

УДК 621.7

## АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ХОЛОДНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ З ВИСТУПОМ НА ДОННІЙ ЧАСТИНІ ЗІ СТОРОНИ ПОРОЖНИНИ

Калюжний В.Л., Потятиник А.М., Руденко І.В.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

***Анотація.** Методом скінченних елементів проведено моделювання холодного зворотного видавлювання з низьковуглецевої сталі вісесиметричних порожнистих виробів з виступом на донній частині зі сторони порожнини та встановлені параметри для проектування технології. Визначені залежності зусилля видавлювання, зусилля виймання пуансона із zdeформованої заготовки від переміщення пуансона та зусилля виштовхування виробу із матриці від переміщення виштовхувача. При максимальному значенні зусилля видавлювання наведений розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях між zdeформованою заготовкою та деформуючим інструментом. З встановлені кінцеві форма і розміри виробу. Показані розподіли інтенсивності деформацій та компонент деформацій у zdeформованому металі виробу. Визначений тепловий ефект при холодному формоутворенні зворотним видавлюванням.*

***Ключові слова:** зворотне видавлювання, порожнистий виріб, метод скінченних елементів, зусилля і питоми зусилля, форма і розміри виробу, тепловий ефект, деформований стан.*

Технології і штампове оснащення для виготовлення вісесиметричних порожнистих виробів зворотним видавлюванням проектуються в основному на базі виробничого досвіду та експериментальних даних [1]. При цьому практично відсутні дані по формоутворенню таких виробів з виступом на донній частині зі сторони порожнини. Використання метода скінчених елементів (МСЕ) для теоретичного аналізу процесів холодного видавлювання дозволяє встановлювати дані для проектування технології та оснащення, які не потребують доопрацювання експериментальними роботами [2,3].

Метою роботи є встановлення шляхом моделювання з використанням МСЕ параметрів холодного зворотного видавлювання із низьковуглецевої сталі порожнистих виробів з виступом на донній частині зі сторони порожнини.

Для моделювання використана скінченно-елементна програма DEFORM. Метал заготовки вважався пружно-пластичним зі зміцненням, деформуючий інструмент – абсолютно жорстким. Використання такої моделі металу дозволяє визначити кінцеві форму і розміри виробу, а також виконати моделювання процесів виймання пуансона із zdeформованої заготовки та виштовхування її із матриці після видавлювання. Враховано вплив тертя по Кулону з коефіцієнтом тертя  $\mu=0,08$ . Швидкість деформування складала  $V_0=2$  мм/сек.

На рис. 1 показаний ескіз порожнистого виробу з виступом на донній частині зі сторони порожнини, який необхідно отримати холодним видавлюванням. Матеріал виробу – сталь 11ЮА. Крім форми виробу, при видавлюванні необхідно забезпечити задані властивості по висоті стінки. Розміри вихідної заготовки для видавлювання: діаметр  $D_0=48$  мм, висота  $H_0=30$  мм. Розміри пуансона прийняті по розмірах порожнини та виступу на дні, а розміри матриці – по розмірах зовнішньої поверхні виробу.

Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту та заготовки на різних стадіях формоутворення виробу зворотним видавлюванням наведені на рис. 2. На рис. 2а зображене положення на початку видавлювання. Вихідна заготовка 1 встановлена в матриці 2 і нижнім торцем спирається на конусну поверхню матриці. В циліндричній частині матриці встановлений виштовхувач 3. Зусилля деформування прикладають за допомогою пуансона 4. Положення в кінці видавлювання показане на рис. 2б. Після видавлювання проведений

розрахунок виймання пуансона із здеформованої заготовки (рис. 2в). При цьому заготовка залишається в матриці. Далі виконане моделювання виштовхування виробу із матриці. Положення після виштовхування приведені на рис. 2г.

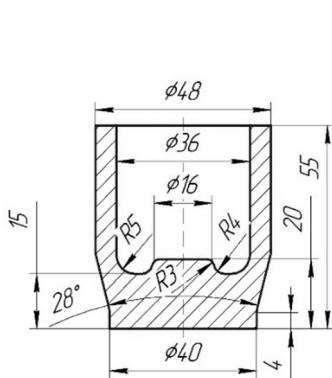


Рис. 1 - Ескіз порожнистого виробу з виступом на донній частині зі сторони порожнини

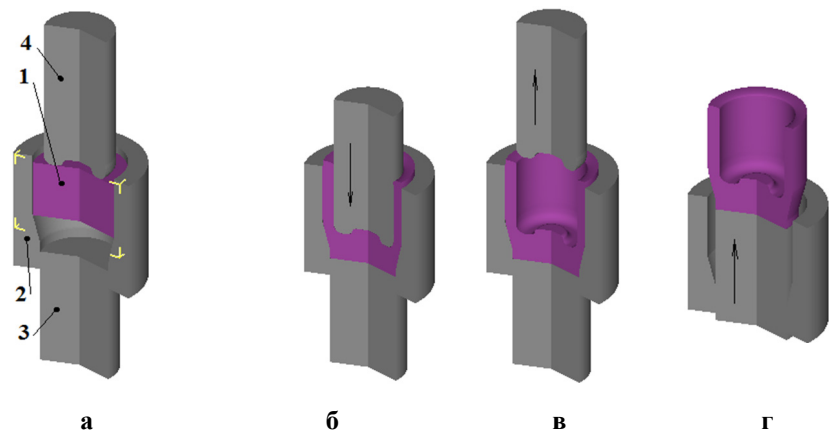


Рис. 2 - Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту на різних стадіях формоутворення виробу зворотним видавлюванням: а – на початку видавлювання, б – в кінці видавлювання, в – після виймання пуансона із здеформованої заготовки, г – після виштовхування виробу із матриці

Розрахунковим шляхом встановлені зусилля видавлювання, виймання пуансона із здеформованої заготовки та виштовхування її із матриці від переміщення відповідного деформуючого інструменту. На рис. 3 зображені силові режими формоутворення виробу. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона показана на рис. 3а. Зусилля спочатку зростає до величини 2200 кН, а в подальшому дещо зменшується. Найбільшої величини зусилля виймання пуансона із здеформованої заготовки досягає 22 кН на середині зворотного руху пуансона після видавлювання (рис. 2б). Зусилля на виштовхувачі при видаленні здеформованої заготовки із матриці має найбільше значення 36 кН на початку переміщення виштовхувача.

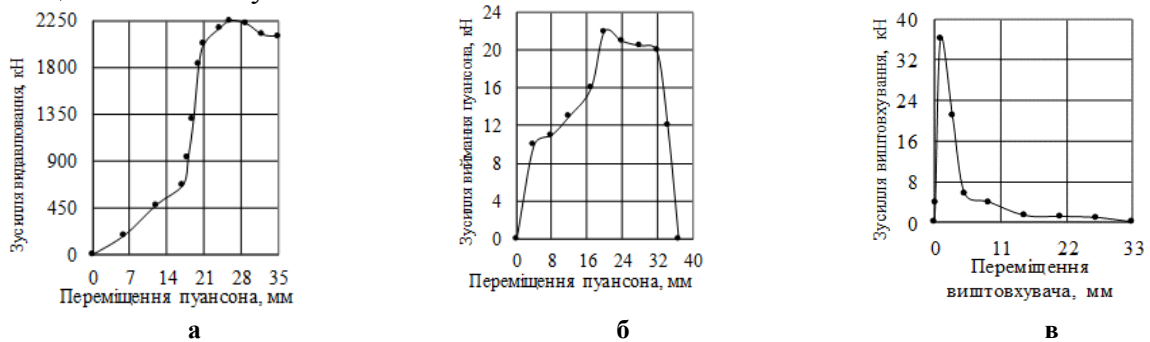


Рис. 3 - Силові режими формоутворення виробу: а – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона, б – залежність зусилля виймання пуансона із здеформованої заготовки від переміщення пуансона, в – залежність зусилля виштовхування виробу із матриці від переміщення виштовхувача

Питомі зусилля можна оцінити по розподілу нормальних напружень  $\sigma_n$  на контактуючих поверхнях здеформованої заготовки з інструментом. Розподіл таких напружень при максимальному значенні зусилля видавлювання зображений на рис. 4. Тут і в подальшому наведена половина здеформованої заготовки, тонкими лініями показаний деформуючий інструмент, а по осях розміри наведені в міліметрах.

Стадії формоутворення виробу та кінцеві форма і розміри виробу показані на рис. 5. На рис. 5а наведена стадія, коли металом заповнюється конусна частина матриці. При цьому

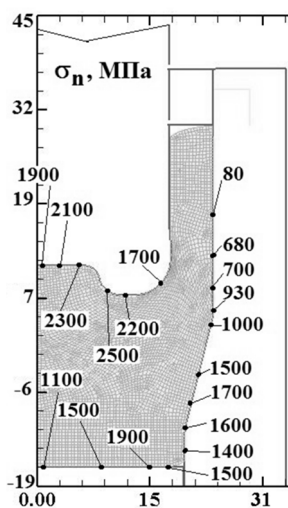


Рис - 4 - розподіли нормальних напружень на деформуючому інструменті

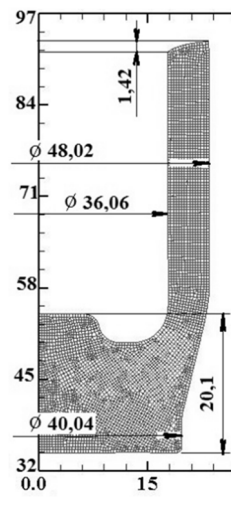
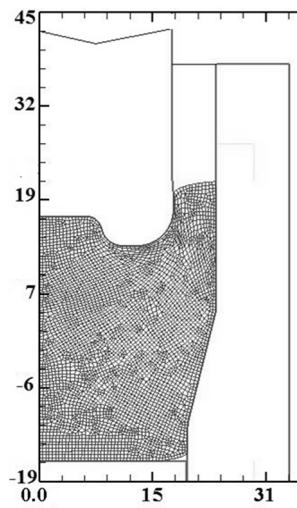
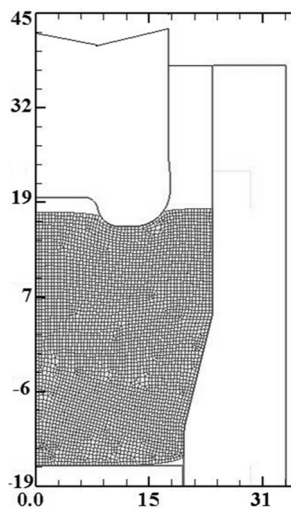


Рис. 5 - Стадії формоутворення виробу та кінцеві форма і розміри виробу: а – при заповненні конусу матриці, б – при заповненні впадини на пуансоні; в - форма і розміри виробу

зусилля видавлювання досягає величини 940 кН, а переміщення пуансона складає 18 мм. Виступ на донній частині утворюється при зусиллі видавлювання 2030 кН і переміщенні пуансона 21 мм (рис. 5б). На рис. 5в наведена кінцева форма і розміри виробу, що отримані з урахуванням пружної деформації.

Моделювання встановлений тепловий ефект та деформований стан металу при холодному видавлюванні. Розподіли температури у zdeформованих заготовках та розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  по об'єму виробу зображені на рис. 6. На рис. 6а представлений

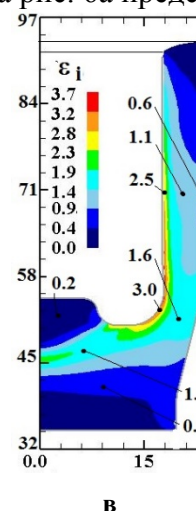
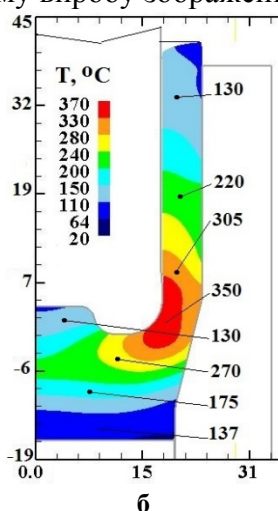
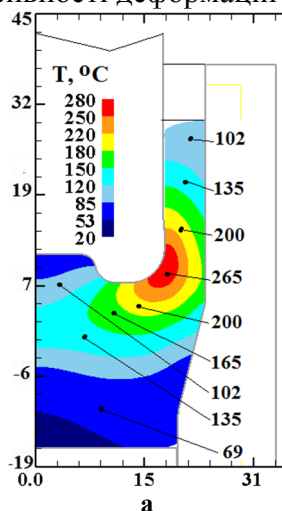


Рис. 6 - Розподіли температури у zdeформованих заготовках та розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  по об'єму виробу: а – розподіл температури при максимальному значенні зусилля видавлювання, б – розподіл температури в кінці видавлювання, в – розподіл  $\epsilon_i$

розподіл температури у zdeформованій заготовці при максимальному значенні зусилля видавлювання. Найбільша температура 265°C виникає в області заготовки, яка знаходиться біля радіуса заокруглення пуансона. У стінці температура zdeформованого металу знаходиться в межах 102°÷200°C. При подальшому видавлюванні температура зростає і в кінці формоутворення досягає 350°C в зоні біля радіуса заокруглення пуансона та 130°÷305°C і стінці zdeформованої заготовки. На рис. 6в приведений розподіл інтенсивності деформацій по об'єму виробу. По ширині стінки величину  $\epsilon_i=2,1$  отримано у внутрішніх шарах металу стінки, по середині стінки -  $\epsilon_i=1,1$ , а у зовнішніх шарах -  $\epsilon_i=0,6$ . По величинах  $\epsilon_i$  з

використанням експериментальної діаграми істинних напружень можна прогнозувати межу текучості zdeформованого металу.

Розподіл компонент деформацій по об'єму виробу приведений на рис. 7. На рис. 7а зображений розподіл радіальної деформації  $\varepsilon_r$ . По висоті стінки виробу ці деформації стискаючі, знаходяться в межах  $\varepsilon_r = -0,25 \div -1,3$ . У виступі на донній частині деформації  $\varepsilon_r$  стискаючі, а у самій донній частині – розтягувальні та досягають значень у межах  $\varepsilon_r = 0,04 \div 0,5$ . Осьові деформації  $\varepsilon_z$  у стінці виробу розтягувальні та знаходяться у межах  $\varepsilon_z = 0,45 \div 1,1$  (рис. 7б). У донній частині деформації  $\varepsilon_z$  в основному стискаючі. На рис. 7в наведений розподіл тангенціальних деформацій  $\varepsilon_\theta$ . У стінці виробу вказані деформації знаходяться в межах  $\varepsilon_\theta = 0,07 \div 0,67$ . В осередку деформації під пуансоном отримано  $\varepsilon_\theta = 0,82$ .

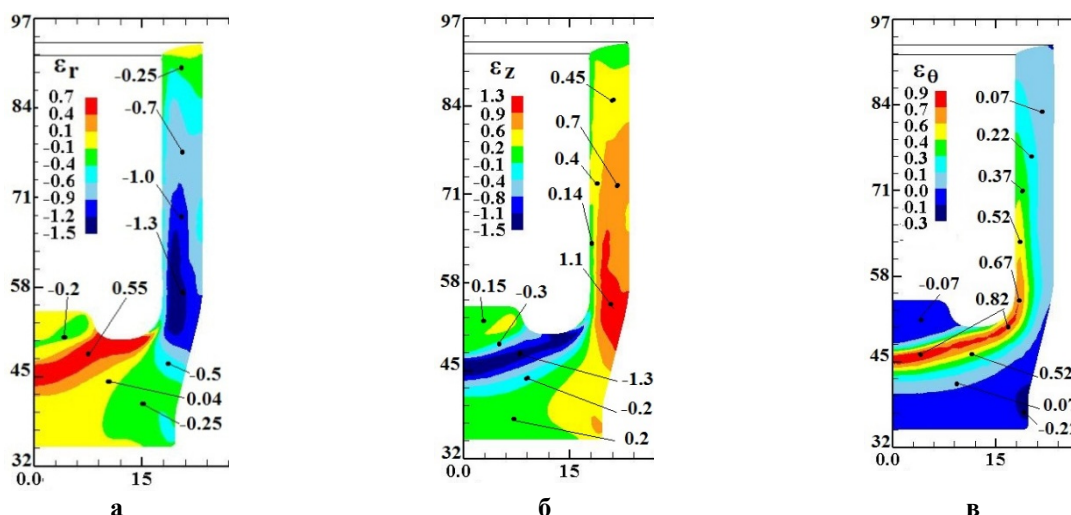


Рис. 6 - Розподіли радіальних  $\varepsilon_r$ , осьових  $\varepsilon_z$  та тангційних  $\varepsilon_\theta$  деформацій по об'єму виробу:  
а – розподіл  $\varepsilon_r$ , б – розподіл  $\varepsilon_z$ , в – розподіл  $\varepsilon_\theta$

**Висновки.** За допомогою МСЕ визначені параметри холодного видавлювання порожнистих виробів з виступом на донній частині. Встановлені зусилля формоутворення для вибору пресового обладнання. Виявлені питомі зусилля на деформуючому інструменті для проектування штампного оснащення. Розраховані кінцеві форма і розміри виробу з урахуванням пружної деформації.

#### Список літератури:

1. Ковка и объемная штамповка: Справочник. В 4-хт. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. . – Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. - М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
2. Калюжный В.Л. Сравнительный анализ процессов обратного выдавливания и прямого выдавливания с раздачей изделий с полостью постоянного диаметра / В.Л. Калюжный, Л.И. Алиева, И.П. Куликов // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2013. - №4(37). – С. 87-92.
3. Калюжный В.Л. Определение усилий извлечения пуансона из сдеформированной заготовки и выталкивания заготовки из матрицы при холодном выдавливании полых изделий с разной степенью деформации / В.Л. Калюжный, Л.И. Алиева, В.Н. Горностай // Усовершенствование процессов и оборудования для обработки давлением в металлургии и машиностроении: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2016. - №1(42). – С. 90-100.