якійсь мірі доповнити дослідження процесу ущільнення конічних порошкових заготовок.

**Мета дослідження.** Метою роботи є математичне моделювання процесу ущільнення заготовки у вигляді усіченого конуса двома пуансонами в жорсткій закритій матриці.

**Матеріали дослідження.** Матриця для ущільнення заготовки у вигляді усіченого конуса має складатися з двох циліндричних частин з радіусами  $r_1$  і  $r_2$  та висотами  $h_1$  і  $h_3$ , відповідно, та середньої частини у вигляді усіченого конуса з радіусами основ  $r_1$  і  $r_2$  та висотою  $h_2$  (рис. 1, а). Радіальну координату будь-якої точки на поверхні заготовки тут і надалі будемо позначати як  $R$  з відповідним індексом, маючи на увазі, що у циліндричних частинах ця координата є сталою, а у конічній – лінійною функцією осьової координати  $z$ .

Циліндричні частини, у яких пересуваються верхній 1 та нижній 2 пуансони (рис. 1, б), відіграють суто технологічну роль, а деталь формується саме у конічній частині.

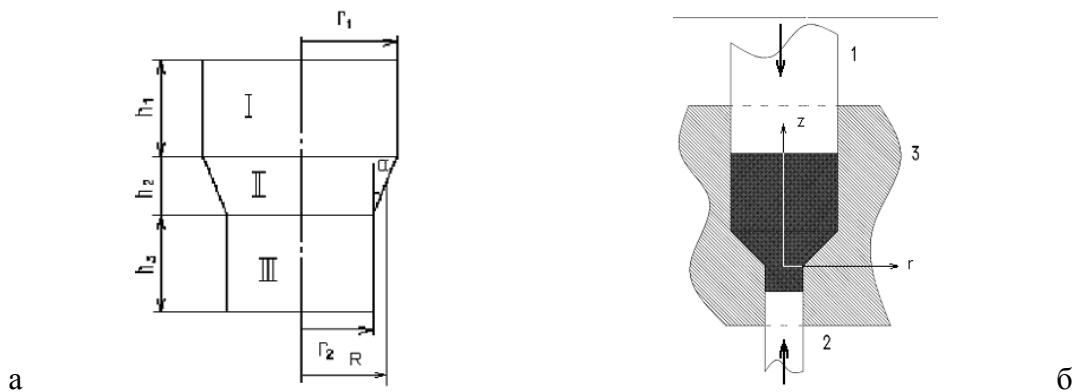


Рис. 1 – Матриця для ущільнення заготовки: а – схема заготовки, б – схема ущільнення

Нехай верхній пуансон 1 рухається у абсолютно жорсткій матриці 3 зі швидкістю  $v_u$ , а нижній пуансон 2 – назустріч йому зі швидкістю  $v_l$ . При  $v_u=0$  або  $v_l=0$  матиме місце одnobічне пресування. З фізичних міркувань розуміло, що верхній пуансон може пересуватися на відстань, що не перебільшує  $h_1$ . Для певності будемо вважати, що й нижній пуансон пересувається на відстань, що не перевищує  $h_3$ , попри те, що фізично він здатний просуватися навіть у конічній частині прес-форми. Початок координат умовно розмістимо у точці перетину осі заготовки з площиною межі частин II та III (рис. 1, б).

Розглянемо спочатку одnobічне ущільнення верхнім пуансоном. Компоненти швидкості плину матеріалу та тензора швидкості деформації будемо позначати верхнім індексом  $U$ . Оскільки у кожній частині заготовки матеріал при ущільненні буде рухатись по-різному, нижній індекс компонент буде містити номер частини заготовки.

На осі заготовки радіальна складова швидкості плину матеріалу дорівнюватиме нулю, виходячи з умови рівноваги заготовки при ущільненні. У частинах I і III (циліндричні частини) на поверхні заготовки радіальна складова швидкості плину матеріалу також дорівнюватиме нулю, виходячи з умови жорсткості прес-форми, тож будуть справедливі наступні граничні умови:

$$\left. \begin{aligned} v_{Ir}^U \Big|_{r=0} &= v_{IIIr}^U \Big|_{r=0} = 0 \\ v_{Ir}^U \Big|_{r=r_1} &= v_{IIIr}^U \Big|_{r=r_2} = 0 \\ v_{Iz}^U \Big|_{z=z_{max}} &= -v_u \\ v_{IIIz}^U \Big|_{z=z_{min}} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

В конічній частині при ущільненні матеріал буде ковзати по поверхні матриці, через що швидкість плинину буде мати ненульову радіальну складову. Будемо виходити з нерозривності швидкості ковзання матеріалу по поверхні матриці.

Припустимо, що радіальна складова швидкості плинину матеріалу у конічній частині заготовки по абсолютній величині зростає лінійно від нульового значення на осі до максимального значення на поверхні конічної частини  $v_{IIIr}$

$$\left. \begin{aligned} v_{IIIr}^U \Big|_{r=0} &= 0 \\ v_{IIIr}^U \Big|_{r_2 \leq R \leq r_1} &= v_{IIIr} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Нульові значення радіальної складової швидкості на поверхні циліндричної частини та на осі заготовки не виключають ненульових значень радіальної складової швидкості між віссю заготовки і поверхнею матриці, тож, згідно [1], будемо вважати

$$\left. \begin{aligned} v_{Ir}^U &= \frac{a_3 v v_u}{h_1} r^2 (r_1 - r) \cdot (1 + a_4 (z - h_1 - h_2) (h_2 - z)) \\ v_{IIIr}^U &= \frac{a_5 v v_u}{h_3} r^2 (r_2 - r) \cdot (1 + a_6 z (h_3 + z)) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де  $a_3, a_4, a_5$  і  $a_6$  – деякі параметри,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Для другої частини максимальне значення радіальної складової швидкості плинину визначимо, виходячи зі швидкості ковзання матеріалу по конічній поверхні. Її, в свою чергу, знайдемо, виходячи зі швидкостей ковзання по циліндричним поверхням. Для опису осьової компоненти швидкості плинину матеріалу у цих частинах скористалися наступним виразом

$$v_z^U = -\frac{v_u (z + h_3)}{H} \left( 1 - a_1 \left( 1 + a_2 \frac{r^2}{R^2} \right) \left( 1 - \frac{z + h_3}{H} \right) \right), \quad (4)$$

де  $H = h_1 + h_2 + h_3$ ,

$a_1$  та  $a_2$  – деякі параметри,

$R_I = r_1 = \text{const}$ ,  $R_{III} = r_2 = \text{const}$ .

Вираз (4) є по суті рівнянням, запропонованим у [2], модифікованим з урахуванням геометричних характеристик заготовки та обраної системи координат. Очевидно, що він задовольняє граничним умовам на торцях пуансонів. Швидкість ковзання матеріалу по поверхні для першої і третьої частин матриці отримали з (4) при  $r = r_1$  та  $r = r_2$ , відповідно:

$$v_{rk}^U = v_{llk}^U = -\frac{v_u(z+h_3)}{H} \left( 1 - a_1(1+a_2) \left( 1 - \frac{z+h_3}{H} \right) \right). \quad (5)$$

Припустимо, що для конічної частини матриці швидкість ковзання матеріалу також визначається співвідношенням (5). Радіальну компоненту вектора швидкості ковзання знайдемо як його проекцію на відповідну координатну вісь:

$$v_{llr}^U \Big|_{r=R_{II}} = v_{llk}^U \frac{r_1 - r_2}{\sqrt{h_2^2 + (r_1 - r_2)^2}}. \quad (6)$$

Значення радіальної складової швидкості плин у довільній точці другої частини заготовки визначимо лінійною інтерполяцією:

$$v_{llr}^U = \frac{r}{R_{II}} v_{llr}^U \Big|_{r=R_{II}} = \frac{rh_2}{(r_1 - r_2)z + r_2h_2} v_{llr}^U \Big|_{r=R_{II}}. \quad (7)$$

Значення осьової компоненти швидкості плин матеріалу у довільній точці другої частини заготовки визначали згідно виразу (4), до якого підставили у явному вигляді  $R_{II} = \frac{(r_1 - r_2)z + r_2h_2}{h_2}$ :

$$v_{llz}^U = -\frac{v_u(z+h_3)}{H} \left( 1 - a_1 \left( 1 + a_2 \frac{h_2^2 r^2}{((r_1 - r_2)z + r_2h_2)^2} \right) \left( 1 - \frac{z+h_3}{H} \right) \right). \quad (8)$$

З виразів (3), (4), (7) та (8), що визначають поле швидкостей плин, отримали компоненти тензора швидкостей деформації в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} e_{rk}^U &= -\frac{v_u}{H} \left( 1 - a_1 \left( 1 + a_2 \frac{r^2}{r_1^2} \right) \left( 1 - \frac{2(z+h_3)}{H} \right) \right), \\ e_{llz}^U &= -\frac{v_u}{H} \left( 1 + a_1 \left( \frac{2a_2h_2^2r^2(r_1-r_2)(z+h_3)(H-(z+h_3))}{H((r_1-r_2)z-r_2h_2)^3} - \left( 1 + \frac{a_2h_2^2r^2}{((r_1-r_2)z-r_2h_2)^2} \right) \frac{H-2(z+h_3)}{H} \right) \right), \\ e_{llz}^U &= -\frac{v_u}{H} \left( 1 - a_1 \left( 1 + a_2 \frac{r^2}{r_2^2} \right) \left( 1 - \frac{2(z+h_3)}{H} \right) \right), \\ e_{lr}^U &= \frac{a_3 v_u}{h_1} (2r_1r - 3r^2) \cdot (1 + a_4(z - h_1 - h_2)(h_2 - z)) \end{aligned},$$

$$\begin{aligned}
e_{Irr}^U &= \frac{v_u (r_1 - r_2) h_2 (z + h_3)}{H \sqrt{h_2^2 + (r_1 - r_2)^2} ((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)} \left( 1 - a_1 (1 + a_2) \left( 1 - \frac{z + h_3}{H} \right) \right), \\
e_{IIIr}^U &= \frac{a_5 v v_u}{h_3} (2r_2 r - 3r^2) \cdot (1 + a_6 z (h_3 + z)), \\
e_{I\varphi}^U &= \frac{a_3 v v_u}{h_1} r (r_1 - r) \cdot (1 + a_4 (z - h_1 - h_2) (h_2 - z)), \\
e_{II\varphi}^U &= \frac{v_u (r_1 - r_2) h_2 (z + h_3)}{H \sqrt{h_2^2 + (r_1 - r_2)^2} ((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)} \left( 1 - a_1 (1 + a_2) \left( 1 - \frac{z + h_3}{H} \right) \right), \\
e_{III\varphi}^U &= \frac{a_5 v v_u}{h_3} r (r_2 - r) \cdot (1 + a_6 z (h_3 + z)), \\
\gamma_{Irrz}^U &= \frac{a_3 v v_u}{h_1} r^2 (r_1 - r) \cdot (1 + a_4 (2z - h_1 - 2h_2)) + \frac{2a_1 a_2 v_u r (z + h_3) (H - z - h_3)}{r_1^2 H^2} \\
\gamma_{IIrz}^U &= - \frac{v_u r (r_1 - r_2) h_2}{H \sqrt{h_2^2 + (r_1 - r_2)^2} ((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)} \left( \left( 1 - a_1 (1 + a_2) \left( 1 - \frac{2(z + h_3)}{H} \right) \right) - \right. \\
&\quad \left. - \frac{r_1 - r_2}{(r_1 - r_2)z + r_2 h_2} \left( 1 - a_1 (1 + a_2) \left( 1 - \frac{z + h_3}{H} \right) \right) + \frac{2a_1 a_2 h_2 (z + h_3)}{(r_1 - r_2)z + r_2 h_2} \left( 1 - \frac{z + h_3}{H} \right) \right), \\
\gamma_{IIIrz}^U &= \frac{a_5 v v_u}{h_3} r^2 (r_2 - r) \cdot (1 + a_6 (h_3 + 2z)) + \frac{2a_1 a_2 v_u r (z + h_3) (H - z - h_3)}{r_2^2 H^2}.
\end{aligned} \tag{9}$$

Інтенсивність деформації розраховували як

$$H = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{(e_r - e_z)^2 + (e_z - e_\varphi)^2 + (e_r - e_\varphi)^2 + 6\gamma_{rz}^2}. \tag{10}$$

Верхній індекс при змінних у (10) відсутній, бо цей вираз стосується також ущільнення нижнім пуансоном.

Для моделювання ущільнення користувалися прямим варіаційним методом. Складова енергетичного функціоналу, що визначається внутрішніми силами опору деформації, з урахуванням того, що елемент об'єму  $dV = r dr dz d\varphi$ , матиме наступний вигляд:

$$J_1 = \Sigma \iiint_V \sqrt{(e_r + e_\varphi + e_z)^2 f_1(\theta) + H^2 f_2(\theta)} dV, \tag{11}$$

Швидкість ковзання матеріалу на бічних стінках матриці визначали згідно (5). Для першої та третьої частин заготовки врахували також тертя на торцях верхнього та нижнього пуансонів. Якщо вважати коефіцієнт тертя на торцях пуансонів і на бічних стінках матриці однаковим, складова варіаційного функціоналу, зумовлена тертям, становитиме

$$J_2 = \sqrt{3\mu} \left( \iint_{F_{lu}} \sqrt{f_2(\theta)} v_{lr}^2 dF_{lu} + \iint_{F_l} \sqrt{f_2(\theta)} v_{lk}^2 dF_l + \iint_{F_{ll}} \sqrt{f_2(\theta)} v_{llk}^2 dF_{ll} + \right. \\ \left. + \iint_{F_{lll}} \sqrt{f_2(\theta)} v_{lllk}^2 dF_l + \iint_{F_{lll}} \sqrt{f_2(\theta)} v_{lllr}^2 dF_{lll} \right) \quad (12)$$

де  $dF_{lu} = r dr d\varphi$  ( $0 \leq r \leq r_1$ ) – елемент поверхні торця верхнього пуансона;

$dF_l = r_1 d\varphi dz$ ,  $dF_{ll} = \pi(r_1 + r_2) \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + h_2^2} d\varphi dz$ ,  $dF_{lll} = r_2 d\varphi dz$  – елементи бічних поверхонь першої, другої та третьої частин заготовки, відповідно;

$dF_{lll} = r dr d\varphi$  ( $0 \leq r \leq r_2$ ) – елемент поверхні торця нижнього пуансона.

Варіюванням коефіцієнтів  $a_i$  мінімізували суму  $J = J_1 + J_2$ , а після цього розраховували положення будь-якої точки заготовки при русі пуансона у певні моменти часу. Для визначеності площу осьового перерізу заготовки покрили уявною ортогональною сіткою та розраховували положення її вузлів через кожну секунду. Відповідно до нових положень вузлів сітки перераховували значення пористості у кожній комірці сітки за відомими співвідношеннями.

Тепер розглянемо однобічне ущільнення одним нижнім пуансоном, який рухається з швидкістю  $v_l$  у напрямку, що співпадає з додатним положенням осі  $z$ . Компоненти швидкості плинну та тензора швидкостей деформації позначимо верхнім індексом  $L$ . Тоді поле швидкостей плинну визначатиметься наступними виразами:

$$v_{lz}^L = \frac{v_l(h_1 + h_2 - z)}{H} \left( 1 - a_8 \left( 1 + a_9 \frac{r^2}{r_1^2} \right) \left( 1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H} \right) \right), \\ v_{llz}^L = \frac{v_l(h_1 + h_2 - z)}{H} \left( 1 - a_8 \left( 1 + \frac{a_9 h_2^2 r^2}{((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)^2} \right) \left( 1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H} \right) \right), \\ v_{lllz}^L = \frac{v_l(h_1 + h_2 - z)}{H} \left( 1 - a_8 \left( 1 + a_9 \frac{r^2}{r_2^2} \right) \left( 1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H} \right) \right), \quad (13) \\ v_{lr}^L = \frac{a_{10} v_l}{h_1} r^2 (r_1 - r) \cdot (1 + a_{11}(z - h_1 - h_2)(h_2 - z)), \\ v_{llr}^L = \frac{v_l(r_1 - r_2)h_2 r(h_1 + h_2 - z)}{H \sqrt{h_2^2 + (r_1 - r_2)^2} ((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)} \left( 1 - a_8 \left( 1 + \frac{a_9 h_2^2 r^2}{((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)^2} \right) \left( 1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H} \right) \right), \\ v_{lllr}^L = \frac{a_{12} v_l}{h_3} r^2 (r_2 - r) \cdot (1 + a_{13}z(h_3 + z)).$$

Відповідно, компоненти тензора швидкостей деформації визначили наступним чином:

$$\begin{aligned}
e_{Iz}^L &= -\frac{v_l}{H} \left( 1 - a_8 \left( 1 + a_9 \frac{r^2}{r_1^2} \right) \left( 1 - \frac{2(h_1 + h_2 - z)}{H} \right) \right), \\
e_{IIz}^L &= -\frac{v_l}{H} \left( 1 - a_8 \left( \frac{2a_9 h_2^2 r^2 (r_1 - r_2)(h_1 + h_2 - z)(H - (h_1 + h_2 - z))}{H((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)^3} - \left( 1 + \frac{a_9 h_2^2 r^2}{((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)^2} \right) \frac{H - 2(h_1 + h_2 - z)}{H} \right) \right), \\
e_{IIIz}^L &= -\frac{v_l}{H} \left( 1 - a_8 \left( 1 + a_9 \frac{r^2}{r_2^2} \right) \left( 1 - \frac{2(h_1 + h_2 - z)}{H} \right) \right), \\
e_{Ir}^L &= \frac{a_{10} v v_l}{h_1} (2r_1 r - 3r^2) \cdot (1 + a_{11}(z - h_1 - h_2)(h_2 - z)), \\
e_{IIr}^L &= \frac{v_l(r_1 - r_2)h_2(h_1 + h_2 - z)}{H\sqrt{h_2^2 + (r_1 - r_2)^2}((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)} \left( 1 - a_8(1 + a_9) \left( 1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H} \right) \right), \\
e_{IIIr}^L &= \frac{a_{13} v v_l}{h_3} (2r_2 r - 3r^2) \cdot (1 + a_{14}z(h_3 + z)), \\
e_{I\varphi}^L &= \frac{a_{10} v v_l}{h_1} r(r_1 - r) \cdot (1 + a_{11}(z - h_1 - h_2)(h_2 - z)), \\
e_{II\varphi}^L &= \frac{v_l(r_1 - r_2)h_2(h_1 + h_2 - z)}{H\sqrt{h_2^2 + (r_1 - r_2)^2}((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)} \left( 1 - a_8(1 + a_9) \left( 1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H} \right) \right), \\
e_{III\varphi}^L &= \frac{a_{12} v v_l}{h_3} r(r_2 - r) \cdot (1 + a_{13}z(h_3 + z)), \\
\gamma_{Iz}^L &= v_l \left( \frac{a_{10} v}{h_1} r^2(r_1 - r) \cdot (1 + a_{11}(-2z + h_1 + 2h_2)) - \frac{2a_8 a_9 (h_1 + h_2 - z)r}{r_1^2 H} \left( 1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H} \right) \right), \\
\gamma_{IIz}^L &= -\frac{v_l h_2 (r_1 - r_2) r}{H\sqrt{h_2^2 + (r_1 - r_2)^2}((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)} \left( \left( 1 + a_8(1 + a_9) \left( 1 - \frac{2(h_1 + h_2 - z)}{H} \right) \right) + \right. \\
&+ \frac{r_1 - r_2}{((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)} \left( 1 - a_8(1 + a_9) \left( 1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H} \right) \right) + \frac{2a_8 a_9 h_2 (h_1 + h_2 - z)}{((r_1 - r_2)z + r_2 h_2)} \left( 1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H} \right) \Bigg), \\
\gamma_{IIIz}^L &= v_l \left( \frac{a_{13} v}{h_3} r^2(r_2 - r) \cdot (1 + a_{14}(h_3 + 2z)) - \frac{2a_8 a_9 (h_1 + h_2 - z)r}{r_2^2 H} \left( 1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H} \right) \right).
\end{aligned} \tag{14}$$

Швидкість ковзання матеріалу на бічних стінках матриці за аналогією з (5) складе

$$v_{Ik}^L = v_{IIk}^L = v_{IIIk}^L = \frac{v_l(h_1 + h_2 - z)}{H} \left( 1 - a_8(1 + a_9) \left( 1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H} \right) \right), \tag{15}$$

Так само, як у випадку ущільнення одним верхнім пуансоном, енергетичний функціонал складають згідно (11) і (12), мінімізують його варіюванням параметрів, визначають нові положення точок заготовки при ущільненні та розраховують нові значення пористості у цих точках.

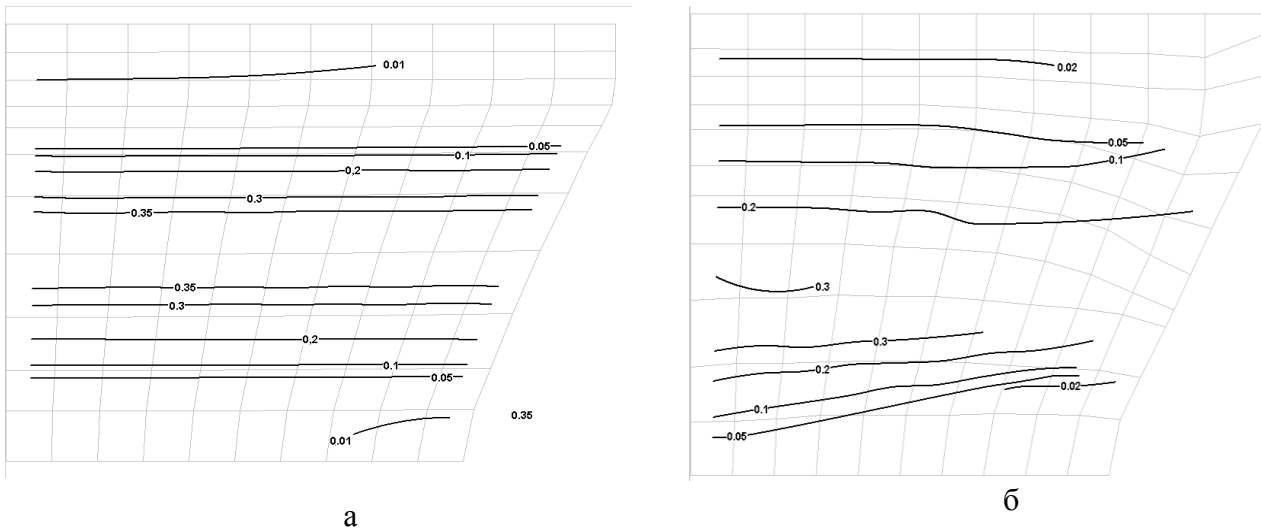


Рис. 2 – Розподіл ліній рівної пористості: а – при моделюванні, б – у шаруватій заготовці

Результат моделювання у вигляді карти розподілу ліній рівної пористості наведений на рис. 2, а. На рис. 2, б наведено карту розподілу ліній рівної пористості для натурної конічної заготовки. Карту отримано з результатами обробки шліфа шаруватої заготовки візіопластичним методом\*.

**Висновки.** Середня пористість заготовки, розрахована згідно запропонованої моделі, дорівнює 11% і добре узгоджується зі значенням, отриманим експериментально (12%). Якісно карта розподілу ліній рівної пористості також узгоджується з картою, отриманою експериментально. Деякі кількісні розбіжності пояснюються в першу чергу неможливістю отримання ідеально рівних поверхонь при виготовленні шаруватих заготовок, похибками вимірювань на шліфі та припущеннями при моделюванні. Отримані результати підтверджують придатність запропонованої моделі для дослідження процесу ущільнення конічних заготовок у закритій жорсткій матриці.

**Список літератури:** 1. Хоменко О.І. Баглюк Г.А., Куріхін В.С. Урахування радіальної складової швидкості плинущу порошкових матеріалів при моделюванні процесу ущільнення в закритому штампі [Текст] / О.І.Хоменко, Г.А.Баглюк, В.С.Куріхін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2012. – №46. – С.135-143. 2. Баглюк Г.А. Сравнительный анализ схем нагружения при горячем доуплотнении пористой заготовки в закрытом штампе [Текст] / Г.А.Баглюк, М.Б.Штерн, В.Л.Юрчук // Порошковая металлургия. – 1979. – №11 – С.19-22.

**Bibliography (transliterated):** 1. Khomenko, O.I., Baglyuk, G. A., Kurikhin, V. P. «Urakhuvannja radial'noj skladovoji shvydkosti plynu poroshkovykh materialiv pry modelyuvanni ushchil'nennja v zakrytomu shtampi». Visnyk NTU «KhPI». No. 46. 2012. – P. 135–143. 2. Baglyuk, G. A., Shtern, M.B., Yurchuk, V.L. «Sravnitel'nyj analiz skhem nagruzhennja pri gorjachem douplotnenii poristoj zagotovki v zakrytom shtampe» Poroshkovaja metallurgija. No.11. – 1979. P. 19–22.

Поступила (received) 05.11.2014

\*\*\* Шаруваті заготовки виготовлено асп. Куріхіним В.С.