

УДК.621.777

Калюжний В. Л.  
Піманов В. В.**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ СТУПІНЧАТИХ ПОРОЖНИН В УМОВАХ ДІЇ ПРОТИТИСКУ НА ЗАГОТОВКУ**

Сучасний розвиток багатьох галузей промисловості, таких як, машинобудування, приладобудування та інших, потребує більш широкого застосування високоточних виробів з підвищеною надійністю і довговічністю із штампових та інструментальних сталей. Для підвищення стійкості деформуючого інструменту штампів для гарячого об'ємного і листового штампування, пресових та ливарних форм при виготовленні таких деталей використовують холодне об'ємне штампування (ХОШ). Ефективність ХОШ для виготовлення деталей штампів і прес-форм приведена в [1]. Однак із-за низької пластичності штампових і інструментальних сталей традиційне холодне видавлювання не забезпечує великих глибин вдавлювання пуансона при отриманні порожнистих виробів, а також має місце незаповнення гравюри порожнини складної геометричної форми. Для підвищення пластичності сталей при холодному формоутворенні виробів використовують схеми видавлювання зі збільшеним гідростатичним тиском в осередку деформації, наприклад за допомогою прикладання протитиску рідиною під високим тиском. Ефективність дії рідини під високим тиском на пластичність при механічних випробуваннях зразків і в процесах прямого видавлювання показана в роботах [2–5]. Отримання порожнин штампів і прес-форм холодним видавлювання з протитиском дозволяє збільшити глибину вдавлювання за один перехід та підвищити стійкість майстер-пуансонів [6].

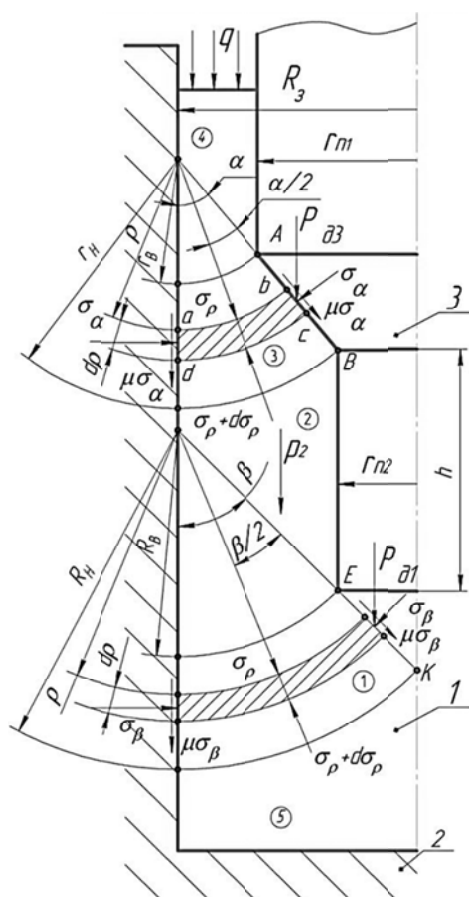


Рис. 1. Схема видавлювання з протитиском ступінчастим пуансоном:  
1 – пуансон; 2 – заготовка;  
3 – матриця

$\sigma_\alpha$  і  $\sigma_\beta$  – стискаючі напруження в напрямку кутів  $\alpha$  і  $\beta$  та  $\sigma_\rho$  – стискаючі напруження в напрямку  $\rho$ ;  $\tau = \mu\sigma_\alpha$  і  $\tau = \mu\sigma_\beta$  – дотичні напруження, які виникають від тертя між заготовкою та матрицею, заготовкою та пуансоном ( $\mu$  – коефіцієнт тертя). Метал вважається жорстко-пластичним зі зміцненням. На торець заготовки прикладений протитиск величиною  $q$ .

Для підвищення пластичності сталей при холодному формоутворенні виробів використовують схеми видавлювання зі збільшеним гідростатичним тиском в осередку деформації, наприклад за допомогою прикладання протитиску рідиною під високим тиском. Ефективність дії рідини під високим тиском на пластичність при механічних випробуваннях зразків і в процесах прямого видавлювання показана в роботах [2–5]. Отримання порожнин штампів і прес-форм холодним видавлювання з протитиском дозволяє збільшити глибину вдавлювання за один перехід та підвищити стійкість майстер-пуансонів [6].

Метою роботи є отримання аналітичних залежностей для визначення напружень на контактуючих поверхнях і зусилля видавлювання ступінчатих порожнин з протитиском, проведення чисельних і натурних експериментів та порівняння отриманих результатів.

Задачу аналізу видавлювання ступінчатої порожнини з протитиском вирішували інженерним методом (ІМ).

На рис. 1 приведена розрахункова схема. Заготовка 1, що деформується в матриці 2 за допомогою пуансону 3, розподілена на 5 об'ємів. Пластична деформація має місце в 1 і 3 об'ємах, які обмежені радіусами  $r_\alpha$  і  $r_\beta$  та  $R_\alpha$  і  $R_\beta$  відповідно.

На поверхнях елементарних об'ємів, які виділені в осередках деформацій, діють:

Спочатку розглядаємо 3 об'єм. Спроектуємо сили від діючих напружень на вісь, яка проходить по середині кута  $\alpha$ , враховуючи, що величина осередку в тангенційному напрямку дорівнює одиниці:

$$\sigma_\rho \cdot F_{ab} - (\sigma_\rho + d\sigma_\rho) F_{dc} + 2\sigma_\alpha \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot F_{bc} + 2\mu\sigma_\alpha \cos \frac{\alpha}{2} \cdot F_{bc} = 0, \quad (1)$$

де  $F_{ab} = r \cdot \alpha \cdot 1$ ;  $F_{dc} = (\rho + d\rho) \cdot \alpha \cdot 1$ ;  $F_{bc} = d\rho \cdot 1$  – площі площадок, на яких діють напруження.

Після підстановки площ, скорочень та нехтуванням величиною другого порядку малості, знаходимо:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} \cdot \rho \cdot \alpha + \sigma_\rho \cdot \alpha - \sigma_\alpha \cdot \left( 2 \sin \frac{\alpha}{2} + 2\mu \cos \frac{\alpha}{2} \right) = 0. \quad (2)$$

Наближена умова пластичності для 3 об'єму має вигляд:

$$\sigma_\rho - \sigma_\alpha = \sigma_{s3}, \quad (3)$$

де  $\sigma_{s3}$  – істинне напруження в третьому об'ємі.

Визначаємо  $\sigma_\alpha$  із (3) і підставляємо в (2). Після перетворень отримуємо:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} \cdot \rho + \sigma_\rho \left( 1 - \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha}{2} - \frac{2}{\alpha} \mu \cos \frac{\alpha}{2} \right) + \sigma_{s3} \left( \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{\alpha} \mu \cos \frac{\alpha}{2} \right) = 0. \quad (4)$$

Розділяємо змінні і після інтегрування знаходимо:

$$\sigma_\rho \left( \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha}{2} + 2\mu \cos \frac{\alpha}{2} - 1 \right) - \sigma_{s3} \left( \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha}{2} + 2\mu \cos \frac{\alpha}{2} \right) = (\rho C)^{\left( \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{\alpha} \mu \cos \frac{\alpha}{2} - 1 \right)}. \quad (5)$$

Довільну постійну  $C$  знаходимо з граничної умови – при  $\rho = r_B$ , напруження  $\sigma_\rho = -q$  (величині протитиску):

$$-q \left( \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{\alpha} \mu \cos \frac{\alpha}{2} - 1 \right) - \sigma_{s3} \left( \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{\alpha} \mu \cos \frac{\alpha}{2} \right) = (r_B C)^{\left( \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{\alpha} \mu \cos \frac{\alpha}{2} - 1 \right)}. \quad (6)$$

Позначимо:

$$A = \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{\alpha} \mu \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Підставляємо (6) в (5). Кінцевий вираз для та  $\sigma_\rho$  має вигляд:

$$\sigma_\rho = -\sigma_{s3} \left[ \left( \frac{\rho}{r_B} \right)^{(A-1)} \left( \frac{q}{\sigma_{s3}} + \frac{A}{A-1} \right) - \frac{A}{A-1} \right]. \quad (7)$$

З умови пластичності (3) знаходимо напруження  $\sigma_\alpha$ :

$$\sigma_\alpha = -\sigma_{s3} \left[ \left( \frac{\rho}{r_B} \right)^{(A-1)} \left( \frac{q}{\sigma_{s3}} + \frac{A}{A-1} \right) - \frac{1}{A-1} \right]. \quad (8)$$

По напруженню  $\sigma_\alpha$  можна знайти зусилля  $P_3$  для деформування 3 об'єму. Однак вказане напруження залежить від радіуса  $\rho$ . Знайдемо середнє значення  $\sigma_\alpha^{cp}$ :

$$\sigma_{\alpha}^{cp} = \frac{\sigma_{\alpha}, \text{ при } \rho = r_B + \sigma_{\alpha}, \text{ при } \rho = r_H}{2} = -0,5\sigma_{s3} \left\{ \left( \frac{q}{\sigma_{s3}} + \frac{A}{A-1} \right) \left[ 1 + \left( \frac{r_H}{r_6} \right)^{A-1} \right] - \frac{2}{A-1} \right\}. \quad (9)$$

Тоді зусилля  $P_{\partial 3}$  дорівнює:

$$P_{\partial 3} = |\sigma_{\alpha}^{cp}| \cdot F^{AB} / \sin \alpha = \frac{0,5\sigma_{s3}}{\sin \alpha} \left\{ \left( \frac{q}{\sigma_{s3}} + \frac{A}{A-1} \right) \left[ 1 + \left( \frac{r_H}{r_6} \right)^{A-1} \right] - \frac{2}{A-1} \right\} F^{AB}, \quad (10)$$

де  $F^{AB} = \pi(r_{\Pi 1} - r_{\Pi 2}) \cdot L_{AB}$  – площа бічної поверхні зрізаного конусу з твірною  $AB$ .

Радіуси  $r_B$  і  $r_H$  та  $L_{AB}$  можна визначити через розміри пуансона і матриці (див. рис. 1):

$$r_B = \frac{R_3 - r_{\Pi 1}}{\sin \alpha}; \quad r_H = \frac{R_3 - r_{\Pi 2}}{\sin \alpha}; \quad L_{AB} = \frac{r_{\Pi 1} - r_{\Pi 2}}{\sin \alpha}. \quad (11)$$

Тоді, з урахуванням (11), зусилля деформування визначається по формулі:

$$P_{\partial 3} = \frac{1,57\sigma_{s3}(r_{\Pi 1}^2 - r_{\Pi 2}^2)}{\sin^2 \alpha} \left\{ \left( \frac{q}{\sigma_{s3}} + \frac{A}{A-1} \right) \left[ 1 + \left( \frac{R_3 - r_{\Pi 2}}{R_3 - r_{\Pi 1}} \right)^{A-1} \right] - \frac{2}{A-1} \right\}. \quad (12)$$

Для визначення напруженого стану в 1 об'ємі необхідно врахувати вплив 2 об'єму, який зміщується як жорстке ціле, що приводить до виникнення тертя між пуансоном і матрицею. Також необхідно оцінити вплив 3 об'єму, що створює протитиск для зміщення другого об'єму. По рекомендаціям М. В. Сторожова і Є. О. Попова, максимальна величина нормального напруження, яке діє на стінки матриці і пуансону не може бути більшою чим істинне напруження  $\sigma_{s1}$  здеформованого металу 1 об'єму. Сила контактного тертя на матриці і пуансоні дорівнює (див. рис. 1):

$$P = \mu\sigma_{s1} \cdot 2\pi \cdot r_{\Pi 2} \cdot h + \mu\sigma_{s1} \cdot 2\pi \cdot R_3 \cdot h = 2\pi \cdot \mu\sigma_{s1} \cdot h(r_{\Pi 2} + R_3). \quad (13)$$

Тоді питоме зусилля в стінці другого об'єму дорівнює:

$$p = \frac{P_1}{\pi(R_3^2 - r_{\Pi 2}^2)} = \frac{\mu\sigma_{s1} \cdot 2\pi \cdot h(r_{\Pi 2} + R_3)}{\pi(R_3^2 - r_{\Pi 2}^2)} = \frac{\mu\sigma_{s1} \cdot 2 \cdot h}{R_3 - r_{\Pi 2}}. \quad (14)$$

Також опір зміщенню 2 об'єму буде створювати проекція  $\sigma_{rH}$  від напруження  $\sigma_{\rho}$  (при  $\rho = r_H$ ) в третьому об'ємі, що визначається по формулі (7):

$$\sigma_{rH} = \left( \sigma_{\rho}, \text{ при } \rho = r_H \right) \cos \frac{\alpha}{2} = -\sigma_{s3} \left[ \left( \frac{r_H}{r_6} \right)^{A-1} \left( \frac{q}{\sigma_{s3}} + \frac{A}{A-1} \right) - \frac{A}{A-1} \right] \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (15)$$

Тоді результуючий протитиск на 1 об'єм від 2 і 3 об'ємів, який необхідно врахувати при визначенні напруження  $\sigma_{\rho}$  в першому об'ємі, складає (див. рис. 1):

$$p_2 = \sigma_{rH} + p. \quad (16)$$

Далі розглядаємо 1 об'єм. По аналогії з 3 об'ємом, якщо записати рівняння рівноваги проекцій сил і наближену умову пластичності  $\sigma_{\rho} - \sigma_{\beta} = \sigma_{s1}$ , то після інтегрування можна отримати наступне рівняння:

$$\sigma_{\rho} \left( \frac{2}{\beta} \sin \frac{\beta}{2} + 2\mu \cos \frac{\beta}{2} - 1 \right) - \sigma_{s1} \left( \frac{2}{\beta} \sin \frac{\beta}{2} + 2\mu \cos \frac{\beta}{2} \right) = (\rho C)^{\left( \frac{2}{\beta} \sin \frac{\beta}{2} + 2\mu \cos \frac{\beta}{2} - 1 \right)}. \quad (17)$$

Довільну постійну  $C$  знаходимо із умови, що при  $\rho = R_B$ , напруження  $\sigma_\rho = p_2 = \sigma_m + p$ .

Тоді кінцевий вираз для  $\sigma_\rho$  має вигляд:

$$\sigma_\rho = -\sigma_{s1} \left[ \left( \frac{\rho}{R_\theta} \right)^{(B-1)} \left( \frac{\sigma_{rH+p} + \frac{B}{\sigma_{s1}}}{B-1} \right) - \frac{B}{B-1} \right], \quad (18)$$

$$\text{де } B = \frac{2}{\beta} \sin \frac{\beta}{2} + \frac{2}{\beta} \mu \cos \frac{\beta}{2}$$

З наближеної умови пластичності знаходимо напруження  $\sigma_\beta$ :

$$\sigma_\beta = \sigma_\rho - \sigma_{s1} = -\sigma_{s1} \left[ \left( \frac{\rho}{R_\theta} \right)^{(B-1)} \left( \frac{\sigma_{rH+p} + \frac{B}{\sigma_{s1}}}{B-1} \right) - \frac{1}{B-1} \right]. \quad (19)$$

Для знаходження зусилля деформування 1 об'єму знайдемо середнє значення напруження  $\sigma_\beta^{cp}$ :

$$\sigma_\beta^{cp} = \frac{\sigma_\theta, \text{ при } \rho = R_B + \sigma_\theta, \text{ при } \rho = R_H}{2} = -0,5\sigma_{s1} \left\{ \left( \frac{\sigma_{rH+p} + \frac{B}{\sigma_{s1}}}{B-1} \right) \left[ 1 + \left( \frac{R_H}{R_\theta} \right)^{B-1} \right] - \frac{2}{B-1} \right\}. \quad (20)$$

Зусилля для деформування першого об'єму дорівнює:

$$P_{\theta 1} = \frac{|\sigma_\theta^{cp}|}{\sin \beta} \cdot F^{EK}, \quad (21)$$

де  $F^{EK} = \pi \cdot L_{EK} \cdot r_{II2}$  – площа бічної поверхні конуса ( $L_{EK}$  – довжина твірної ЕК).

Радіуси  $R_B$  і  $R_H$  можна визначити наступним чином (див. рис. 1):

$$R_B = \frac{R_3 - r_{II2}}{\sin \beta}; \quad R_H = \frac{R_3}{\sin \beta}; \quad L^{EK} = \frac{r_{II2}}{\sin \beta}. \quad (22)$$

З урахуванням (21)–(22) зусилля деформування  $P_{\theta 1}$  можна визначити по формулі:

$$P_{\theta 1} = \frac{1,57 \cdot r_{II2}^2 \sigma_{s1}}{\sin^2 \beta} \left\{ \left( \frac{\sigma_{rH+p} + \frac{B}{\sigma_{s1}}}{B-1} \right) \left[ 1 + \left( \frac{R_H}{R_\theta} \right)^{B-1} \right] - \frac{2}{B-1} \right\}. \quad (23)$$

Врахуємо зміцнення металу при холодному видавлюванні. Використовуємо відому апроксимацію діаграми істинних напружень:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_{us}} \left( \frac{\psi}{\psi_{us}} \right)^{\frac{\psi_{us}}{1 - \psi_{us}}}, \quad (24)$$

де  $\sigma_B$  – межа міцності сталі;

$\psi_{us}$  – відносне потоншення, яке відповідає моменту утворення шийки на зразку, при випробуванні на розтяг;

$\psi$  – поточне значення відносного потоншення.

Визначаємо середнє значення  $\sigma_s^{cp}$  для кожного осередку деформації. Для 1 об'єму середнє значення  $\psi^{cp}$  визначаємо як різницю довжин дуг до деформації і після деформації:

$$\psi_1^{cp} = \frac{R_H \cdot \beta - R_B \cdot \beta}{2R_H \cdot \beta} = \frac{R_H - R_B}{2R_H} = \frac{\frac{R_3}{\sin \beta} - (R_3 - r_{\Pi 2})}{\frac{2R_3}{\sin \beta}} = \frac{r_{\Pi 2}}{2R_3}.$$

Підставляємо останній вираз в (24):

$$\sigma_{s1}^{cp} = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_u} \left( \frac{r_{\Pi 1}}{2R_3 \cdot \psi_u} \right)^{\frac{\psi_u}{1 - \psi_u}}. \quad (25)$$

Якщо підставити  $\sigma_{s1}^{cp}$  із (25) в формулу (19) для напруження  $\sigma_\beta$  і зусилля  $P_{\alpha 1}$  (23), то отримаємо вирази для знаходження напруження  $\sigma_\beta$  і зусилля  $P_{\alpha 1}$  з урахуванням зміцнення:

Аналогічно визначаємо середнє значення  $\sigma_{s3}^{cp}$  для третього об'єму. Спочатку знайдемо середнє значення  $\psi^{cp}$ .

$$\psi_3^{cp} = \frac{r_H \cdot \alpha - r_B \cdot \alpha}{2r_H \cdot \alpha} = \frac{\frac{R_3 - r_{\Pi 2}}{\sin \alpha} - (R_3 - r_{\Pi 1})}{2(R_3 - r_{\Pi 2}) \sin \alpha} = \frac{r_{\Pi 1} - r_{\Pi 2}}{2(R_3 - r_{\Pi 2})}. \quad (26)$$

Тоді середнє значення істинного напруження в третьому об'ємі по (24):

$$\sigma_{s3}^{cp} = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_u} \left( \frac{r_{\Pi 2} - r_{\Pi 1}}{2(R_3 - r_{\Pi 1})} \right)^{\frac{\psi_u}{1 - \psi_u}}. \quad (27)$$

В 3 об'ємі деформується метал, який вже отримав зміцнення в 1 об'ємі, яке визначається по (25). Тоді в 3 об'ємі результуюче середнє істинне напруження  $\sigma_{s3}$  дорівнює:

$$\sigma_{s3} = \sigma_{s3}^{cp} + \sigma_{s1}^{cp} = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_u} \left[ \left( \frac{r_{\Pi 2} - r_{\Pi 1}}{2(R_3 - r_{\Pi 1}) \psi_u} \right)^{\frac{\psi_u}{1 - \psi_u}} + \left( \frac{r_{\Pi 2}}{2R_3 \cdot \psi_u} \right)^{\frac{\psi_u}{1 - \psi_u}} \right]. \quad (28)$$

Величину  $\sigma_{s3}$  по (28) необхідно підставляти в формулу для визначення напруження  $\sigma_\alpha$  (8) і зусилля  $P_{\alpha 3}$  (10) в третьому об'ємі.

Повне зусилля видавлювання ступінчатим пуансоном з протитиском визначаємо так:

$$P_\alpha = P_{\alpha 1} + P_{\alpha 3}. \quad (29)$$

За отриманими формулами для зусилля видавлювання проведемо розрахунок видавлювання порожнини матриці із сталі 12ХН3А ступінчатим пуансоном в умовах дії протитиску на заготовку. Для розрахунку задавали всі вихідні параметри:  $\sigma_B = 620$  МПа;  $\psi_u = 0,55$  – відносне потоншення;  $\mu = 0,08$  – коефіцієнт тертя; максимальне значення протитиску на заготовку  $p = 850$  МПа. Геометричні розміри задавали згідно розрахункової схеми (див. рис. 1):  $\alpha = 45$  та  $\beta = 45$  градусів,  $R_3 = 15$  мм;  $r_{\Pi 2} = 4,55$  мм,  $r_{\Pi 1} = 7,55$  мм. За цими параметрами розрахункове загальне зусилля видавлювання  $P_\alpha$  склало 1,25 МН.

Для перевірки адекватності аналітичного рішення був проведений чисельний експеримент з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) та натурний експеримент на конкретній деталі. Моделювання видавлювання порожнини в заготовці із сталі 12ХН3А

розглядали як об'ємну задачу. Розрахунок проводили за допомогою програмного комплексу Deform 3D. Проведення чисельного експерименту дозволило: встановити величину протитиску, який забезпечує формоутворення порожнини без руйнування; встановити кінцеву геометрію виробу, визначити напружено-деформований стан здеформованої заготовки, силовий режим видавлювання та розподіли питомих зусиль на інструменті.

Реалізацію розрахункового процесу виконували по схемі видавлювання згідно [8, 9], яка забезпечує створення протитиску за допомогою рідини. Причому величина протитиску створюється і змінюється пропорційно зусиллю видавлювання в штампі без додаткових пристроїв. Розміри заготовки: діаметр – 30 мм, висота – 46 мм. Властивості металу вихідної заготовки у відпаленому стані: модуль Юнга  $2,1 \cdot 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассона 0,33, умовна межа течії  $\sigma_{0,2} = 450$  МПа. Максимальна величина протитиску  $q$  при видавлюванні склала 850 МПа, яка забезпечувала видавлювання заготовки без руйнування. Коефіцієнт тертя на контактуючих поверхнях задавали  $\mu = 0,08$ . Деформуючий інструмент вважався абсолютно жорстким.

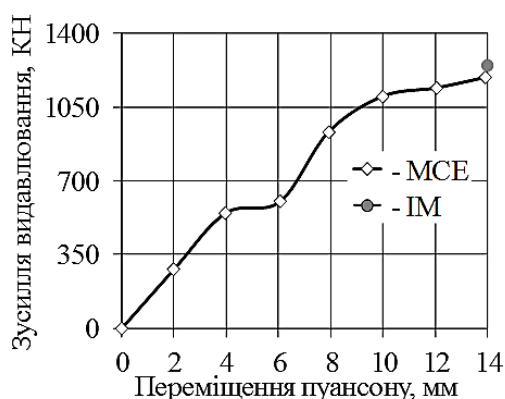


Рис. 2. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону

Розрахункова залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону показана на рис. 2. Максимальне значення зусилля видавлювання по МСЕ склало 1200 КН в кінці робочого ходу, а по ІМ-1249 КН.

По результатах чисельного експерименту було визначено кінцеву геометричну форму заготовки, напружено-деформований стан та ступінь використання ресурсу пластичності  $\psi$  здеформованого металу, який дає можливість прогнозувати ймовірність отримання порожнини без руйнування. На рис. 3 показано розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  та інтенсивності напружень  $\sigma_i$  по об'єму здеформованого металу. По розподілу  $\varepsilon_i$  (рис. 3, а) можна оцінити пропрацювання

структури металу холодною пластичною деформацією. Інтенсивне пропрацювання розповсюджується на третину заготовки по висоті під пуансоном. Тим самим створюється відповідна макроструктура в заготовці для підвищення стійкості порожнин при експлуатації.

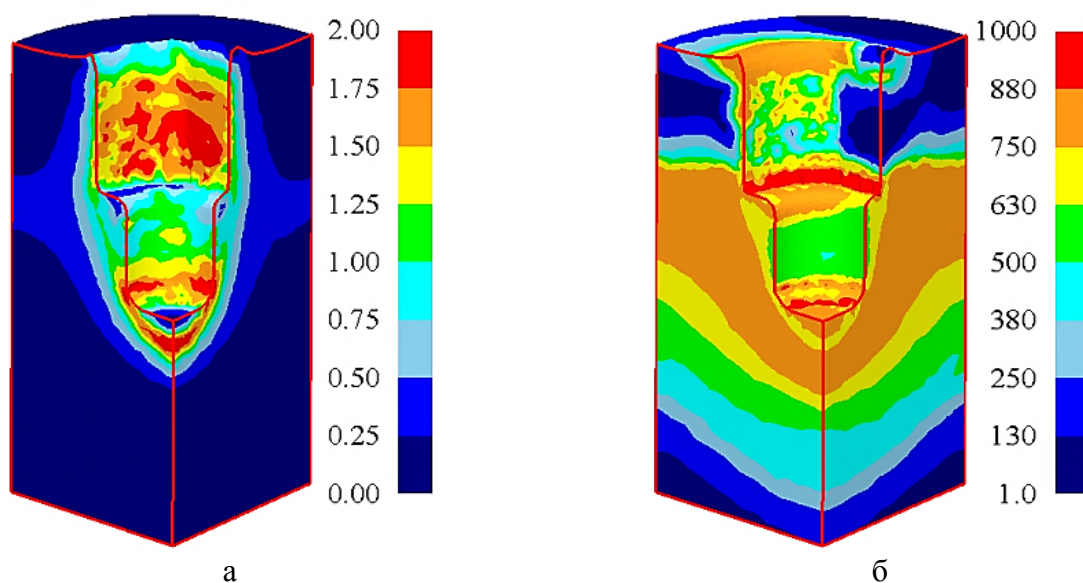


Рис. 3. Розподіл інтенсивності деформації  $\varepsilon_i$  (а) та розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  (б) по об'єму здеформованого металу

Розподіл інтенсивності напружень (рис. 3, б), визначає розповсюдження осередку деформації та величину зміцнення металу в zdeформованій заготовці. Осередок деформації охоплює весь діаметр заготовки і розповсюджується під пуансоном на висоту, що дорівнює меншому діаметру порожнини.

Для проектування штампового оснащення необхідно знати величини питомих зусиль на деформуючому інструменті. Величини питомих зусиль визначали по розподілу нормальних напружень на поверхні заготовки, що контактує з інструментом рис. 4.

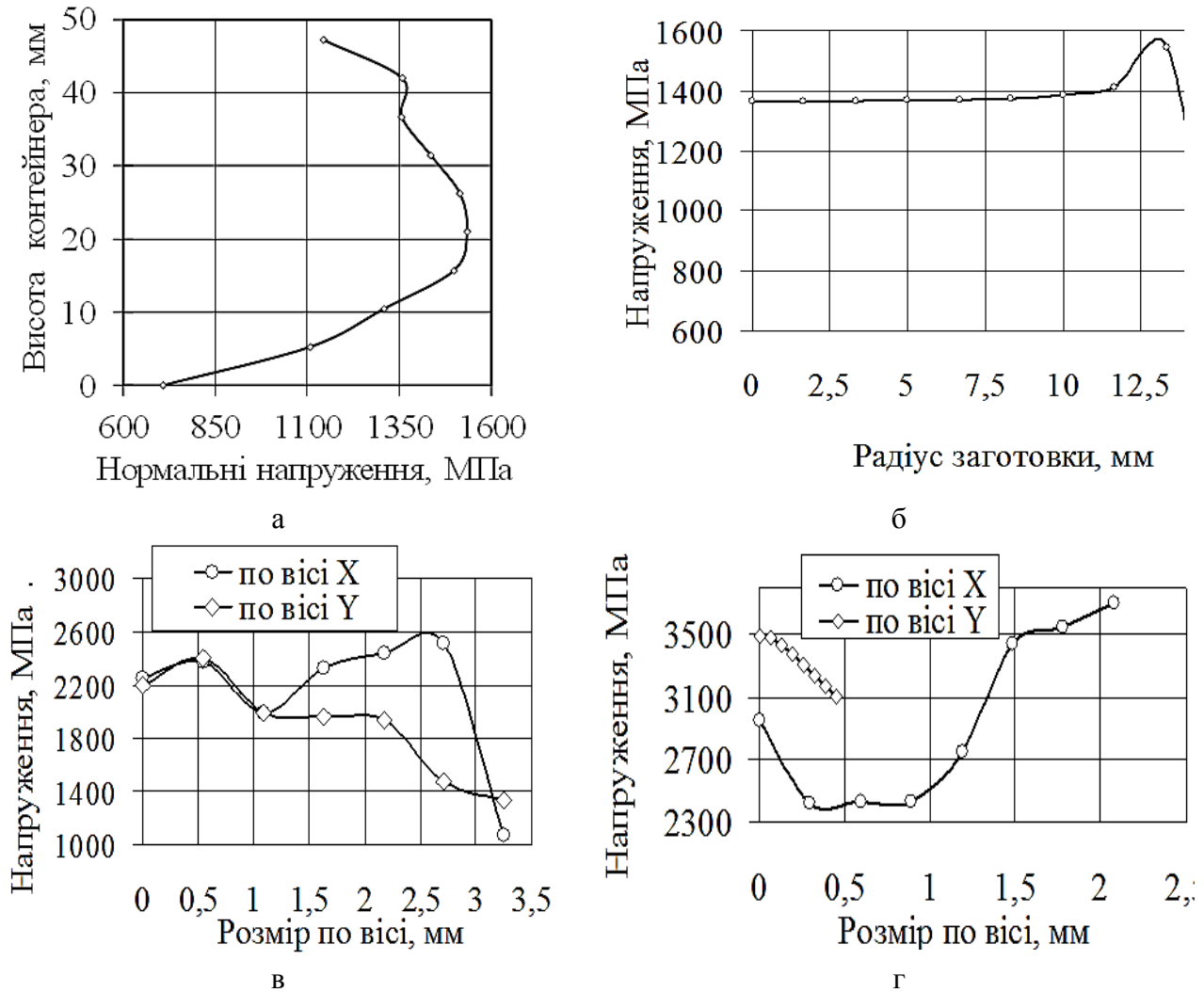


Рис. 4. Розподіл нормальних напружень на поверхнях заготовки, що контактує з інструментом:

а – на зовнішній поверхні; б – на нижньому торці; в – на торці пуансона для меншої порожнини; г – на торці пуансона більшої порожнини

Розподіл нормальних напружень на зовнішній поверхні заготовки (рис. 4, а) дають величини розпираючих напружень, які діють на стінку контейнера (максимальна величина 1550 МПа). На рис. 4, б показаний розподіл нормальних напружень по радіусу на нижньому торці заготовки. Максимальне значення вказаних напружень складає 1580 МПа. Розподіл нормальних напружень в двох напрямках на поверхні заготовки, яка контактує з циліндричним торцем пуансона, показаний на рис. 4, в. Середні значення напружень – 2220 МПа. Напруження більшої величини виникають на самій ступці заготовки (рис. 4, г). З характеру розподілу та геометрії пуансона видно, що найбільші напруження (3800 МПа) діють на плоскі торці ступінчатого пуансона та на радіусах переходів. Однак схема видавлювання, завдяки дії

протитиску на поверхню пуансона, як показали експериментальні дослідження, забезпечує їх раціональну стійкість. Розподіл напружень на робочій поверхні інструменту дає можливість вибрати матеріал для пуансонів та розрахувати необхідну кількість бандажів контейнера.

Експериментальні дослідження видавлювання порожнин ступінчатим пуансоном в умовах дії протитиску проводили на гідравлічному пресі ДБ2436 зусиллям 4 МН. На рис. 5 показано штамп для видавлювання на пресі та деформуючий пуансон. На деформуючому пуансоні виконані проточки для перетікання рідини, яка створює протитиск при видавлюванні пуансона. В якості рідини використовували мінеральне масло «Індустріальне-20», а змащення – КТІОЛ-15.

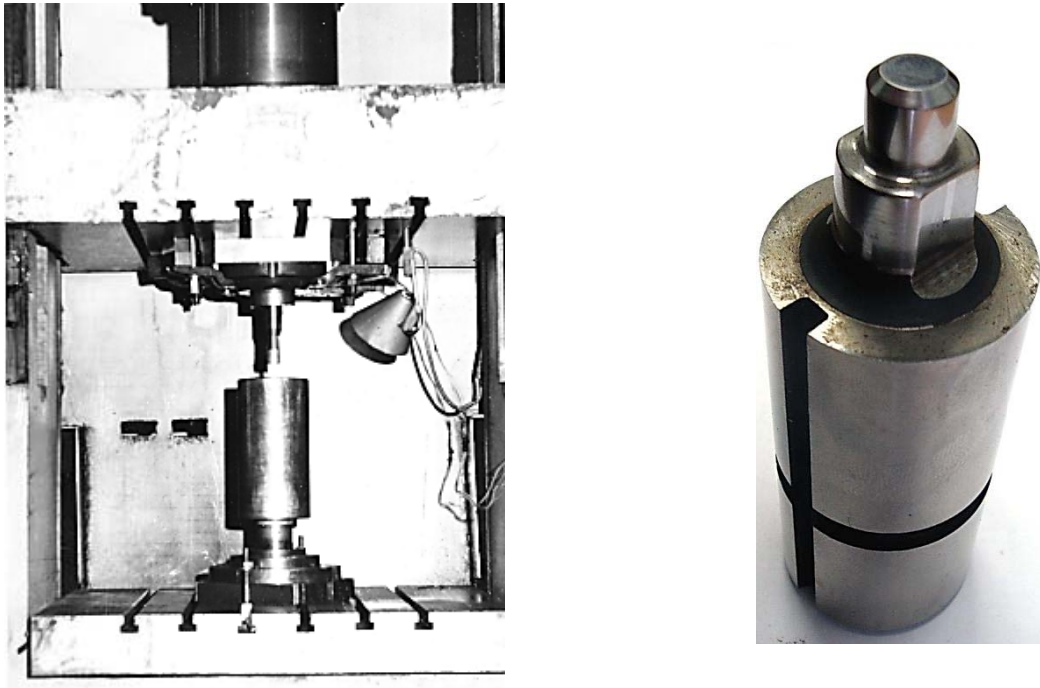
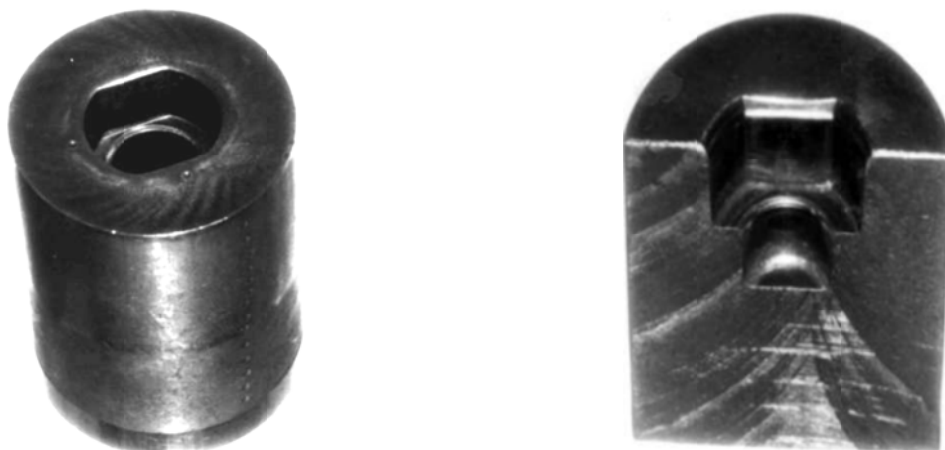


Рис. 5. Штамп для видавлювання на пресі та деформуючий пуансон

Суцільна порожниста заготовка із сталі 12ХН3А (а) і в розрізі (б), яка отримана холодним видавлюванням з протитиском, зображена на рис. 6.



а

б

Рис. 6. Заготовка, яка отримана видавлюванням



## ВИСНОВКИ

Інженерним методом отримані залежності для розрахунку напружень на контактуючих поверхнях заготовки і інструменту та зусилля видавлювання порожнин ступінчастим пуансоном з урахуванням тертя, протитиску і зміцнення.

Комп'ютерним моделюванням методом скінченних елементів проведений чисельний експеримент на прикладі видавлювання ступінчастої порожнини зі сталі 12ХНЗА в умовах дії протитиску на вільну поверхню заготовки. За допомогою моделювання встановлені необхідний максимальний протитиск, що забезпечує видавлювання без руйнування, зусилля видавлювання, розподіл питомих напружень на деформуючому інструменті, напружено-деформований стан та ступінь використання ресурсу пластичності металу, а також кінцеві розміри отриманої порожнини. Розбіжність результатів по максимальній величині зусилля видавлювання по аналітичних залежностях та даними МСЕ склала 4 %.

Розроблено штампове оснащення для видавлювання порожнин в умовах дії диференційованого протитиску на заготовку. Приведені експерименти показали можливість видавлюванню ступінчастих порожнин в заготовках із сталі 12ХНЗА.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Хыбемяги А. И. Выдавливание точных заготовок деталей штампов и пресс-форм / А. И. Хыбемяги, П. С. Лернер. – М. : Машиностроение, 1986. – 150 с.
2. Некоторые вопросы больших пластических деформаций металлов при высоких давлениях / Б. И. Береснев, Л. Ф. Верецагин, Ю. Н. Рябинин и др. – М. : Изд-во АН УССР, 1960. – 80 с.
3. Пью Х. Л. Механические свойства материалов под высоким давлением. Том 1 / Под ред. Пью Х. Л. – М. : Мир, 1973. – 296 с.
4. Деформации металлов жидкостью высокого давления / В. И. Уральский, В. С. Плахотин, Н. И. Шефтель и др. – М. : Металлургия, 1976. – 423 с.
5. Белошенко В. А. Теория и практика гидроэкструзии / В. А. Белошенко, В. Н. Варюхин, В. З. Спусканюк. – К. : Наукова думка, 2007. – 246 с.
6. О некоторых способах и устройствах для холодного гидростатического выдавливания формообразующих полостей штампов и пресс-форм / Ю. Ф. Черный, П. Е. Шмальц, Н. А. Шмальц и др. // Физика и техника высоких давлений. – 1982. – Вып. 9. – С. 14–18.
7. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
8. Пат. України № 40973, МПК В21J13/02. Штамп для виготовлення порожнин в заготовках з важкодеформуючих матеріалів / Калюжний В. Л., Калюжний О. В., Піманов В. В., Паляничко С. М. ; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – № u200814989 ; заявл. 25.12.2008 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.
9. Калюжний В. Л. Холодне видавлювання ступінчастих порожнин пресформ із сталі 12ХНЗА в умовах дії диференційованого протитиску на заготовку / В. Л. Калюжний, В. В. Піманов, М. В. Орлюк // Вісник НТУ ХПІ : збірник наукових праць. Тематичний випуск : Новітні рішення в сучасних технологіях. – Харків, 2011. – № 46. – С. 34–41.

Калюжний В. Л. – д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПІ»;

Піманов В. В. – асистент НТУУ «КПІ».

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ.

E-mail: k\_OMD@ukr.net; pimanov@ukr.net

Стаття надійшла до редакції 29.04.2013 р.