

УДК 621.7

РОЗРАХУНКОВИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПРЯМОГО І ЗВОРОТНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ТРУБЧАТОЇ ЗАГОТОВКИ

Сабол С.Ф., Піманов В.В., Коробко П.О.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Анотація: В роботі проведено порівняльний аналіз розрахунку процесу холодного об'ємного штампування, а саме комбінованого процесу прямого і зворотного видавлювання трубчастої заготовки, за допомогою аналітичного методу сумісного вирішення диференціальних рівнянь рівноваги із наближеною умовою пластичності та моделюванням вказаного процесу чисельним методом скінченних елементів. У роботі зазначені основні пункти розв'язку поставленої задачі методом сумісного вирішення диференціальних рівнянь рівноваги разом із умовою пластичності та описана постановка задачі у прикладному пакеті для моделювання процесу методом скінченних елементів. Робота описує відмінності у результатах аналітичного та чисельного розрахунків на приклади силових параметрів процесу комбінованого видавлювання, а також демонструє різницю у визначенні осередку деформації та пластичної течії металу. Аналіз отриманих результатів дозволив оцінити можливість застосування аналітичного методу для аналізу процесів обробки металів тиском для вирішення прикладних інженерних задач.

Ключові слова: холодне об'ємне штампування; теоретичний аналіз процесів ОМТ; метод скінченних елементів; комбіновані процеси ОМТ; видавлювання труби

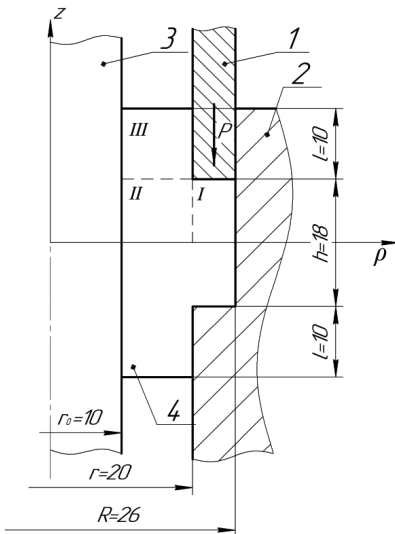


Рис. 1 Схема процесу прямого і зворотного видавлювання труби

виконуємо у середовищі Компас.

Сутність методу для теоретичного аналізу процесів ОМТ полягає в спільному вирішенні диференціальних рівнянь рівноваги разом із умовою пластичності.

Оскільки за наведеною схемою маємо вісесиметричну задачу, то диференціальні рівняння рівноваги (ДРР) мають вигляд [2]:

Метою роботи є порівняльний аналіз розрахунку силових параметрів комбінованого процесу прямого і зворотного видавлювання трубчастої заготовки за допомогою аналітичного методу сумісного вирішення диференціальних рівнянь рівноваги із наближеною умовою пластичності, а також чисельним моделюванням методом скінченних елементів. До силових параметрів відносять зусилля деформування та напруження на інструменті. Ці параметри є визначальними при проектуванні технологічного оснащення та економічному обґрунтуванні процесу, що розробляється [1].

На рис. 1 зображено схему комбінованого процесу прямого і зворотного видавлювання труби.

На рисунку показано пуансон 1, матрицю 2, оправку 3 та заготовку 4. Матеріал заготовки має межу текучості $\sigma_s = 200$ МПа. Фактор тертя по Зібелю приймаємо $\mu = 0,1$. Усі необхідні геометричні параметри показані на рис. 1. Побудову схем процесу та зображення об'ємів

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

а наближена умова пластичності набуває вигляду [2] (вважаємо $\sigma_\rho = \sigma_\theta$):

$$\sigma_\rho - \sigma_z = \pm \sigma_s \quad (2)$$

За схемою задачі розподіляємо об'єм заготовки на ряд об'ємів (рис.1) I-III до яких можемо застосувати умову вісесиметричної задачі. Для кожного об'єму (рис. 2) задаємо розподіл дотичних напружень. Залежність дотичних напружень від відповідної координати з урахуванням знаку вважаємо лінійною. Для поверхні контакту інструменту із заготовкою записуємо, як $\tau_{\kappa} = \mu \sigma_s$, а для поверхні зсуву між об'ємами $\tau_{z\kappa} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$. Для кожного об'єму записуємо рівняння рівноваги та наближену умову пластичності, звідки знаходимо невідомі складові напруження.

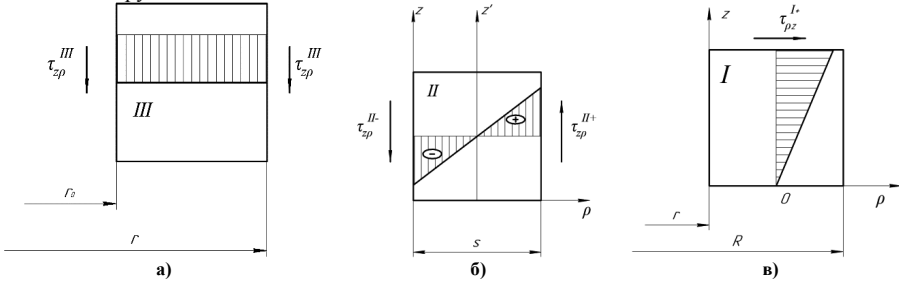


Рис. 2 Розподіл дотичних напружень в об'ємах заготовки: а) Шоб'єм; б) П об'єм; в) I об'єм.

Розрахунок починаємо із III об'єму, поступово рухаючись до I об'єму. В результаті розрахунку отримуємо формулу для визначення напруження σ_z у I об'ємі:

$$\sigma_z^{\square} = -2\sigma_s - \frac{2\mu\sigma_s}{h}\rho - \mu\sigma_s \frac{l}{r} + 2\mu\sigma_s \frac{r}{h} - \frac{\sigma_s h(3\mu r + \sqrt{3}(2r - r_0))}{6r(r_0 - r)} \quad (3)$$

Інтегруючи формулу (3) по площі контакту пуансона із заготовкою отримуємо вираз для визначення зусилля деформування:

$$\begin{aligned} P_d &= \int_F |\sigma_z^{\square}| d = \iint_{0^r}^{2\pi R} |\sigma_z^{\square}| \rho d\rho d\theta = \\ &= \iint_{0^r}^{2\pi R} \left| -2\sigma_s - \frac{2\mu\sigma_s}{h}\rho - \mu\sigma_s \frac{l}{r} + 2\mu\sigma_s \frac{r}{h} - \frac{\sigma_s h(3\mu r + \sqrt{3}(2r - r_0))}{6r(r_0 - r)} \right| \rho d\rho d\theta = \\ &= 2\pi\sigma_s \left(\left(-2\sigma_s - \mu\sigma_s \frac{l}{r} + 2\mu\sigma_s \frac{r}{h} - \frac{\sigma_s h(3\mu r + \sqrt{3}(2r - r_0))}{6r(r_0 - r)} \right) * \frac{\rho^2}{2} - \frac{2\mu\sigma_s \rho^3}{h} \right) \Bigg|_r^R = \\ &= 2\pi\sigma_s \left(\left(-2\sigma_s - \mu\sigma_s \frac{l}{r} + 2\mu\sigma_s \frac{r}{h} - \frac{\sigma_s h(3\mu r + \sqrt{3}(2r - r_0))}{6r(r_0 - r)} \right) * \frac{R^2 - r^2}{2} - \frac{2\mu\sigma_s R^3 - r^3}{h} \right) \quad (4) \end{aligned}$$

Отже, підставляючи вхідні дані у формулу (4), отримуємо:

$$P_d = 210,763 \text{ кН}$$

Наступним є розрахунок питомих зусиль на пуансоні. Знаючи розподіл нормальних напружень у I об'ємі (формула (3)) обчислюємо:

$$\sigma_z^{\square}(\rho = r) = -2\sigma_s - \frac{2\mu\sigma_s}{h}r - \mu\sigma_s \frac{l}{r} + 2\mu\sigma_s \frac{r}{h} - \frac{\sigma_s h (3\mu r + \sqrt{3}(2r - r_0))}{6r(r_0 - r)} = 236,115 \text{ МПа}$$

$$\sigma_z^{\square}(\rho = R) = -2\sigma_s - \frac{2\mu\sigma_s}{h}R - \mu\sigma_s \frac{l}{R} + 2\mu\sigma_s \frac{R}{h} - \frac{\sigma_s h (3\mu R + \sqrt{3}(2R - r_0))}{6R(r_0 - R)} = 249,449 \text{ МПа}$$

Оскільки в процесі аналітичного розрахунку була прийнята симетрія відносно осі ρ , то отримані значення силових параметрів потрібно збільшити вдвічі. Отже:

$$P_d = 421,5 \text{ кН}; \sigma_z^{\square}(\rho = r) = 472 \text{ МПа}; \sigma_z^{\square}(\rho = R) = 499 \text{ МПа}$$

Отримані результати аналітичного розрахунку порівнюємо його із результатами чисельного моделювання. Моделювання МСЕ проводимо у програмному середовищі DEFORM. Модель матеріалу заготовки вважимо жорстко пластичною із межею текучості $\sigma_s=200$ МПа. Постановка задачі вісесиметрична, геометрія інструменту і заготовки відповідно до рис.1. Критерієм зупинки встановлюємо переміщення інструменту на 0,003 мм. В результаті моделювання встановлено напружено-деформований стан в об'ємі заготовки, а також визначені нормальні напруження на інструменті і технологічне зусилля деформування заготовки.

В процесі моделювання МСЕ максимальне значення зусилля видавлювання P_d досягає 64 кН. Розподіл нормальних напружень на пуансоні зображено на рис.3.

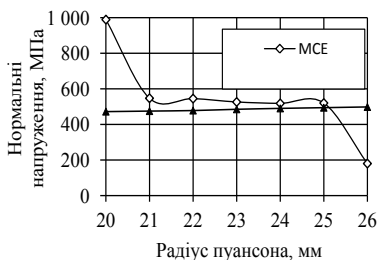


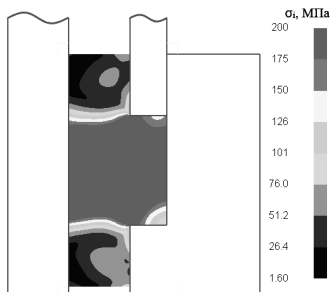
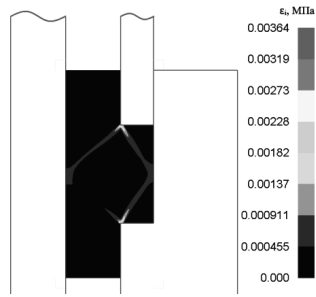
Рис.3 Розподіл нормальних напружень на пуансоні, МПа

Як, видно, із рисунку максимальне значення нормальних напружень 989 МПа концентрується на внутрішньому радіусі пуансона. На зовнішньому радіусі нормальні напруження спадають до значення 180 МПа - це пов'язано із тертям між заготовкою і матрицею. Порівнюючи отримані результати моделювання із результатами аналітичного розрахунку видно, що зведення розподілу дотичних напружень до лінійної схеми, використання наближеної умови пластичності та початкові припущення, щодо розподілу заготовки на об'ємі призвели до певної різниці між результатами аналітичного та чисельного розрахунків. Так, різниця між отриманими значеннями зусилля видавлювання розрахованими аналітичним методом і методом скінченних елементів складає близько 40 кН, що знаходиться в межах інженерної похибки. Із рис.3 видно, що значна різниця у визначенні нормальних напружень на пуансоні спостерігається лише у крайніх точках – на внутрішньому та зовнішньому радіусі. Найвні відмінності, також, у визначенні осередку деформації. Перехід матеріалу у пластичний стан визначаємо за інтенсивністю напружень σ_i (рис.4), а розповсюдження пластичної деформації за інтенсивністю деформацій ϵ_i (рис.5) [3].

Із рис.4 видно, що прийнята нами симетрія відносно осі ρ у аналітичному розрахунку (рис.1), підтверджується чисельним моделюванням, проте спостерігаються відмінності у течії металу. Так, із результатів чисельного моделювання видно, що видавлювання в зворотному напрямку не відбувається. Формування нижньої частини виконується за рахунок прямого видавлювання, а верхня частина формується за рахунок врізання пуансону у заготовку.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновки, що використання аналітичного методу для розрахунку процесів ОМТ забезпечує достатнє співпадіння з

результатами чисельного моделювання та може використовуватися для вирішення практичних задач технологічної підготовки виробництва, а також замінити використання високоартістичного програмного забезпечення.

Рис. 4 Інтенсивність напружень σ_i , МПаРис.5 Інтенсивність деформацій ϵ_i

Design analysis of the process of direct and reverse extrusion of a tubular billet

S. Sabol, V. Pimanov, P. Korobko

Abstract. In this paper, the calculation of the cold forging process, namely the process of direct and back extrusion of tubular billets, using one of the theoretical methods of analysis of metal forming processes is made. The accuracy of the results obtained was verified by comparison with the results of finite element simulation. The paper specifies the main points of solution of the problem by the method of combined solution of differential equilibrium equations along with the yield criterion and describes the setting of the problem in the application package for process modeling by finite element method. The work describes the differences in the results of the analytical and numerical calculations on the example of force parameters of the combined extrusion process, and demonstrates the difference in the definition of the deformation area and the plastic flow of the metal. The analysis of the obtained results allowed us to evaluate the possibility of using the analytical method for the analysis of metal forming processes to solve applied engineering problems.

Keywords: cold bulk forming; theoretical analysis of metal forming; finite element analysis; combined processes of metal forming; pipe extrusion.

Расчётный анализ процесса прямого и обратного выдавливания трубчатой заготовки

Сабол С.Ф., Пиманов В.В., Коробко П.А.

Аннотация. В этой работе проведен расчет процесса холодной объемной штамповки, а именно процесса прямого и обратного выдавливания трубчатой заготовки, с помощью одного из теоретических методов анализа процессов обработки металлов давлением. Точность полученных результатов была проверена путем сравнения с результатами моделирования методом конечных элементов. В работе указаны основные пункты решения поставленной задачи методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия вместе с условием пластичности и описана постановка задачи в прикладном пакете для моделирования процесса методом конечных элементов. Работа описывает различия в результатах аналитического и численного расчетов на примере силовых параметров процесса комбинированного выдавливания, а также демонстрирует разницу в определении очага деформации и пластического течения металла. Анализ полученных результатов позволил оценить возможность применения аналитического метода для анализа процессов обработки металлов давлением для решения прикладных инженерных задач.

Ключевые слова: холодная объемная штамповка; теоретический анализ процессов ОМД; метод конечных элементов; комбинированные процессы ОМД; выдавливание трубы.

Список літератури

1. Ковка и объемная штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. - М.: Машиностроение, 1987. - 384с.
2. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для студентов вузов, обучающихся по спец. "Машины и технология обработки металлов давлением". — Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. — 248 с.
3. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1977. — 423 с.