

УДК 621.9

**В. Л. КАЛЮЖНИЙ**, докт. техн. наук, проф., НТУУ “КПІ”, Київ  
**І. П. КУЛІКОВ**, магістрант, НТУУ “КПІ”, Київ

## ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ПУАНСОНУ НА ВІДБОРТУВАННЯ КРУГЛИХ ОТВОРІВ У ЗПРОФІЛЬОВАНІЙ ЗАГОТОВЦІ

Методом скінченних елементів вивчений вплив форми пуансонів на відборткування круглого отвору в зпрофільованій заготовці із маловуглецевої сталі. Для відборткування плоским, конічним, сферичним та параболічним пуансонами визначені енергосилові режими, напруження при максимальному зусиллі відборткування, форма і розміри деталей, які отримані відборткуванням. Встановлені розподіли інтенсивності деформацій та ресурс пластичності в металі після деформації. Для відборткування отворів у зпрофільованій заготовці рекомендовано використовувати сферичний пуансон.

**Ключові слова:** відборткування круглих отворів, форма пуансона, енергосилові режими деформування, кінцеві форма і розміри виробів.

**Вступ.** На формоутворення виробів відборткуванням значний вплив здійснюють геометрична форма пуансону і радіус заокруглення матриці. В джерелах [1-3] для виконання процесів відборткування рекомендують плоскі, конічні, сферичні та параболічні пуансони. Приводяться дані по граничних коефіцієнтах відборткування, силових режимах формоутворення. Практично відсутні дані по впливу форми пуансонів на кінцеву форму і розміри здеформованої частини заготовки та зміцнення металу після деформування. В роботі [4] вивчений вплив радіусу заокруглення матриці на кінцеву форму і розміри при відбортванні отворів у традиційній листовій заготовці (заготовці постійної товщини). Показано, що при відбортванні мають місце викривлення та суттєве потоншення стінки здеформованої частини заготовки. Усунути вказані недоліки дозволяє розроблений спосіб відборткування [5], в якому при попередньому формоутворенні отвору видавлюванням виконується профілювання частини заготовки, що підлягає відбортванню. Сутність профілювання полягає в отриманні найбільшого значення товщини заготовки навколо отвору з поступовим зменшенням товщини до вихідного значення на радіусі де починається заокруглення матриці. Відборткування зпрофільованої заготовки дозволяє отримати здеформовану частину з постійною товщиною стінки. Тому актуальною задачею при відбортванні отворів у зпрофільованій заготовці є визначення впливу форми пуансону на енергосилові режими деформування, формозміну металу та кінцеву форму і розміри здеформованої частини заготовки.

**Мета роботи. Постановка задачі.** Метою роботи є визначення розрахунковим шляхом впливу геометричної форми пуансонів на відборткування круглих отворів у зпрофільованій заготовці. Розміри половини пуансонів з плоским, конусним, сферичним та параболічним торцем показані на рис. 1. Для параболічного пуансону рівняння параболи  $A$  наступне:  $y=(1/16)x^2$  Розрахункова схема відборткування параболічним пуансоном наведена на рис. 2. Задача вісеметрична, тому показана половина схеми. На матриці 1 розміщена заготовка 2 і зафіксована притискачем 3. Відборткування виконується за допомогою пуансону 4.

Матеріал заготовки – маловуглецева сталь. В заготовці попередньо виконані отвір радіусом  $R_0=15,075$  мм та профіль частини, що відбортковується. Розміри профілю: товщина  $S_p=4,15$  мм з лінійним зменшенням до вихідної товщини  $S_0=3$  мм до радіусу  $R_p=43$  мм. Такий профіль забезпечує отримання постійну товщину 3 мм відборткованої частини. Радіус отвору матриці  $R_m=35$  мм, радіус заокруглення  $r_m=10$  мм. Для всіх пуансонів коефіцієнт відборткування, як відношення радіуса відборткованої частини по середині стінки до радіусу отвору, складає  $k=15,075/33,5=0,45$ .

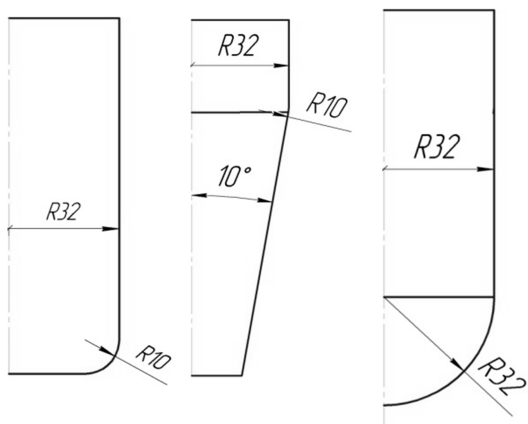


Рис. 1 – Розміри половин пуансонів для відбортування

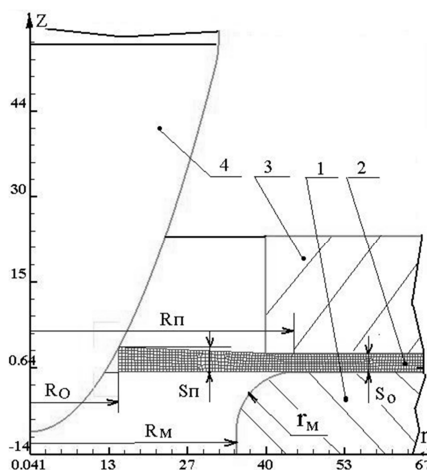


Рис. 2 – Розрахункова схема відбортування параболічним пуансоном

**Результати досліджень.** Розрахунковий аналіз проведений методом скінченних елементів (МСЕ). Метал вважався пружно-пластичним зі зміцненням. В МСЕ використаний спосіб початкових напружень для врахування розвантаження після формоутворення і встановлення кінцевих розмірів виробу. Враховано тертя на контактуючих поверхнях. Процес відбортування від вихідного стану заготовки до отримання виробу розподілявся на певну кількість кроків навантаження для виявлення ступеню використання ресурсу пластичності zdeформованого металу і оцінки можливості руйнування металу при формоутворенні. На рис. 3 показані залежності зусилля відбортування від переміщення пуансону, які отримані при відбортуванні пуансонами різної конфігурації. Найбільше значення зусилля відбортування (143 КН) має місце при відбортуванні плоским пуансоном, найменше (76 КН) – при відбортуванні параболічним пуансоном. Розрахункові дані підтверджуються результатами експериментів по традиційному відбортуванню, які наведені в роботі [3]. По наведених графіках можна визначити роботу деформації.

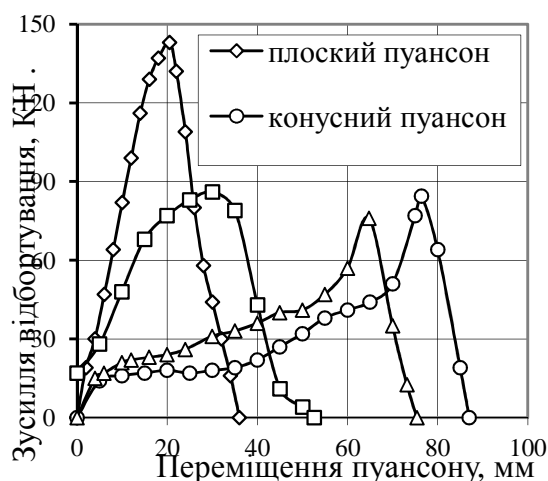


Рис. 3 – Залежність зусилля відбортування від переміщення пуансону

Моделюванням встановлений напружено-деформований стан заготовки, який виникає при максимальному зусиллі відбортування. На рис. 5 зображені розподіли осьових напружень  $\sigma_z$  при вказаному зусиллі для відбортування плоским, конусним і сферичним

пуансонами. Деформування конусним і сферичним пуансонами приводить до виникнення розтягувальних напружень  $\sigma_z$  по всій товщині zdeформованої стінки. В першому випадку у внутрішніх шарах металу стінки  $\sigma_z=450$  МПа, у зовнішніх – 150 МПа, в другому – по всій ширині стінки  $\sigma_z=300$  МПа. При відбортуванні конусним пуансоном на поверхні заготовки в місці радіуса заокруглення конічної частини пуансону в циліндричну виникають найбільші стискаючі напруження  $\sigma_z=-600$  МПа. Розмір по осі абсцис в міліметрах.

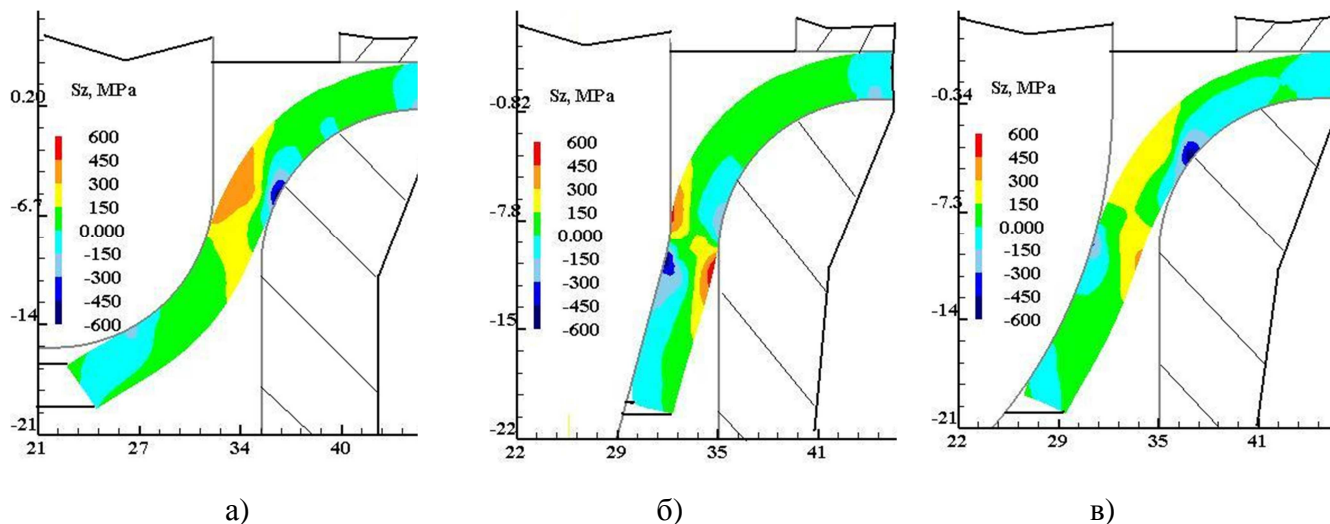


Рис. 5 – Розподіл осьових напружень  $\sigma_z$  ( $S_z$ ) в МПа в zdeформованій заготовці при максимальному зусиллі відбортування: а – відбортування плоским пуансоном, б – відбортування конусним пуансоном в – відбортування сферичним пуансоном.

Ще більші розтягувальні напруження виникають при відбортуванні зпрофільованої заготовки в окружному напрямку. На рис. 6 приведені розподіли тангенційних напружень  $\sigma_\theta$ , які виникають при максимальному зусиллі відбортування для формоутворення плоским, конічним і сферичним пуансонами. Відбортування плоским і сферичним пуансонами приводить до виникнення напружень  $\sigma_\theta=625$  МПа в половині zdeформованої заготовки. При конусному пуансоні об'єм металу з такими напруженнями займає третину заготовки. В частинах заготовок, які розташовані на радіусі заокруглення матриці значення розтягувальних напружень знаходяться в межах 50-100 МПа. Розмір по осі абсцис в міліметрах.

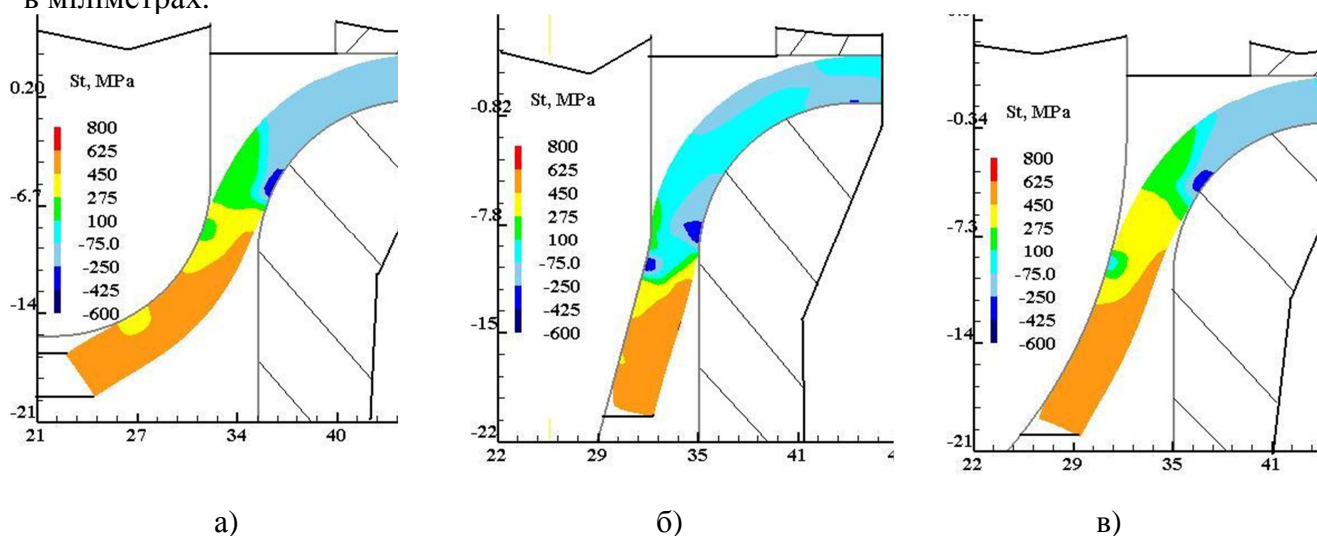


Рис. 6. – Розподіл тангенційних напружень  $\sigma_\theta$  ( $St$ ) в МПа в zdeформованій заготовці при максимальному зусиллі відбортування: а – відбортування плоским пуансоном, б – відбортування конусним пуансоном, в – відбортування сферичним пуансоном

Комп'ютерним моделюванням встановлені кінцеві форма і розміри (L) здеформованої частини заготовки, які наведені на рис. 7. При відсортунні конусним пуансоном (рис. 7 а) проходить потоншення і збільшення довжини здеформованої частини заготовки, що обумовлено виникненням найбільших розтягувальних осьових і тангенційних напружень в стінці при максимальному зусиллі відбортуння в порівнянні з іншими пуансонами. Прийнятий профіль заготовки не забезпечує отримання стінки постійної товщини. Товщина 3,04 мм має місце в заготовці на радіусі заокруглення матриці з подальшим зменшенням до величини 2,78 мм в циліндричній частині. В цій частині має місце викривлення стінки, яке досягає 0,22 мм. При відбортунні конусним, сферичним і параболічним пуансонами вказаного потоншення не виникає. Товщина циліндричної частини здеформованої заготовки знаходиться в межах 2,96-2,98 мм. Також має місце викривлення торця здеформованої частини від 0,12 до 0,17 мм. По результатах розрахунків встановлено, що для отримання постійної товщини стінки 3 мм після відбортуння необхідно збільшити величину Sp профілю (див. рис. 2) до значення 4,17 мм.

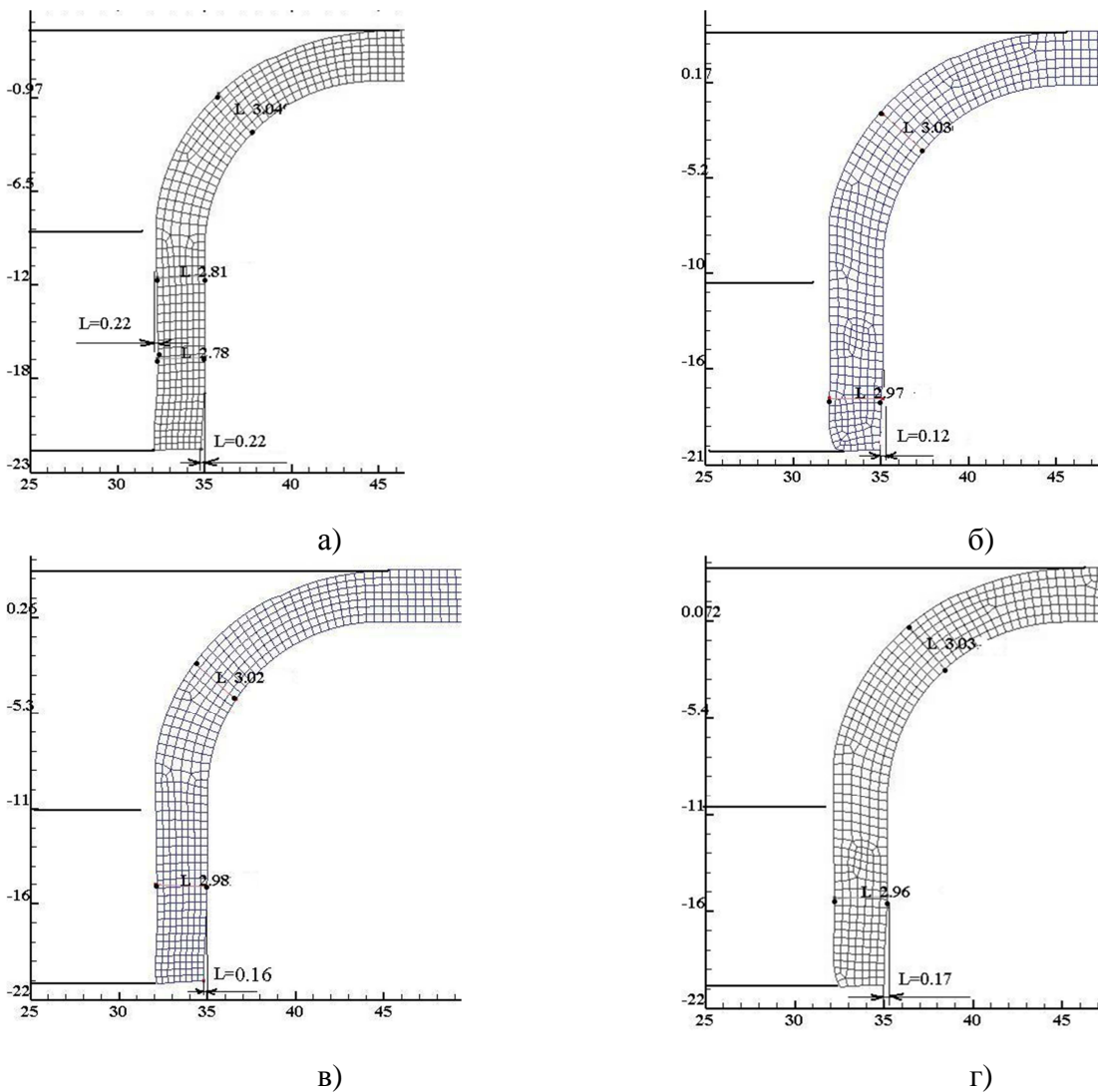


Рис. 7 – Кінцеві розміри (L) та викривлення (в мм) здеформованої частини заготовки при відбортунні зпрофільованої заготовки: а – плоским пуансоном; б – конусним пуансоном; в - сферичним пуансоном; г - конічним пуансоном

Велика кількість деталей, які виготовляють відбортунням, використовується для з'єднання з іншими виробами за допомогою різьби або зварювання. Для прогнозування надійності і довговічності таких з'єднань, крім отримання стінки з постійною товщиною, необхідно знати величину зміцнення здеформованого металу при відбортунні. Зміцнення можна визначити по величині розподілу інтенсивності деформацій та використан-

ня експериментальної діаграми істинних напружень. На рис. 8 наведені розподіли інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  в здеформованих частинах заготовок при відбортунні різними пуансонами. Форма пуансонів не суттєво впливає на величини  $\epsilon_i$  в циліндричній частині здеформованої заготовки. Найбільші значення  $\epsilon_i=0,8$  отримані на торцях вказаної частини з подальшим зменшенням до  $\epsilon_i=0,3$  на початку радіусу заокруглення матриці. Розмір по осі абсцис в міліметрах.

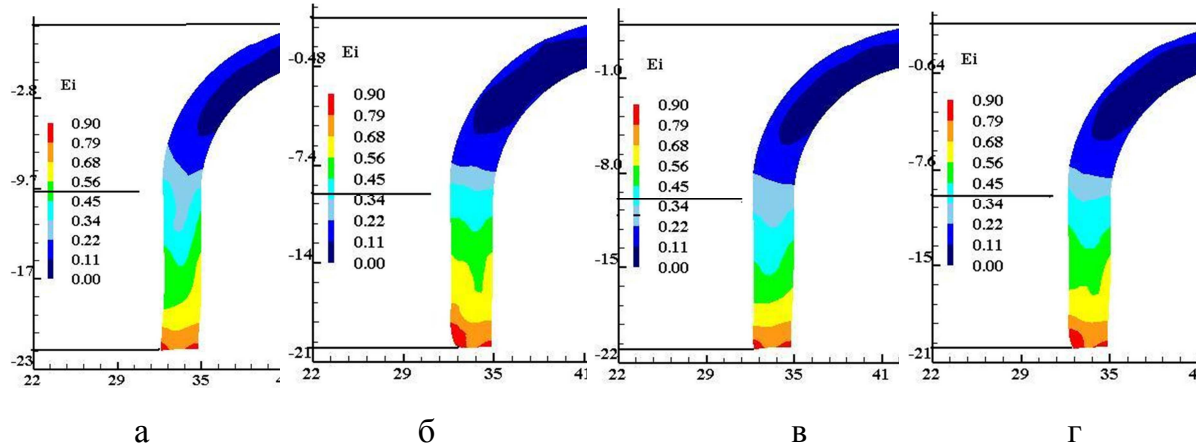


Рис. 8. – Розподіли інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  в здеформованих частинах заготовок після відбортуння: а - плоским пуансоном; б - конусним пуансоном; в - сферичним пуансоном; г - параболічним пуансоном

Для збільшення висоти стінки після відбортуння використовують подальше потоншення циліндричної частини холодною пластичною деформацією. Щоб виконати потоншення необхідно знати величину ступеня використання ресурсу пластичності здеформованого металу після відбортуння. На рис. 9 приведені розподіли ресурсу пластичності  $\psi$  в здеформованих частинах заготовок. Розподіли  $\psi$  практично однакові для всіх розглянутих формах пуансонів. Ресурс пластичності вичерпується ( $\psi=0,98$ ) по циліндричній частині здеформованих заготовок. Руйнування починається при  $\psi=1$ . Тому подальше виконання потоншення стінок без проведення відпалу не можливе.

Таким чином, для відбортуння круглих отворів у зпрофільованих заготовках можна рекомендувати пуансони сферичної форми, які забезпечують відбортуння при меншому переміщенні пуансона та простіші в виготовленні в порівнянні з параболічними. Розмір по осі абсцис в міліметрах

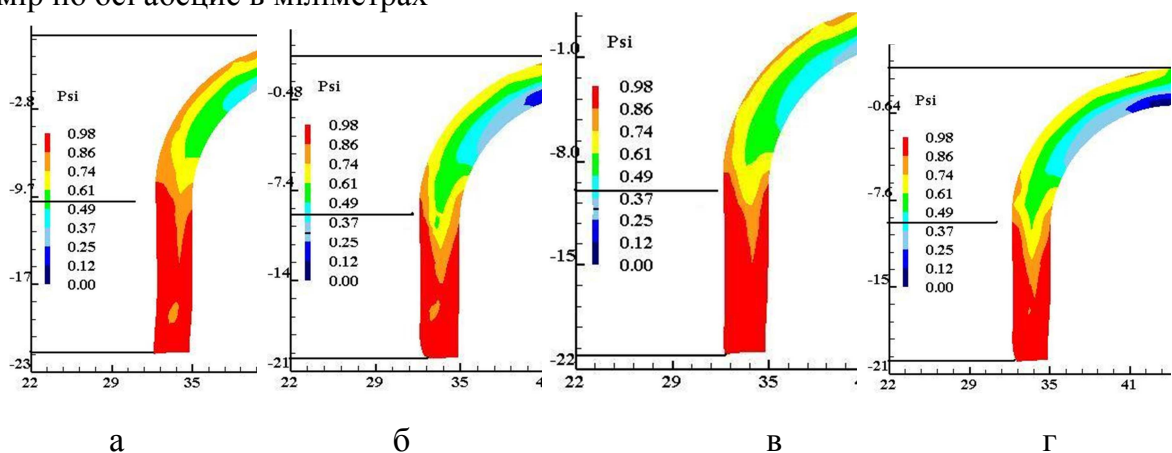


Рис. 9 – Розподіли ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  в здеформованих частинах заготовок після відбортуння: а - плоским пуансоном; б - конусним пуансоном; в - сферичним пуансоном; г - параболічним пуансоном

**Висновки.** 1. Методом скінченних елементів проведений розрахунковий аналіз по впливу геометричної форми пуансонів на відбортування круглих отворів у зпрофільованій заготовці заданих розмірів з маловуглецевої сталі. Встановлені енергосилові режими формоутворення, напруження при максимальному зусиллі відбортування, форма і розміри zdeформованих заготовок та розподіли інтенсивності деформацій і ресурсу пластичності в них. 2. Найменше зусилля відбортування отримане при відбортуванні параболічним пуансоном. Однак для виконання відбортування потрібний хід пуансона в 1,5 разів більший в порівнянні з сферичним пуансоном, хоча зменшення зусилля складає 10 %. 3. При відбортуванні зпрофільованої заготовки виникають значні осьові і тангенційні розтягувальні напруження, які приводять до вичерпання ресурсу пластичності zdeформованого металу і неможливості виконання подальшого потоншення для збільшення висоти циліндричної частини заготовки. 4. Встановлені розподіли інтенсивності деформацій та ступінь використання ресурсу пластичності zdeформованого металу для прогнозування надійності і довговічності з'єднань деталей, які отримані відбортуванням, з іншими виробами за допомогою різьби та зварювання.

**Список літератури.** 1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке // Романовский В.П. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с. 2. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4 Листовая штамповка/ Под ред. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985-1987. – 544 с. 3. Аверкиев Ю.А. Холодная штамповка// Аверкиев Ю.А. ; Издательство Ростовского университета , 1984, – 288 с. 4. Калюжний О.В. Прогнозування та забезпечення якості виробів в процесах відбортування / О.В. Калюжний // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків; 32'2009 р. –С. 118 – 122. 5. Калюжний О.В. Спосіб відбортування отворів // О.В. Калюжний, С.А. Пахолко, І.П. Куліков. Патент України на корисну модель №69344 МПК 21D 26/02, заявка u201112215 від 18.10.2011, опубл.25.04.2012, бюл. №8/2012.

Надійшла до редколегії 23.09.2012

УДК 621.9

**Вплив геометричної форми пуансону на відбортування круглих отворів у зпрофільованій заготовці / Калюжний В.Л., Куліков І.П. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №46(952). – С. 50-55. – Библиогр.: 5.**

Методом конечных элементов изучено влияние формы пуансонов на отбортовку круглого отверстия в спрофилированной заготовке из малоуглеродистой стали. Для отбортовки плоским, конусным, сферическим и параболическим пуансонами определены энергосиловые режимы, напряжения при максимальном усилии отбортовки, форма и размеры отбортованных деталей. Установлены распределения интенсивности деформаций та ресурс пластичности в деформированном металле. Для отбортовки отверстий в спрофилированной заготовке рекомендовано использовать сферический пуансон.

**Ключевые слова:** отбортовка круглых отверстий, форма пуансона, энергосиловые режимы деформирования, конечные форма и размеры изделий.

Effect of the puncheon form on flanging round holes in low-carbon profiled preform is studied by FEM analysis. For flanging by flat, conic, spherical and parabolic punches define power regimes, stresses at the maximum flanging effort, the form and the sizes of the flanged details. Distributions of intensity of deformations and a plasticity resource in the deformed metal are established. For holes flanging in profiled preform it is recommended to use a spherical punch.

**Keywords:** round holes flanging, the puncheon form, power regimes of deformation, final form and the size of details.