



УДК 621.73.06-52

Калюжний В.Л., Сабол С.Ф., Калюжний О.В., Запорожченко А.С.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". Україна, Київ

**ВИЗНАЧЕННЯ СИЛОВИХ РЕЖИМІВ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ З РОЗТЯГОМ
СТАЛЬНИХ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ***Анотація*

Методом балансу потужностей проведений аналіз стаціонарної стадії процесу витискування з розтягуванням сталевих виробів з порожниною і ступінчастою зовнішньою поверхнею. Враховано тертя на контактуючих поверхнях металу з деформуючим інструментом, що переміщається, по нормальній напрузі у вогнищі

деформації, які визначені інженерним методом. Зміцнення пі холодної деформації розраховане по середній тангенціальній деформації. Одержані аналітичні залежності для визначення зусилля витискування. Розрахункові дані зусилля порівнюються з результатами моделювання методом кінцевих елементів.

Abstract

The power balance method analysis of the steady-flow tension extrusion process for producing hollow steel piece with stepped outer surface was carried out. The friction in the normal stress direction between stock piece contact surfaces and moving deforming instrument in the plastic deformation focus was considered and the normal stresses was determined with using the engineering method. The cold deformation strengthening was accounting by the average tangential deformation. Analytical dependence for determination of the extrusion was obtained. Design loads are compared with the finite element method modeling results.

Вступ

Холодне видавлювання — перспективний, ресурсозберігаючий та високопродуктивний процес металообробки для отримання точних деталей. Однак високі питомі зусилля, які необхідні для здійснення цього процесу приводять до зниження стійкості інструменту, а подекуди, до неможливості застосування холодного видавлювання для отримання деталей з важкодеформованих сталей. Існує кілька способів зниження зусиль деформування при видавлюванні порожнистих виробів. Відомий спосіб [1–2] зворотного видавлювання з "плаваючою" матрицею, при якому в процесі деформування матриця переміщується разом з стінкою деталі що деформується, при цьому спостерігалось зниження питомих зусиль процесу на 10–15%. Спосіб "диференційного видавлювання" [3], в якому розтягуючі напруження в стінці виробу при видавлюванні в нерухомій матриці створюються шляхом узгодженого переміщення пуансона та виштовхувача, що приводить до зниження питомих зусиль на пуансоні. Однак спосіб не знайшов широкого розповсюдження, тому що потребує для реалізації спеціалізоване обладнання або штампового оснащення складної конструкції. Суттєве зниження зусиль видавлювання (до 20%) забезпечує спосіб холодного видавлювання порожнистих виробів з прикладанням розтягуючі зусиль до бурта на стінці заготовки [4]. В цьому випадку при видавлюванні змінюється схема напружень в осередку деформації: схема всебічного нерівномірного стиску, яка має місце при традиційному видавлюванні, стає стисло-розтягнутою. Реалізація вказаного способу також вимагає застосу-

вання додаткових приводів і пристроїв для переміщення матриці або спеціалізованого обладнання, щоб забезпечити створення тягнучого зусилля за борт заготовки. Авторами було розроблено конструкцію штамп [5], яка відрізняється від існуючих використанням рідини високого тиску для створення при видавлюванні тягнучого зусилля за борт заготовки. Штмп може встановлюватися на універсальне пресове обладнання. На рис. 1 наведена конструкція штамп (зліва від вісі симетрії показаний вихідний стан перед видавлюванням, справа — в процесі видавлювання). Штмп містить матрицю 1, яка встановлена на опорі 2 з ущільненнями 3. В матриці розміщені виштовхувач 4, що приводиться в дію штовхачем 5. Вихідна заготовка з буртом 9 встановлюється на виштовхач 4. Резервуар 10 заповнюється рідиною, яка вільно проходить з порожнини 6 через канали 7 в порожнину 8. При опусканні плунжера 12 з пуансоном 11 ущільнення 13 перекривають доступ рідини в резервуар 10. Перед торканням торцем пуансона 11 заготовки 9 рідина пружно стискається до необхідного тиску для створення тягнучого зусилля P_T за борт заготовки при видавлюванні. Радіус порожнини 6 визначається радіусом бурта R_B заготовки. Радіус R_H порожнини 8 залежить від товщини стінки порожнистого виробу, щоб забезпечити переміщення матриці 1 за допомогою рідини, яка

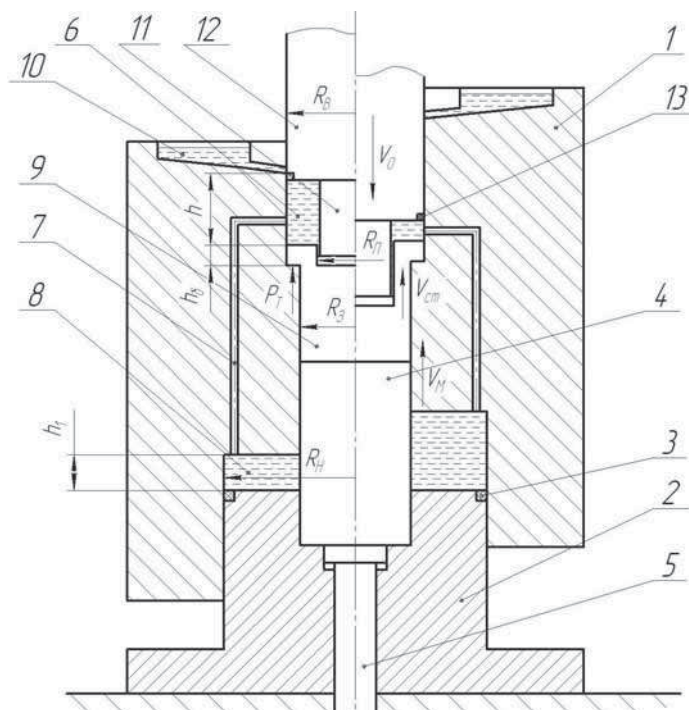


Рис. 1. Схема штамп для видавлювання з розтягом сталей порожнистих виробів

витискається з порожнини 6 в порожнину 8 при видавлюванні, з одночасним прикладанням тягнучого зусилля P_T до бурта заготовки.

Мета роботи

Методом балансу потужностей отримати залежності для визначення зусилля видавлювання з урахуванням основних факторів, які впливають на процес формозміни металу при видавлюванні порожнистих виробів з прикладанням тягнучого зусилля до заготовки.

Результати досліджень

Розглянемо основні складові потужностей зовнішніх і внутрішніх сил, які можуть мати місце при вісесиметричному видавлюванні з розтягом. Розрахункова схема показана на рис. 2. Пуансон 1, який має торець конічної форми з кутом α , діє на осередок деформації в заготовці, який обмежений радіусами r і R та створює стискаючі напруження σ_θ . Добуток вказаного напруження на площу конічної поверхні дає зовнішнє зусилля деформування P_d . Добуток зусилля P_d на швидкість пуансона v_0 визначає потужність зовнішніх сил.

Переміщення пуансона зумовлює зміщення частинок металу по пуансону і на зовнішній поверхні осередку деформації, яка контактує з матрицею 3. З урахуванням переміщення матриці 3 для створення тягнучого зусилля P_T за бурт заготовки, на названій поверхні утворюються активні сили тертя, які "допомагають" зміщенню частинок металу по поверхні заготовки в осередку деформації. Добуток сил тертя на величину відповідної швидкості частинок металу на контактуючих поверхнях визначає потужність сил тертя N_T . Однак переміщення матриці приводить до виникнення сил тертя на поверхні заготовки нижче границі осередку деформації радіусом R . Для подолання цих сил тертя треба затратити відповідну потужність. На подолання опору деформування в осередку деформації необхідно витратити потужність N_d . На верхній та нижній границі осередку деформації радіусом r і R проходить зміна траєкторії швидкостей частинок металу. Від зміни траєкторії виникають дотичні напруження $\tau_{\rho\theta}$ і сили зсуву. Тому необхідно визначати потужність на подолання зсуву N_3 . Потужність рівнодіючої сили від напружень σ_θ , яка прикладається до пуансона, позначимо через $N\sigma_\theta$. З урахуванням вище вказаного цю потужність необхідно затратити на: подолання опору деформування металу в осередку деформації (відповідна потужність N_d); подолання сил тертя на конічній поверхні пуансона (потужність цих сил тертя N_{TH}); потужність на подолання сил тертя на зовнішній поверхні осередку деформації, яка контактує з матрицею (потужність N_{TM}); подолання сил тертя на калібруючому пояску довжиною l_K пуансона (потужність N_{TL}); подолання сил зсуву на верхній границі та нижній границі осередку деформації (потужність $N_{3,r}$ і $N_{3,R}$). Тоді баланс потужностей сил, які необхідно прикласти до пуансона виглядає так:

$$N\sigma_\theta = N_d + N_{TH} + N_{TM} + N_{TL} + N_{3,r} + N_{3,R} \quad (1)$$

Для реалізації процесу видавлювання з розтягом необхідно створити за допомогою матриці тягнучу силу P_T до бурта заготовки. Оскільки тягнуча сила створюється в штампі без додаткових пристроїв то загальна потужність зовнішніх сил для реалізації процесу N_{3C} має наступні складові: потужність N_{PT} тягнучої сили P_T ; потужність N_{M3} сил тертя між заготовкою і матрицею нижче границі осередку

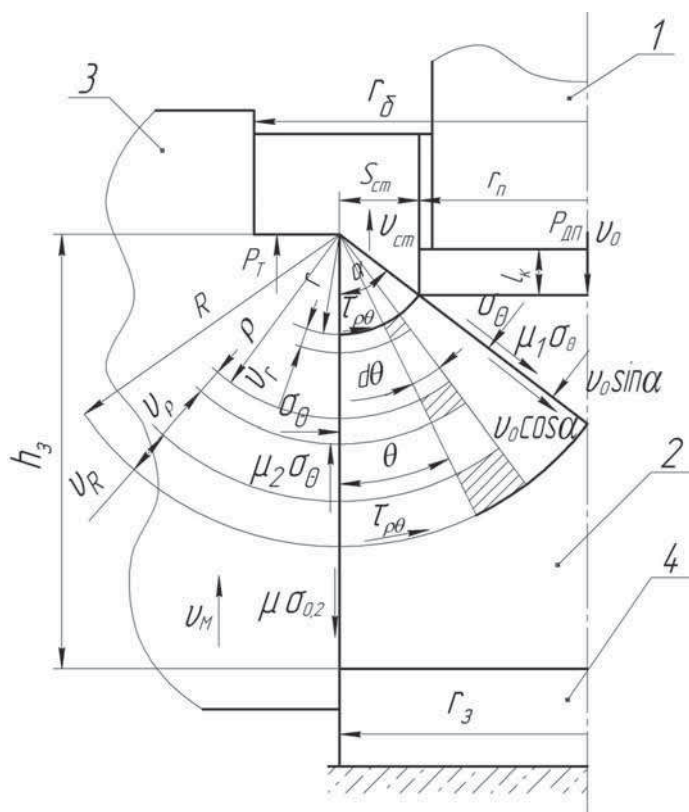
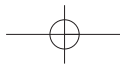


Рис. 2. Розрахункова схема зворотного видавлювання з розтягом (1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матриця, 4 – виштовхувач)



деформації радіусом R ; потужності $N\sigma_\theta$, яка наведена вище. Тоді повний баланс потужностей має вигляд:

$$N_{3C} = N_{PT} + N_{M3} + N\sigma_\theta \quad (2)$$

Визначимо компоненти швидкостей частинок металу. Для цього робимо допущення, що на усталеній стадії видавлювання в осередку деформації має місце плоскодеформований стан. Товщину заготовки і осередку деформації приймаємо за одиницю. Швидкість стінки виробу ϑ_{cm} можна знайти з умови постійності витрат металу в стінці і під пуансоном. Тоді швидкості частинок металу в радіальному напрямку ϑ_r і ϑ_ρ на довільному радіусі ρ також можна визначити з умови постійності витрат:

$$\vartheta_\rho = \vartheta_r \cdot \frac{r}{\rho}$$

По швидкості ϑ_ρ визначаємо швидкості деформації і інтенсивність швидкостей деформації:

$$\xi_\theta = \frac{\vartheta_\rho}{\rho} = \frac{r \cdot \vartheta_r}{\rho^2}; \quad \xi_\rho = \frac{\partial \vartheta_\rho}{\rho} = -\frac{r \cdot \vartheta_r}{\rho^2}; \quad (3)$$

$$\xi_{\rho\theta} = 0; \quad \xi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{4 \cdot \xi_\theta^2 + \xi_\rho^2 + \xi_\theta^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \xi_\theta$$

Потужність, яка витрачається на подолання опору деформування, визначається по формулі:

$$N\partial = \iiint \sigma_s \cdot \xi_i \cdot dV,$$

де: σ_s — напруження текучості, яке рахуємо як постійне, а в подальшому врахуємо зміцнення металу; $dV = \rho \cdot \alpha \cdot d\rho$ — елементарний об'єм, що деформується. Тоді:

$$N\partial = \sigma_s \frac{2}{\sqrt{3}} \vartheta_r \cdot \alpha \cdot r \int_r^R \frac{d\rho}{\rho} = \sigma_s \frac{2}{\sqrt{3}} \vartheta_r \cdot \alpha \cdot r \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (4)$$

Потужності на подолання сил тертя визначаються по формулі:

$$N_T = \iint_F \tau_K \cdot \vartheta_k \cdot dF, \quad (5)$$

де: τ_K — дотичне напруження на контактуючій поверхні, ϑ_k — результуюча швидкість частинок металу на контактуючій поверхні, dF — елементарна площа поверхні. Для знаходження τ_K необхідно визначити компоненти нормальних напружень на контактуючих поверхнях між металом і матрицею і пуансоном. Використовуємо інженерний метод для розрахунку напружень шляхом спільного вирішення диференціальних рівнянь рівноваги з наближеною умовою пластичності. Рівняння рівноваги без врахування дотичних напружень та умова пластичності мають вигляд:

$$\frac{\rho \cdot d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0; \quad \sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_s \quad (6)$$

Інтегруємо рівняння рівноваги з урахуванням умови пластичності та довільну постійну інтегрування знаходимо з граничної умови: при $\rho = r$ напруження $\sigma_\rho = \sigma^p$ (тут σ^p — розтягуюче напруження на верхній границі осередку деформації, яке виникає від тягнучого зусилля P_T за бурт заготовки). Тоді отримуємо кінцевий вираз для σ_ρ :

$$\sigma_\rho = -\sigma_s \ln \rho + \sigma^p + \sigma_s \ln r, \quad \text{або: } \sigma_\rho = -\sigma_s \ln \frac{\rho}{r} + \sigma^p \quad (7)$$

З умови пластичності знаходимо:

$$\sigma_\theta = \sigma_\rho - \sigma_s = -\sigma_s \ln \frac{\rho}{r} - \sigma_s + \sigma^p = -\sigma_s \left(\ln \frac{\rho}{r} + 1 \right) + \sigma^p \quad (8)$$

Тепер можна визначити дотичне напруження на контактуючій поверхні матриці:

$$\tau_K = \mu_1 \cdot \sigma_\theta, \quad (9)$$

де: μ_1 — коефіцієнт тертя на матриці.

При видавлюванні з розтягом в розробленому штампі матриця повинна рухатися в осьовому напрямку із швидкістю, яка дорівнює швидкості стінки виробу ϑ_{cm} . Одночасно маємо швидкості частинок металу на поверхні заготовки в осередку деформації в радіальному напрямку, який в даному випадку співпадає з осьовим. Тому величина відносної швидкості ϑ_{3M} частинок металу заготовки по матриці може бути визначена як різниця між швидкістю частинок заготовки в осьовому напрямку і швидкістю ϑ_{cm} матриці в цьому ж напрямку:

$$\vartheta_{3M} = \vartheta_\rho - \vartheta_{cm} \quad (10)$$

З урахуванням постійності витрат і геометричних співвідношень (див. рис. 2) знаходимо:

$$\vartheta_{cm} \cdot S_{cm} = \vartheta_r \cdot r \cdot \alpha; \quad S_{cm} = r \cdot \sin \alpha; \quad \vartheta_{cm} = \vartheta_r \frac{\alpha}{\sin \alpha} \quad (11)$$

Тоді:

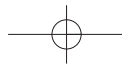
$$\vartheta_{3M} = \vartheta_\rho - \vartheta_r \frac{\alpha}{\sin \alpha} = \vartheta_r \left(\frac{r}{\rho} - \frac{\alpha}{\sin \alpha} \right) \quad (12)$$

Елементарна сила тертя в осередку деформації на матриці з урахуванням абсолютного значення σ_θ :

$$\begin{aligned} \mu_1 \cdot \sigma_\theta \cdot d\rho &= \mu_1 \cdot \left[\sigma_s \cdot \left(\ln \frac{\rho}{r} + 1 \right) - \sigma^p \right] \cdot d\rho = \\ &= \mu_1 \cdot \sigma_s \left(\ln \frac{\rho}{r} + 1 - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \right) \cdot d\rho \end{aligned} \quad (13)$$

Далі визначаємо потужність, яка витрачається на подолання сил тертя по матриці:





$$N_{TM} = \int_r^R \mu_1 \cdot \sigma_s \cdot \vartheta_r \cdot \left(\ln \frac{\rho}{r} + 1 - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \right) \cdot \left(\frac{r}{\rho} - \frac{\alpha}{\sin \alpha} \right) d\rho =$$

$$= \mu_1 \cdot \sigma_s \cdot \vartheta_r \left[\frac{1}{2} \cdot r \cdot \left(\ln \frac{R}{r} \right)^2 + \left(r - \frac{r \cdot \sigma^p}{\sigma_s} - \frac{R \cdot \alpha}{\sin \alpha} \right) \ln \frac{R}{r} + \right.$$

$$\left. + \frac{\alpha}{\sin \alpha} \frac{\sigma^p}{\sigma_s} (R - r) \right] \quad (14)$$

Визначимо потужність, яка витрачається на подолання сил тертя на пуансоні. Радіальна швидкість ϑ_{PI} точок пуансона відносно заготовки постійна і дорівнює:

$$\vartheta_{PI} = \vartheta_0 \cdot \cos \alpha \quad (15)$$

Тоді швидкість точок заготовки на контактуючій поверхні "заготовка-пуансон" дорівнює:

$$\vartheta_{3II} = \vartheta_p + \vartheta_{PI} = \vartheta_p + \vartheta_0 \cdot \cos \alpha \quad (16)$$

Якщо виразити швидкість ϑ_0 через ϑ_p з умови постійності витрат то, з урахуванням (16) і замінивши ϑ_r на ϑ_p , отримуємо:

$$\vartheta_{3II} = \vartheta_p + \frac{\vartheta_p \cdot \rho \cdot \alpha}{(R - r)} = \vartheta_p \left(1 + \frac{\rho \cdot \alpha \cdot \cos \alpha}{(R - r)} \right) =$$

$$= \vartheta_p \left(\frac{r}{\rho} + \frac{r \cdot \alpha \cdot \cos \alpha}{(R - r)} \right) \quad (17)$$

Елементарна сила тертя на пуансоні:

$$\mu_2 \cdot \sigma_\theta \cdot d\rho = \mu_2 \cdot \sigma_s \left(\ln \frac{\rho}{r} + 1 - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \right) \cdot d\rho, \quad (18)$$

де: μ_2 – коефіцієнт тертя на пуансоні. Визначаємо потужність, яка витрачається на подолання сил тертя по пуансону:

$$N_{TI} = \int_r^R \mu_2 \cdot \sigma_s \cdot \vartheta_r \cdot \left(\ln \frac{\rho}{r} + 1 - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \right) \times$$

$$\times \left(\frac{r}{\rho} + \frac{r \cdot \alpha \cdot \cos \alpha}{(R - r)} \right) d\rho = \mu_2 \cdot \sigma_s \cdot \vartheta_r \left[\frac{r}{2} \cdot \left(\ln \frac{R}{r} \right)^2 + \right.$$

$$\left. + r \cdot \left(1 - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \right) \ln \frac{R}{r} + r \cdot \alpha \cdot \cos \alpha \left(\frac{R}{R - r} \cdot \ln \frac{R}{r} - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \right) \right] \quad (19)$$

Тепер визначимо потужності, які витрачаються на подолання сил зсуву від дотичних напружень на границях осередку деформації (на радіусах r і R). Швидкість зсуву на границях осередку деформації радіусами r і R відповідно:

$$\vartheta_{3,r} = \vartheta_r \cdot \operatorname{tg} \theta; \vartheta_{3,R} = \vartheta_R \cdot \operatorname{tg} \theta = \vartheta_r \cdot \frac{r}{R} \cdot \operatorname{tg} \theta \quad (20)$$

Елементарні сили, які виникають від дії дотичних напружень на границях осередку деформації, визначаємо наступним чином:

$$\tau_3 \cdot F_{3r} = \frac{\sigma_s}{2} \cdot r \cdot d\theta; \tau_3 \cdot F_{3R} = \frac{\sigma_s}{2} \cdot R \cdot d\theta, \quad (21)$$

де: F_{3r} і F_{3R} – площі верхньої і нижньої границь осередку деформації, τ_3 – дотичне напруження зсуву, яке приймає значення $\tau_3 = \sigma_s/2$.

Тоді потужність зсуву на радіусах r і R відповідно:

$$N_{3,r} = \int_0^\alpha \frac{\sigma_s}{2} \vartheta_r \cdot r \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot d\theta = \frac{\sigma_s}{2} \vartheta_r \cdot r \cdot \ln |\cos \alpha|, \quad (22)$$

$$N_{3,R} = \int_0^\alpha \frac{\sigma_s}{2} \vartheta_r \cdot \frac{r}{R} \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot R \cdot d\theta = \frac{\sigma_s}{2} \vartheta_r \cdot r \cdot \ln |\cos \alpha| \quad (23)$$

Знаходимо потужність N_{TL} , яка витрачається на подолання сил тертя на калібруючому пояску висотою l_K пуансона. На вказаній поверхні маємо зустрічний рух пуансона із швидкістю ϑ_0 вниз і стінки металу вверх із швидкістю ϑ_{cm} . Тоді результуюче значення швидкості:

$$\vartheta_p = \vartheta_0 + \vartheta_{cm} = \vartheta_r \cdot \frac{\alpha}{\sin \alpha} + \vartheta_r \cdot \frac{r \cdot \alpha}{R - r}$$

Потужність N_{TL} визначаємо так:

$$N_{TL} = \tau_K \cdot \vartheta_p \cdot F_{KL} = \mu_2 \cdot \sigma_s \cdot l_K \cdot \vartheta_r \cdot \left(\frac{\alpha}{\sin \alpha} + \frac{r \cdot \alpha}{R - r} \right), \quad (24)$$

де: $\tau_K = \mu_2 \cdot \sigma_s$, $F_{KL} = 1 \cdot l_K$ – площа поверхні тертя. Далі визначимо потужність N_{σ_θ} , яку необхідно створити на пуансоні силами від тангенційних напружень σ_θ :

$$N_{\sigma_\theta} = \sigma_\theta \cdot (R - r) \cdot \vartheta_0 \cdot \sin \alpha \quad (25)$$

З урахуванням виразу балансу потужностей (1) отримуємо формулу:

$$\sigma_\theta \cdot (R - r) \cdot \vartheta_0 \cdot \sin \alpha = N\delta + N_{TM} + N_{TI} + N_{TL} + N_{3,r} + N_{3,R} \quad (26)$$

Використовуючи отримані формули потужностей, після перетворень і скорочень знаходимо:

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{R}{r} + \frac{\mu_2}{\alpha} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \left(\ln \frac{R}{r} \right)^2 + \right. \right.$$

$$\left. + \left(1 - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \right) \ln \frac{R}{r} + \alpha \cdot \cos \alpha \left(\frac{R}{R - r} \cdot \ln \frac{R}{r} - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \right) \right] +$$

$$\left. + \frac{\mu_1}{\alpha} \left[\frac{1}{2} \cdot \left(\ln \frac{R}{r} \right)^2 + \left(1 - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} - \frac{R \cdot \alpha}{r \cdot \sin \alpha} \right) \times \right. \right.$$

$$\left. \times \ln \frac{R}{r} + \frac{\alpha}{\sin \alpha} \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \right] +$$

$$\left. + \mu_2 \cdot l_K \cdot \left(\frac{1}{r \cdot \sin \alpha} + \frac{1}{R - r} \right) + \frac{1}{2 \cdot \alpha} \cdot \ln |\cos \alpha| \right\}$$

Радіуси r і R можна виразити через розміри заготовки і інструмента (див. рис. 2):



$$r = \frac{r_3 - r_{II}}{\sin \alpha}, \text{ а } R = \frac{r_3}{\sin \alpha} \quad (28)$$

Тоді зусилля деформування на пуансоні $P_{ДП}$ може бути записано з урахуванням (27) в наступному вигляді:

$$P_{ДП} = \pi \cdot \frac{r_{II}^2}{\sin \alpha} \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \frac{\mu_2}{\alpha} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \left(\ln \frac{R}{r} \right)^2 + \left(1 - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \ln \frac{R}{r} + \alpha \cdot \cos \alpha \left(\frac{R}{R-r} \cdot \ln \frac{R}{r} - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \right) \right] + \frac{\mu_1}{\alpha} \left[\frac{1}{2} \cdot \left(\ln \frac{R}{r} \right)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(1 - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} - \frac{R \cdot \alpha}{r \cdot \sin \alpha} \right) \ln \frac{R}{r} + \frac{\alpha}{\sin \alpha} \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \right] + \right. \quad (29) \\ \left. + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{R}{r} + \mu_2 \cdot l_K \cdot \left(\frac{1}{r \cdot \sin \alpha} + \frac{1}{R-r} \right) + \frac{1}{2 \cdot \alpha} \cdot \ln |\cos \alpha| \right\}$$

В (29) вираз представляє собою площу конічної поверхні робочого торця пуансона. Якщо коефіцієнти тертя на матриці і пуансоні однакові (μ) то формула (29) після перетворень має вигляд:

$$P_{ДП} = \pi \cdot \frac{r_{II}^2}{\sin \alpha} \cdot \sigma_s \cdot \left\{ \frac{\mu}{\alpha} \cdot \left[\left(\ln \frac{R}{r} \right)^2 + \left(2 - \frac{2 \cdot \sigma^p}{\sigma_s} - \frac{R \cdot \alpha}{r \cdot \sin \alpha} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \ln \frac{R}{r} + \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \left(\frac{R}{R-r} \cdot \ln \frac{R}{r} - \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \right) + \frac{\alpha}{\sin \alpha} \frac{\sigma^p}{\sigma_s} \cdot \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \right] \right. \\ \left. + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{R}{r} + \mu \cdot l_K \cdot \left(\frac{1}{r \cdot \sin \alpha} + \frac{1}{R-r} \right) + \frac{1}{2 \cdot \alpha} \cdot \ln |\cos \alpha| \right\} \quad (30)$$

В формулі для зусилля $P_{ДП}$ видно, що із збільшенням кута пуансона α окремі складові зменшуються, а другі збільшуються. Тому можна передбачити, що при деяких значеннях кута зусилля буде мінімальним. Вказане в подальшому встановимо розрахунковим шляхом. Отриманий вираз для зусилля $P_{ДП}$ не враховує зміцнення. Візьмемо відому апроксимацію діаграми істинних напружень в вигляді:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{1 - \Psi_u} \left(\frac{\Psi}{\Psi_u} \right)^{\frac{\Psi_u}{1 - \Psi_u}}, \quad (31)$$

де: σ_B — границя міцності, Ψ — текуче значення відносної деформації другого виду, Ψ_u — відносне зменшення площі поперечного перерізу в момент утворення шийки.

Для врахування зміцнення відносно деформацію звуження ψ по осередку деформації беремо як середню тангенційну деформацію ε_θ . Довжина дуги верхньої границі осередку деформації $R \cdot \alpha$, нижньої — $r \cdot \alpha$. Тоді:

$$\varepsilon_\theta = \Psi = \frac{R \cdot \alpha - r \cdot \alpha}{2 \cdot R \cdot \alpha} = \frac{1}{2} - \frac{r}{2 \cdot R} = \frac{1}{2} - \frac{r_3 - r_{II}}{2 \cdot r_3} = \frac{r_{II}}{2 \cdot r_3} \quad (32)$$

Тоді:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{1 - \Psi_u} \left(\frac{r_{II}}{2r_3 \cdot \Psi_u} \right)^{\frac{\Psi_u}{1 - \Psi_u}} \quad (33)$$

Якщо підставити σ_s з (33) в (30) то буде враховане зміцнення при холодній пластичній деформації.

Далі визначимо потужності, які входять в рівняння (2). Тягучу силу за бурт заготовки визначаємо по розтягуючому напруженню σ^p в стінці виробу:

$$P_T = \sigma^p \cdot \pi \cdot (R_6^2 - R_3^2) \quad (34)$$

Тоді потужність N_{PT} тягучої сили P_T за бурт заготовки:

$$N_{PT} = P_T \cdot \vartheta_{cm} = \sigma^p \cdot \pi \cdot \vartheta_0 \frac{(r_6^2 - r_3^2) r_{II}^2}{\sin \alpha \cdot (r_3^2 - r_{II}^2)} \quad (35)$$

В виразі (35) швидкість стінки ϑ_{cm} визначена через швидкість пуансона ϑ_0 .

По аналогії з визначенням потужності N_{TL} знаходимо потужність N_{M3} :

$$N_{M3} = \mu_2 \cdot \sigma_{0,2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \vartheta_0 \frac{r_{II}^2 \cdot r_3 \cdot (h_3 - R)}{\sin \alpha \cdot (r_3^2 - r_{II}^2)} \quad (36)$$

де: $\sigma_{0,2}$ — умовна межа текучості вихідного стану металу. Тоді отримуємо формулу для визначення повного зусилля процесу видавлювання $P_{ПВ}$ для вибору обладнання:

$$P_{ПВ} = \sigma^p \cdot \pi \cdot \frac{(r_6^2 - r_3^2) r_{II}^2}{\sin \alpha \cdot (r_3^2 - r_{II}^2)} + \\ + \mu_2 \cdot \sigma_{0,2} \frac{r_{II}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_3 \cdot (h_3 - R)}{\sin \alpha \cdot (r_3^2 - r_{II}^2)} + P_{ДП} \quad (37)$$

Наведемо результати моделювання процесу видавлювання порожнистих виробів за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ) і пакету програм, який створений на кафедрі МПМ та РП НТУУ "КПІ" [6], і порівняємо з даними зусилля видавлювання на пуансоні, які отримані по формулі (30) для $P_{ДП}$, що визначена методом балансу потужностей (МБП). Вихідна заготовка із сталі 20 (в силу симетрії показана її половина) та zdeформована заготовка на усталеній стадії процесу видавлювання при моделюванні наведені на рис. 3. Моделюванням МСЕ враховані всі основні фактори, які мають місце в реальному процесі видавлювання: тертя на контактуючих поверхнях, зміцнення при холодній деформації, переміщення матриці і пуансона, прикладання

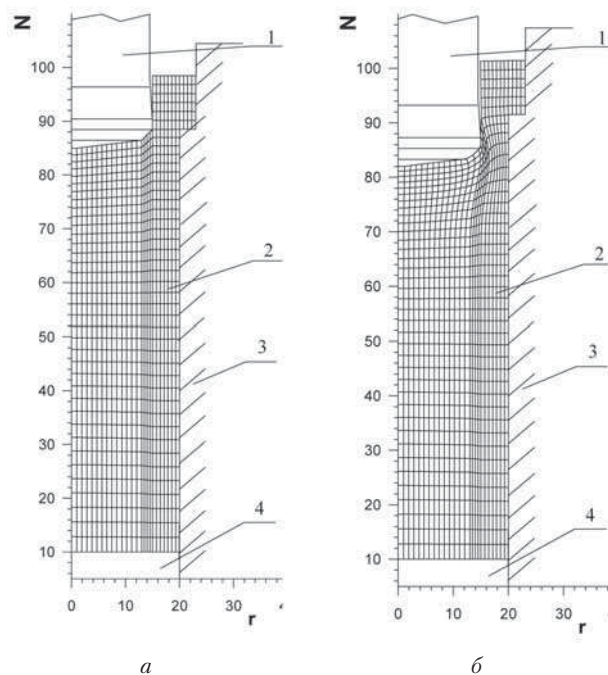


Рис. 3. Вихідна (а) та zdeформована (б) заготовки (розміри в міліметрах: 1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матриця, 4 – виштовхувач)

тягнутого зусилля до бурта заготовки, розвантаження zdeформованого металу після пластичної деформації. На рис. 4 показані результати видавлювання зі ступенем деформації $\varepsilon = 56\%$, які визначені по формулі (30) МБП при різних кутах конусу пуансона 2α і прикладанням тягнутого зусилля P_T , що створювало відносні розтягуючі напруження в стінці виробу $\sigma_Z/\sigma_{0,2} = 0,6$, а також наведені дані моделювання МСЕ і розрахунків МБП зусилля видавлювання з $\varepsilon = 70\%$ на пуансоні при прикладанні до бурта заготовки різних величин P_T і $\sigma_Z/\sigma_{0,2}$. Мінімальне значення зусилля отримане для пуансона з $2\alpha = 150^\circ$ (рис. 4, а). Різниця в знайдених значеннях зусилля МСЕ і МБП склала 0,07 МН (рис. 4, б). Таким чином, отриману формулу для визначення зусилля на пуансоні МБП можна рекомендувати для інженерних розрахунків процесів видавлювання порожнистих виробів з прикладанням тягнутого зусилля до заготовки.

Висновки

1. Розроблена схема штампа для холодного видавлювання сталених порожнистих виробів із ступінчастою зовнішньою поверхнею. Штмп простий по конструкції, дозволяє створювати тягнуче

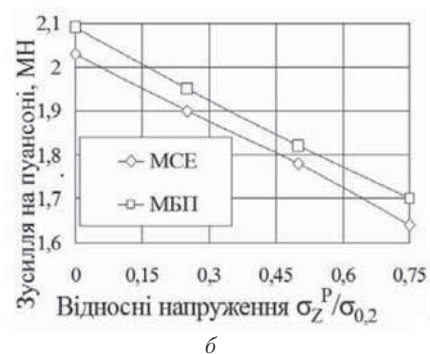
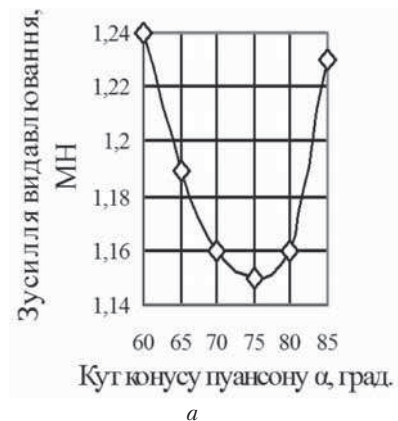


Рис. 4. Зусилля видавлювання, яке визначене МБП для пуансонів з різним кутом конуса (а) та МБП і МСЕ (б)

зусилля за борт заготовки без додаткових приводів і пристроїв, що зменшує зусилля видавлювання і підвищує стійкість пуансонів.

2. Методом балансу потужностей, який ініційований інженерним методом для визначення напружень в осередку деформації, проведений аналіз процесу видавлювання з розтягом з урахуванням тертя на контактуючих поверхнях і зміцнення металу при холодній деформації. Отримані залежності для визначення зусилля видавлювання на пуансоні та повного зусилля для реалізації процесу.

4. Порівняння даних моделювання процесу видавлювання з розтягом методом скінчених елементів і розрахунків по отриманим залежностям показали хорошу відповідність результатів.

Література

1. Можейко Ю.П., Розенталь Н.К. Способ выдавливания. А.С. СССР №174107. — Оpub. в Бюл. № 10, 1965.
2. Овчинников А.Г., Дмитриев А.М. Холодное выдавливание полых цилиндрических изделий с активными силами трения. — Кузнечно-штамповочное производство, 1981. — № 6. — С. 24–26.

3. *С.Ш. Яшаев.* Основы дифференцированного выдавливания. — Кузнечно-штамповочное производство, 1966 г. — № 9. — С. 4–6

4. *Кудо Х., Чинозакі К.* Холодное выдавливание с растяжением. — Экспресс-информация. Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства, 1973 г. № 42. — С. 18–30.

5. *Черный Ю.Ф., Калюжный В.Л., Сабоп С.Ф. Бондаренко А.В.* Устройство для штамповки деталей А.С. СССР №1357111. — Оpubл. в Бюл. № 45, 1987.

6. *Калюжный В.Л.* Расчетно-экспериментальный анализ силовых режимов и качества деталей при холодном прессовании деталей из стали 45 с разной степенью деформации. — Вісник двигунобудування, 2004. — № 1. — С. 139–144.