

УДК 621.7

Калюжний В. Л.
Піманов В. В.

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИН СФЕРИЧНИМ ПУАНСОНОМ В УМОВАХ ДІЇ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ПРОТИТИСКУ НА ЗАГОТОВКУ

Сучасний розвиток багатьох галузей промисловості, таких як, машинобудування, приладобудування та інші, вимагають більш широкого застосування високоточних та виробів з підвищеними експлуатаційними властивостями із штампових та інструментальних сталей. Для підвищення надійності і довговічності 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 прикладення 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 видавлюванням з протитиском дозволяє збільшити глибину вдавлювання за один перехід та підвищити стійкість майстер-пуансонів [6].

Метою роботи є визначення інженерним методом параметрів холодного видавлювання порожнин штампів сферичним пуансоном з диференційованим протитиском на заготовку.

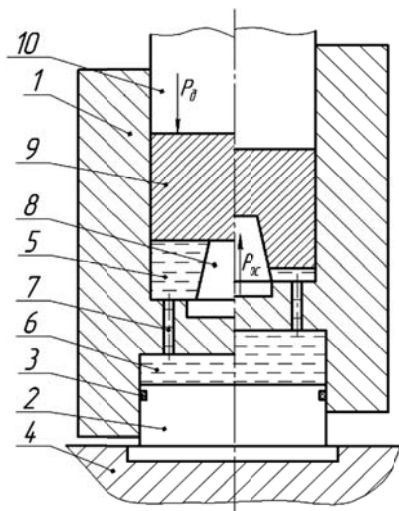


Рис. 1. Схема видавлювання порожнин з накладенням диференційованого протитиску

Схема видавлювання порожнин з накладенням диференційованого протитиску на заготовку показана на рис. 1. Вихідний стан перед видавлюванням показаний зліва від вісі симетрії. Бандажований контейнер 1 встановлений з можливістю переміщення на опорі 2 з ущільненням 3. Опора 2 закріплена на нижній плиті 4 штамп. Контейнер має два канали різних діаметрів: верхній 5 і нижній 6, які з'єднані отворами 7 для вільного проходження рідини, що створює протитиск. В канал 5 встановлений і закріплений деформуючий пуансон 8. В канали 5 і 6 залита робоча рідина і розміщена заготовка 9. Штамп у робочому положенні зображено праворуч від вісі симетрії. При прикладанні зусилля на заготовку 9 через пуансон 10 з каналу 5 рідина перетікає через отвори 7 в канал 6. В рідині виникає тиск величиною q , причому тиск такої величини буде і в каналі 5. Запобігання витіканню рідини з каналу 5 забезпечує заготовка 9, а з каналу 6 – ущільнення 3. Від тиску рідини виникає осьове

зусилля: $P_{oc} = q (F_6 - F_5)$, де F_6 – площа каналу 6, а F_5 – площа каналу 5. Дія зусилля направлена назустріч зусиллю P_d і зростає при збільшенні P_d . Коли зусилля P_{oc} досягне величини, яка необхідна для деформування заготовки, починається видавлювання порожнини в заготовці. При видавлюванні метал стінки порожнини витісняє рідину з каналу 5 в канал 6, і контейнер 1 піднімається назустріч пуансону 10 відносно опори 2. Під час видавлювання на поверхню заготовки діє протитиск рідини q , що збільшує пластичність металу. Причому величина протитиску диференційована: чим більше метал зміцнюється і зменшується пластичність,

тим більший опір деформуванню і зростає зусилля видавлювання P_d , яке автоматично збільшує тиск рідини q для підтримання пластичності на необхідному рівні для деформування без руйнування по мірі вдавлювання пуансона в заготовку. Таким чином, при видавлюванні проходить саморегулювання величини протитиску q та об'єму рідини в каналах 5 і 6. Виштовхування заготовки після видавлювання з контейнера виконується другим ходом преса. Шляхом прикладання навантаження на контейнер 1 він зміщується вниз, рідина перегіає з каналу 6 в канал 5 і виштовхує заготовку із контейнера 1. Крім названих, особливості схеми в тому, що при видавлюванні порожнин на деформуючий пуансон також діє тиск рідини і сприяє збільшенню його стійкості.

Задачу аналізу видавлювання порожнин з протитиском вирішували аналітичним шляхом інженерним методом (ІМ). Даний метод дозволяє наближено вирішити енергосилові параметри процесу видавлювання та розподіл напружень на інструменті.

На рис. 2 приведена розрахункова схема видавлювання порожнин сферичним пуансоном для ІМ. Об'єм металу, що деформується, умовно розподілений на три об'єми: 1 – об'єм, який обмежений радіусами R_B і R_I , представляє собою осередок деформації; 2 – об'єм, який не деформується і зміщується як жорсткий; 3 – об'єм, що знаходиться в пружному стані.

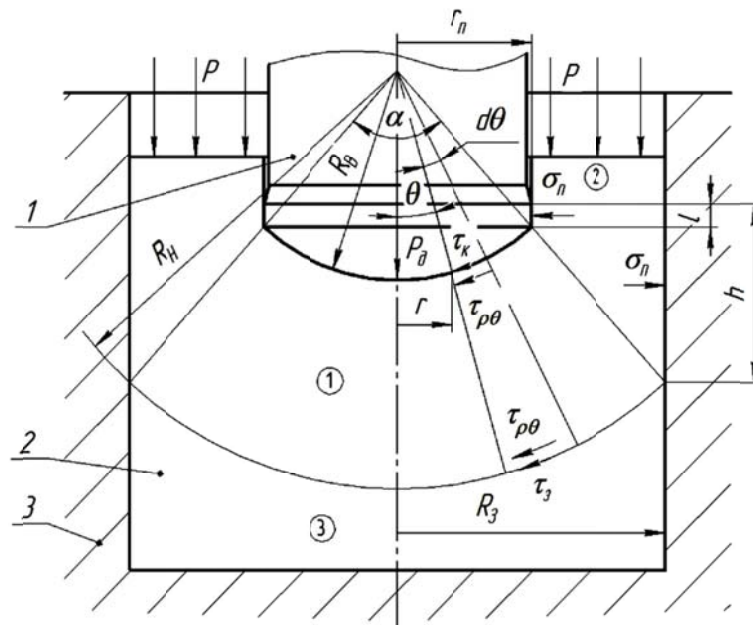


Рис. 2. Схема видавлювання з протитиском сферичним пуансоном:
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матриця

Метал в другому об'ємі не деформується. Формозміна закінчується на границі першого об'єму, тому метал в другому об'ємі знаходиться в пружному стані. Звідки слідує, що нормальні напруження σ_n на матриці 3 і на калібруючому пояску пуансона 1 не можуть бути більшими, ніж істинне напруження σ_{s2} в другому об'ємі [8]. Максимально можливе абсолютне значення нормального напруження σ_n :

$$|\sigma_n| = \sigma_{s2}. \quad (1)$$

Опір руху металу буде створювати контактне тертя на калібруючому пояску пуансона довжиною l і по матриці на висоті h .

Сила тертя на пуансоні:

$$P_T^H = \mu \cdot 2\pi \cdot r_H \cdot l \cdot |\sigma_n| = 2\pi \cdot \mu \cdot \sigma_{s2} \cdot r_H \cdot l. \quad (2)$$

Сила тертя на матриці:

$$P_T^M = \mu \cdot 2\pi \cdot R_3 \cdot h \cdot |\sigma_n| = 2\pi \cdot \mu \cdot \sigma_{s2} \cdot R_3 \cdot h. \quad (3)$$

Тоді питоме зусилля q , яке виникає в перерізі стінки виробу дорівнює:

$$q = \frac{P_T^H + P_T^M}{\pi(R_3^2 - r_H^2)} = \frac{2\pi \cdot \mu \cdot \sigma_{s2} \cdot r_H \cdot l + 2\pi \cdot \mu \cdot \sigma_{s2} \cdot R_3 \cdot h}{\pi(R_3^2 - r_H^2)}. \quad (4)$$

Величину h можна визначити через розміри стінки і кут α (див. рис. 2):

$$h - l = (R_3 - r_H) \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}. \quad (5)$$

Після скорочення в виразі (4) і підставивши h , отримуємо:

$$q = 2 \cdot \mu \cdot \sigma_{s2} \frac{r_H \cdot l + R_3 \left[(R_3 - r_H) \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + l \right]}{R_3^2 - r_H^2}. \quad (6)$$

Величину q необхідно врахувати одночасно з дією протитиску p при аналізі напруженого стану в осередку деформації.

Для знаходження наближеного рівняння рівноваги в осередку деформації використаємо підхід Л. Г. Степанського [9]. Диференційне рівняння рівноваги в сферичних координатах має вигляд:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma_\theta}{d\theta} + \frac{\sigma_\theta - \sigma_\rho}{\rho} \operatorname{ctg} \theta + \frac{\partial \tau_\rho}{\partial \rho} + 3 \frac{\tau_\rho}{\rho} = 0. \quad (7)$$

Інтегруємо його по координаті ρ в осередку деформації:

$$\int_{R_i}^{R_f} \left(\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma_\theta}{d\theta} + \frac{\sigma_\theta - \sigma_\rho}{\rho} \operatorname{ctg} \theta + \frac{\partial \tau_\rho}{\partial \rho} + 3 \frac{\tau_\rho}{\rho} \right) dr = 0. \quad (8)$$

Граничні умови дотичного напруження $\tau_{\rho\theta}$:

$$\begin{aligned} \tau_{\rho\theta} &= \tau_\kappa, \text{ при } \rho = R_B = -\mu\sigma_\rho; \\ \tau_{\rho\theta} &= \tau_3, \text{ при } \rho = R_H = -\frac{1}{2}\sigma_{s1}, \end{aligned} \quad (9)$$

де μ – коефіцієнт тертя; $\tau_3 = \frac{1}{2}\sigma_{s1}$ – дотичне напруження зсуву; σ_{s1} – істинне напруження в першому об'ємі.

Після інтегрування (8), отримаємо наближене рівняння рівноваги:

$$\frac{d\sigma_\theta}{d\theta} = \frac{\tau_\kappa + \tau_3}{\ln \frac{R_H}{R_B}}. \quad (10)$$

Підставляємо вирази дотичних напружень (9) в (10):

$$\frac{d\sigma_\theta}{d\theta} = \frac{-\mu\sigma_\rho + \frac{1}{2}\sigma_{s1}}{\ln \frac{R_H}{R_B}}. \quad (11)$$

Умова пластичності для осередку деформації:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = -\sigma_s. \quad (12)$$

В рівнянні (11) зробимо заміну σ_ρ на σ_θ з (12):

$$\frac{d\sigma_\theta}{d\theta} = \frac{-\mu(\sigma_\theta - \sigma_{s1}) + \frac{1}{2}\sigma_{s1}}{\ln \frac{R_H}{R_B}}. \quad (13)$$

Розділяємо змінні:

$$\frac{d\sigma_\theta}{-\mu\sigma_\theta + \sigma_{s1}\left(\mu + \frac{1}{2}\right)} = \frac{d\theta}{\ln \frac{R_H}{R_B}}. \quad (14)$$

Інтегруємо:

$$-\frac{1}{\mu} \left\{ \ln \left[\mu\sigma_\theta - \sigma_{s1} \left(\mu + \frac{1}{2} \right) \right] \right\} = \frac{\theta}{\ln \frac{R_H}{R_B}} + C. \quad (15)$$

Довільну постійну C знаходимо з граничної умови: при $\theta = \alpha/2$ (на краю осередку деформації) напруження $\sigma_\theta = -(p+q) \sin \frac{\alpha}{2}$. Тут величина q визначається по формулі (6).

Підставляємо C з (15) в (14), після перетворень отримуємо:

$$\frac{\mu\sigma_\theta - \sigma_{s1}\left(\mu + \frac{1}{2}\right)}{-\mu(p+q) \sin \frac{\alpha}{2} - \sigma_{s1}\left(\mu + \frac{1}{2}\right)} = \exp \frac{\mu}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right). \quad (16)$$

Виразимо з (16) напруження σ_θ :

$$\sigma_\theta = \left[-(p+q) \sin \frac{\alpha}{2} - \sigma_{s1} \left(1 + \frac{1}{2\mu} \right) \right] \exp \frac{\mu}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right) + \sigma_{s1} \left(1 + \frac{1}{2\mu} \right). \quad (17)$$

Зробимо заміну:

$$\exp \frac{\mu}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right) \approx 1 + \frac{\mu}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right). \quad (18)$$

Тоді рівняння (17) має вигляд:

$$\sigma_\theta = -\sigma_{s1} \left\{ \left[\frac{p+q}{\sigma_{s1}} \sin \frac{\alpha}{2} + 1 + \frac{1}{2\mu} \right] \left[1 + \frac{\mu}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right) \right] - 1 - \frac{1}{2\mu} \right\}. \quad (19)$$

З умов пластичності (12) знаходимо напруження σ_ρ :

$$\sigma_{\rho} = -\sigma_{s1} \left\{ \left[\frac{p+q}{\sigma_{s1}} \sin \frac{\alpha}{2} + 1 + \frac{1}{2\mu} \right] \left[1 + \frac{\mu}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right) \right] - \frac{1}{2\mu} \right\}. \quad (20)$$

Для визначення зусилля видавлювання виділимо елементарну площу dF на куті $d\theta$ і радіусі R_B , яка представляє собою елементарну площу кульового сегменту:

$$dF = r \cdot d\varphi \cdot R_B \cdot d\theta, \quad (21)$$

де $d\varphi$ – елементарний кут, який змінюється від 0 до 2π ; $d\theta$ – елементарний кут, який змінюється від 0 до $\frac{\alpha}{2}$.

По розрахунковій схемі знаходимо: $r = R_B \cdot \sin \theta$. Тоді:

$$dF = R_B^2 \cdot d\varphi \cdot \sin \theta d\theta. \quad (22)$$

Зусилля деформування визначаємо по формулі:

$$\begin{aligned} P_{\phi} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha/2} |\sigma_n| \cos \theta dF = \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha/2} |\sigma_n| \cos \theta \cdot R_B^2 \cdot \sin \theta d\varphi d\theta = 2\pi \cdot R_B^2 \int_0^{\alpha/2} |\sigma_{\rho}| \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta = \\ &= 2\pi \cdot R_B^2 \cdot \sigma_{s1} \left\{ \left[\frac{p+q}{\sigma_{s1}} \sin \frac{\alpha}{2} + 1 + \frac{1}{2\mu} \right] \cdot \left[\left(1 + \frac{\mu\alpha}{2 \ln \frac{R_H}{R_B}} \right) \frac{\sin^2 \frac{\alpha}{2}}{2} - \frac{\mu}{8 \ln \frac{R_H}{R_B}} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) \right] - \frac{\sin^2 \frac{\alpha}{2}}{4\mu} \right\}. \quad (23) \end{aligned}$$

Радіуси R_B і R_H можна виразити через розміри деформуючого інструменту (див. рис. 2):

$$R_B = \frac{r_{II}}{\sin \frac{\alpha}{2}}; \quad R_H = \frac{R_3}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (24)$$

Після перетворень в формулі (23) отримуємо:

$$P_{\phi} = 2\pi \cdot \left(\frac{r_{II}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right)^2 \cdot \sigma_{s1} \left\{ \left[\frac{p+q}{\sigma_{s1}} \sin \frac{\alpha}{2} + 1 + \frac{1}{2\mu} \right] \times \left[\left(1 + \frac{\mu\alpha}{2 \ln \frac{R_3}{r_n}} \right) \frac{\sin^2 \frac{\alpha}{2}}{2} - \frac{\mu}{8 \ln \frac{R_3}{r_n}} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) \right] - \frac{\sin^2 \frac{\alpha}{2}}{4\mu} \right\}. \quad (25)$$

В рівнянні (25) зусилля залежить від кута α , причому окремі складові збільшуються, а інші зменшуються. Тому може бути визначене оптимальне значення кута α_{opt} , яке забезпечує мінімальну величину зусилля видавлювання P_{ϕ} .

Для врахування зміцнення використовуємо відому апроксимацію діаграми істинних напружень [8]:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_{uu}} \left(\frac{\psi}{\psi_{uu}} \right)^{\frac{\psi_{uu}}{1 - \psi_{uu}}}, \quad (26)$$

де σ_B – межа міцності сталі, ψ_{uu} – відносне потоншення, яке відповідає моменту утворення шийки на зразку при випробуванні на розтяг, ψ – поточне значення відносного потоншення.

В якості відносного потоншення ψ беремо середнє значення його в осередку деформації:

$$\psi^{cp} = \frac{R_H \cdot \alpha - R_B \cdot \alpha}{2R_H \cdot \alpha} = \frac{R_H - R_B}{2R_H}. \quad (27)$$

Використаємо вирази для радіусів R_H і R_B (24). Тоді з (27) отримуємо:

$$\psi^{cp} = \frac{r_{II}}{2R_3}. \quad (28)$$

Підставляємо (28) в (26) і знаходимо середнє значення істинного напруження σ_{s1}^{cp} в осередку деформації:

$$\sigma_{s1}^{cp} = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_u} \left(\frac{r_{III}}{2R_3 \cdot \psi_u} \right)^{\frac{\psi_u}{1 - \psi_u}}. \quad (29)$$

Значення σ_{s1}^{cp} необхідно підставити в формули для визначення зусилля (25), напружень σ_p (20) і q (6). В виразі (6) $\sigma_{s2} = \sigma_{s1}$.

За отриманими формулами для зусилля видавлювання (30) та нормальних напружень на пуансоні (31) проведемо розрахунок видавлювання порожнини матриці з сталі Р6М5 сферичним пуансоном в умовах дії протитиску на заготовку. Для розрахунку задавали всі вихідні параметри: $\sigma_B = 620$ МПа – межа міцності; $\psi_{ш} = 0,4$ – відносне потоншення; $\mu = 0,08$ – коефіцієнт тертя; $R_3 = 47,5$ мм; $r_n = 31$ мм. Максимальне значення протитиску на заготовку $p = 700$ МПа. Кут $\alpha = 60$ градусів. Розрахункове питоме зусилля q , яке виникає в перерізі стінки визначаємо за формулою (6), і при заданих параметрах складає 530,2 МПа.

Розраховане середнє значення істинного напруження по формулі (29) складає 902 МПа. Тоді величина зусилля видавлювання $P_\partial = 7,15$ МН, а значення σ_p по формулі (20) при $\theta = 0$, $\theta = \alpha/4 = 15^\circ$ та $\theta = \alpha/2 = 30^\circ$ відповідно склали 2220, 1896 та 1517 МПа.

Перевірка адекватності отриманих результатів інженерним методом проводилась за допомогою математичного моделювання методом кінцевих елементів (МСЕ) та експериментальним шляхом.

Було проведено моделювання процесу видавлювання сферичним пуансоном за умови дії протитиску на заготовку. Використаний пакет програм, який створено на кафедрі МПМ та РП НТУУ «КПІ». Пакет дозволяє визначити пружно-пластичний стан металу при деформуванні з вихідного стану заготовки до отримання кінцевої форми виробу з урахуванням основних параметрів, які впливають на холодне видавлювання та розвантаження після пластичної деформації, що дозволяє визначити кінцеві розміри заготовки після видавлювання.

Процес видавлювання порожнини матриці в заготовці зі сталі Р6М5 розглядали як віссиметричну задачу (рис. 3). Заготовка 1 встановлюється в контейнер 2 на деформуючий пуансон 3. Зусилля видавлювання P_∂ прикладається за допомогою пуансона 4. Властивості металу вихідної заготовки у відпаленому стані: модуль Юнга $2,1 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона 0,33, умовна межа течії $\sigma_{0,2} = 300$ МПа. Істинні напруження визначались як функція $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}, T)$ (тут σ_s – істинне напруження, ε_i – інтенсивність деформацій, $\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформації, T – температура). Для врахування тертя на контактуючих поверхнях задавали коефіцієнт тертя $\mu = 0,08$. Деформуючий інструмент вважався абсолютно жорстким.

Моделювання розподіляли на певну кількість кроків навантаження. Навантаження задавали у вигляді покрокових переміщень $u_0 = 0,2$ мм пуансона 4. Величина протитиску в процесі видавлювання була змінна і залежала від зусилля P_∂ .

Розрахункова залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона показана на рис. 4. Максимальне значення зусилля видавлювання в кінці ходу складало 691 кН.

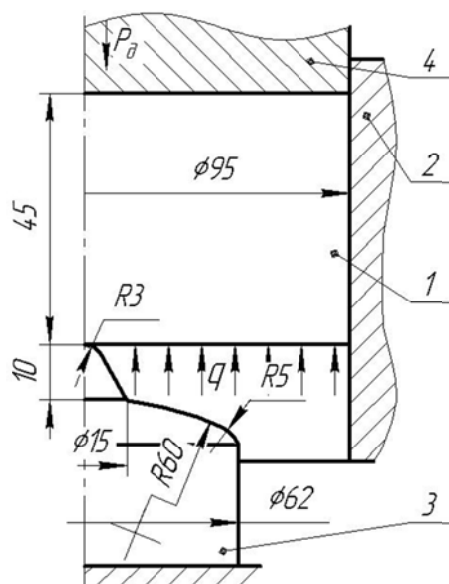


Рис. 3. Розрахункова схема видавлювання порожнини матриці в умовах дії протитиску на вільну поверхню заготовки

Зміна величини протитиску q від переміщення пуансона показана на рис. 5. Максимальне значення протитиску в кінці видавлювання склало 680 МПа.

Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності ψ по об'єму здеформованого металу показано на рис. 6, максимальне значення $\psi = 0,8$.

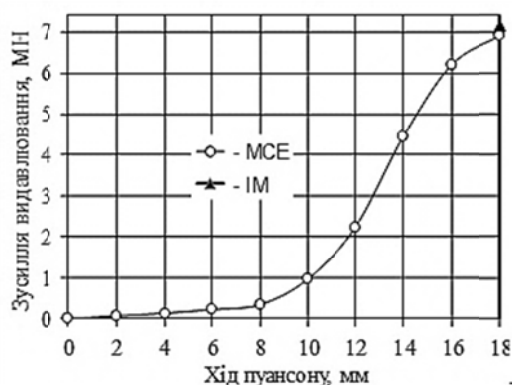


Рис. 4. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону

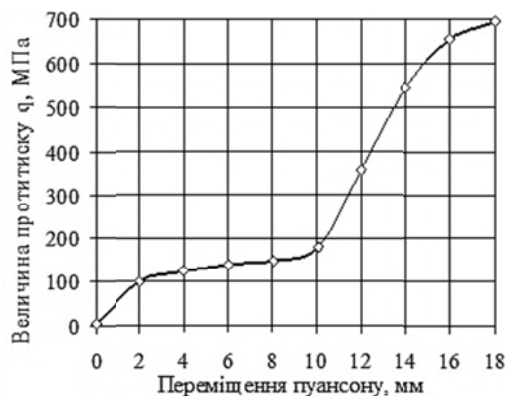


Рис. 5. Залежність протитиску від переміщення пуансону

На рис. 7 показано розподіл інтенсивності деформації ϵ_i та інтенсивності напружень σ_i по об'єму здеформованої заготовки. По розподілу інтенсивності деформації ϵ_i (рис. 7, а) можна оцінити проробку структури металу холодною пластичною деформацією. Інтенсивна проробка розповсюджується на третину заготовки по висоті. Тим самим створюється відповідна макроструктура в заготовці для підвищення стійкості порожнин при експлуатації. Розподіл σ_i (рис. 7, б), визначає розповсюдження осередку деформації та величину зміцнення величину зміцнення металу в здеформованій заготовці.

Осередок деформації розповсюджується на всю висоту по вісі заготовки. За рахунок зміцнення здеформованого металу $\sigma_i = 670$ МПа на нижній межі осередку деформації і $\sigma_i = 1500$ МПа на верхній межі.

Для проектування штампового оснащення для процесу видавлювання необхідно знати величини питомих зусиль на деформуючому інструмент. Величини питомих зусиль можна визначити по розподілу нормальних напружень на поверхнях заготовки, що контактують з інструментом.

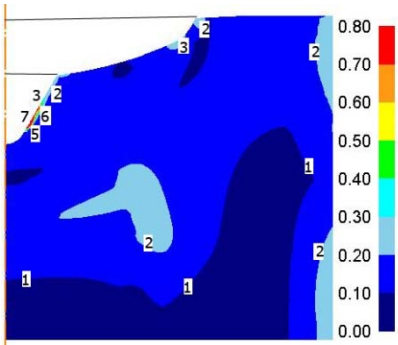
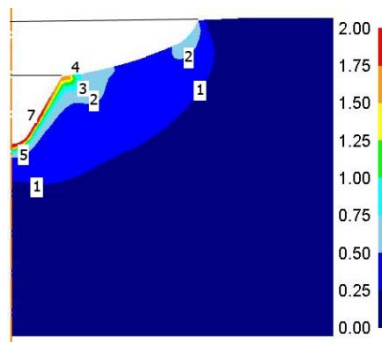
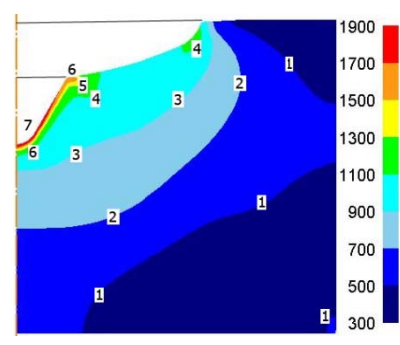


Рис. 6. Розподіл ресурсу пластичності ψ по об'єму zdeформованого металу



а



б

Рис. 7. Розподіл інтенсивності деформації ϵ_i (а) та розподіл інтенсивності напружень σ_i (б) по об'єму zdeформованої заготовки

Розподіл радіальних напружень σ_r по висоті поверхні заготовки, яка контактує з контейнером показаний на рис. 8. Максимальне значення радіальних напружень по абсолютній величині на стінці контейнера склало 1550 МПа. На рис. 9 наведений розподіл нормальних напружень σ_n по радіусу поверхні деформуючого пуансона. З характеру розподілу та геометрії пуансону (див. рис. 3) видно, що на сферичній поверхні пуансона діють напруження максимальною величиною $\sigma_n = 2700$ МПа. Однак схема видавлювання, завдяки дії протитиску на поверхню пуансона, забезпечує їх раціональну стійкість. Розподіл осьових напружень σ_z на виштовхувачі показано на рис. 10, де максимальне значення по абсолютній величині на вісі виштовхувача досягає 1900 МПа. Розподіл напружень на робочій поверхні інструменту дає можливість вибрати матеріал для пуансонів та кількість бандажів матриці.

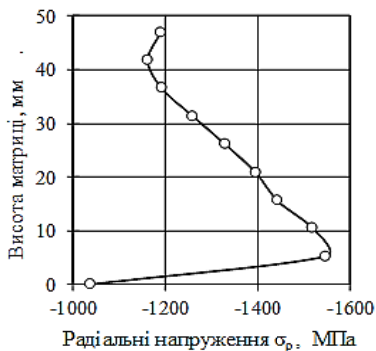


Рис. 8. Розподіл радіальних напружень σ_r в стінці матриці

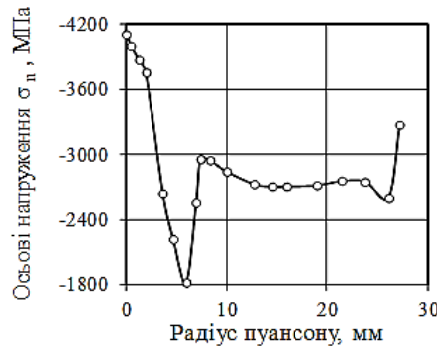


Рис. 9. Розподіл нормальних напружень σ_n на пуансоні

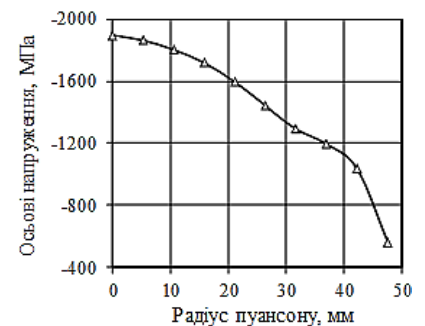


Рис. 10. Розподіл осьових напружень σ_z на виштовхувачі

Було проведено експериментальне дослідження видавлювання порожнин матриць в умовах дії протитиску на гідравлічному пресі ПО443 зусиллям 20 МН. На рис. 11 зображено деформуючий пуансон. Заготовки порожнин матриць зі сталі Р6М5, які отримані холодним видавлюванням з протитиском, показано на рис. 12.



Рис. 11. Деформуючий пуансон для видавлювання порожнин



Рис. 12. Заготовки порожнин матриць зі сталі Р6М5, які отримані видавлюванням

ВИСНОВКИ

Інженерним методом вирішена задача холодного видавлювання порожнин сферичним пуансоном в умовах дії протитиску на вільну поверхню заготовки. При рішенні враховано тертя, зміцнення та дія протитиску. Інженерним методом визначене зусилля видавлювання сферичної порожнини із сталі Р6М5, яке склало 7,15 МН, та нормальні напруження на пуансоні при $\theta = 0$, $\theta = \alpha/4 = 15^\circ$ та $\theta = \alpha/2 = 30^\circ$, значення яких відповідно складають 2220, 1896 та 1517 МПа.

МСЕ проведений чисельний експеримент видавлювання сферичної порожнини в заготовках зі сталі Р6М5. Визначена залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона. Максимальне значення зусилля видавлювання досягає 6,91 МН (величина по ІМ 7,1 МН). Також отримані: точний розподіл нормальних напружень на деформуючому інструменті, кінцева геометрія заготовки, інтенсивності деформацій і напружень по об'єму здеформованого металу. Максимальне значення нормальних напружень на пуансоні при вирішенні задачі МСЕ склало 2700 МПа. Встановлені області інтенсивної проробки структури металу холодною пластичною деформацією в заготовці та зміцнення здеформованого металу для підвищення стійкості матриць.

Проведено експериментальні роботи по видавлюванню з протитиском порожнин матриць зі сталі Р6М5

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. Х. Л. Пью. – М. : Изд-во «Мир», 1973. – 296 с.
4. Уральський В. И. *Деформации металлов жидкостью высокого давления* / В. И. Уральський // Уральський В. И., Плахотин В. С., Шефтель Н. И. 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 формующих полостей штампов и пресс-форм* / Черный Ю. Ф., Шмальц П. Е., Шмальц Н. А. и др. // *Физика и техника высоких давлений*. – 1982. – Вып. 9. – С. 14–18.
7. 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 Є. М.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – Опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.
8. Сторожев М. В. *Теория обработки металлов давлением* / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
9. Степанский Л. Г. *Расчёты процессов обработки металлов давлением* / Л. Г. Степанский. – Машиностроение, 1979. – 215 с.

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

Піманов В. В. – аспірант НТУУ «КПІ».

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

E-mail: K_ OMD@ukr.net; pimanov@ukr.net