

Умовно розділяємо осередок на два об'єми: перший - циліндричний діаметром $D=2r_n$ та висотою h , в якому деформація аналогічна осадженню з протитиском від другого об'єму, та другий – кільцевий висотою h і товщиною, яка дорівнює товщині виробу S .

Спочатку розглянемо другий об'єм. Приймаємо допущення, що умови деформування близькі до умов плоскої деформації, так як розглядаємо тонку стінку (видавлювання з високими ступенями деформації) і напруження $\sigma_\rho = \sigma_\theta$.

Умова пластичності для вказаного об'єму:

$$\sigma_{\rho 2} - \sigma_{\theta 2} = -\sigma_s \quad (1)$$

Визначимо розподіл дотичних напружень τ_{pz2} в другому об'ємі. Оскільки матриця зміщується при видавлюванні з розтягом з однаковою швидкістю зі стінкою виробу, то на контактній поверхні між матрицею і заготовкою дотичні напруження τ_{pz2} дорівнюють нулю. На межі між 1 та 2 об'ємами виникає зсув, тому згідно з [8]

приймаємо напруження зсуву $\tau_s = \frac{\sigma_s}{2}$.

Граничні умови для τ_{pz2} : при $\rho = R_3 - \tau_{pz2} = 0$, при $\rho = r_n = \tau_{pz2} = -\tau_s = -\frac{\sigma_s}{2}$

Тоді отримуємо таку залежність:

$$\tau_{pz2} = -\frac{\sigma_s}{2} \frac{(R_3 - \rho)}{(R_3 - r_n)} \quad (2)$$

Рівняння рівноваги для другого об'єму при вказаних допущеннях має вигляд:

$$\frac{d\sigma_{z2}}{dz} + \frac{d\tau_{pz2}}{d\rho} = 0 \quad (3)$$

З урахуванням (2) переписемо (3):

$$d\sigma_{z2} = \frac{\sigma_s dz}{2(R_3 - r_n)} \quad (4)$$

Після інтегрування (4) отримуємо:

$$\sigma_{z2} = \frac{\sigma_s \cdot z}{2(R_3 - r_n)} + C \quad (5)$$

Довільну C знаходимо з граничних умов: на верхній границі осередку деформації при $z=h$, напруження $\sigma_{z2} = \sigma^P$. Тут σ^P - розтягуюче напруження, яке виникає від прикладання зусилля P до бурта заготовки.

З виразу (5) знаходимо:

$$C = -\frac{\sigma_s h}{2(R_3 - r_n)} + \sigma^P \quad (6)$$

Кінцева формула для визначення σ_{z2} має вигляд

$$\sigma_{z2} = -\sigma_s \left(\frac{h-z}{2(R_3 - r_n)} - \frac{\sigma^P}{\sigma_s} \right) \quad (7)$$

З умови пластичності (1) знаходимо $\sigma_{\rho 2}$:

$$\sigma_{\rho 2} = -\sigma_s + \sigma_z = -\sigma_s \left(1 + \frac{h-z}{2(R_3 - r_n)} - \frac{\sigma^P}{\sigma_s} \right) \quad (8)$$

Величина напруження $\sigma_{\rho 2}$ змінна по координаті Z . Для спрощення рішення знайдемо середнє значення $\sigma_{\rho 2}^{cp}$ по висоті осередку пластичної деформації

$$\sigma_{\rho 2}^{cp} = \frac{\sigma_{\rho 2, npi.z=0} + \sigma_{\rho 2, npi.z=h}}{2} = -\sigma_s \left(1 + \frac{h}{4(R_3 - r_n)} - \frac{\sigma^P}{\sigma_s} \right) \quad (9)$$

Переходимо до аналізу 1-ого об'єму. Розподіл дотичних напружень знаходимо, використовуючи граничні умови:

$\tau_{pz1} = -\tau_k = -\frac{\sigma_s}{2}$, при $z=h$ і $\tau_{pz1} = 0$, при $z=0$. Тоді:

$$\tau_{pz1} = -\frac{\sigma_s z}{2h} \quad (10)$$

Оскільки перший об'єм деформується осаджуванням в умовах протитиску зі сторони другого об'єму, то допускаємо, що $\sigma_{\rho 1} = \sigma_{\theta 1}$. Тоді рівняння рівноваги для першого об'єму:

$$\frac{d\sigma_{p1}}{dp} + \frac{d\tau_{pz1}}{dz} = 0 \quad (11)$$

З урахуванням (10) після інтегрування (11) отримуємо:

$$\sigma_{p1} = \frac{\sigma_s p}{2h} + C \quad (12)$$

Довільну постійну C знаходимо з граничних умов при $\rho = r_n$, напруження $\sigma_{p1} = \sigma_{p2}^{cp}$. Тоді:

$$C = -\sigma_s \frac{r_n}{2h} + \sigma_{p2}^{cp} \quad (13)$$

Кінцевий вираз для σ_{p1} має вигляд:

$$\sigma_{p1} = -\sigma_s \left(1 + \frac{r_n - p}{2h} + \frac{h}{4(R_3 - r_n)} - \frac{\sigma^P}{\sigma_s} \right) \quad (14)$$

Умова пластичності для 1-ого об'єму має вигляд:

$$\sigma_{z1} - \sigma_{p1} = -\sigma_s \quad (15)$$

З умови пластичності (15) знаходимо σ_{z1} , враховуючи (14)

$$\sigma_{z1} = -\sigma_s + \sigma_{p1} = -\sigma_s \left(2 + \frac{r_n - p}{2h} + \frac{h}{4(R_3 - r_n)} - \frac{\sigma^P}{\sigma_s} \right) \quad (16)$$

Зусилля на пуансоні P_∂ знаходимо по формулі:

$$\begin{aligned} P_\partial &= \int_0^{r_n} \int_0^{2\pi} |\sigma_{z1}| p dp d\theta = 2\pi \sigma_s \int_0^{r_n} \left(2 + \frac{r_n - p}{2h} + \frac{h}{4(R_3 - r_n)} - \frac{\sigma^P}{\sigma_s} \right) p dp = \\ &= \pi \sigma_s r_n^2 \left(2 + \frac{r_n}{6h} + \frac{h}{4(R_3 - r_n)} - \frac{\sigma^P}{\sigma_s} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Питоме зусилля p на пуансоні:

$$p = \frac{4P_\partial}{\pi \cdot r_n^2} = 4\sigma_s \left(2 + \frac{r_n}{6h} + \frac{h}{4(R_3 - r_n)} - \frac{\sigma^P}{\sigma_s} \right) \quad (18)$$

Якщо прийняти, що дійсним розмірам висоти осередку пластичної деформації, повинно відповідати мінімальне значення питомого зусилля, то отримуємо формулу для визначення висоти осередку деформації h з умови:

$$\frac{\partial p}{\partial h} = 0$$

Використовуючи формулу (18), знаходимо:

$$h = \sqrt{\frac{2}{3} r_n (R_3 - r_n)}$$

Висновок.

З використанням інженерного методу було отримано прості аналітичні вирази для визначення загального зусилля деформування та питомого зусилля на пуансоні при видавлюванні порожнистих виробів з високими ступенями деформації в умовах прикладання розтягуючого зусилля до заготовок, які дають змогу оцінити вплив розтягуючих зусиль на енергосилові параметри процесу. Зі збільшенням величини розтягуючих зусиль зменшується зусилля видавлювання. Отримана аналітична залежність для розрахунку розмірів осередку пластичної деформації.

Список літератури

1. Холодная объемная штамповка. Справочник. Под ред. Г.А. Навроцкого. М.: Машиностроение, 1973, - 496 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т.; т. 3. Холодная объемная штамповка/ Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. -384 с.
3. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксва, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; Под ред. Е.П. Унксва, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
4. Кудо Х., Чинозаки К. Холодное выдавливание с растяжением. - Экспресс-информация. Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства, 1973 г. №42. – С. 18-30.
5. Черный Ю.Ф., Каложный В.Л., Сабол С.Ф. Бондаренко А.В. Устройство для штамповки деталей А.С. СССР №1357111. – Оpubл. в Бюл. №45, 1987.
6. Каложный В.Л., Каложный О.В., Сабол С.Ф., Пиманов В.В. Розробка конструкції та розрахунок конструктивних параметрів штампу для холодного видавлювання сталевих порожнистих виробів. Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов, № 2(21)-2009, Краматорск, ДГМА. – С. 382-387.
7. Каложный В.Л., Сабол С.Ф., Каложный О.В., Запороженченко А.С. Визначення силових режимів видавлювання з розтягом сталевих порожнистих виробів. – Технологические системы. 2009, №2. - С. 70-77.
8. Попов Е.А. Некоторые варианты приближенного анализа операций обработки металлов давлением. В сб. «Машины и технология обработки металлов давлением», М.: Машиностроение, 1973, - С. 168-177.