

УДК 621.983

**О. В. КАЛЮЖНИЙ**, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ»;  
**А. С. ПАХОЛКО**, аспірант НТУУ «КПІ», Київ

## **СИЛОВІ РЕЖИМИ ТА ФОРМОЗМІНА МЕТАЛУ ПРИ ВІДБОРТУВАННІ ОТВОРІВ У ПОПЕРЕДНЬО ЗПРОФІЛЬОВАНІЙ ЗАГОТОВЦІ В МАТРИЦІ З РІЗНИМ РАДІУСОМ ЗАОКРУГЛЕННЯ**

Приведені результати розрахунків методом скінченних елементів холодного відборткування отворів сферичним пуансоном у попередньо зпрофільованій заготовці із маловуглецевої сталі та алюмінію. Встановлено вплив радіусу заокруглення матриці на зусилля відборткування, форму і розміри здеформованих заготовок та напружено-деформований стан в них. Розрахований ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу. Збільшення радіусу заокруглення матриці приводить до зменшення зусилля деформування та зростання висоти відборткованої частини заготовки. Моделюванням отримані необхідні розрахункові дані, які підтверджені експериментально.

**Ключові слова:** відборткування отворів, зпрофільована заготовка, радіус заокруглення матриці, сферичний пуансон пуансон, метод скінченних елементів, зусилля відборткування, форма і розміри, напружено-деформований стан заготовок.

**Вступ.** Відборткування отворів у традиційній листовій заготовці, яка має постійну товщину, приводить до потоншення та викривлення здеформованої частини заготовки. В джерелі [1] приведені експериментальні дані по впливу відносної товщини заготовки та методу утворення круглого отвору, який виконаний обробкою різанням або вирубуванням в штампі, на коефіцієнт відборткування при формоутворенні сферичним та циліндричним пуансоном. В роботах [2, 3] наведені дані по впливу геометричної форми пуансону на зусилля деформування та форму відборткованої частини заготовки, а також експериментальні дані по коефіцієнту відборткування при різних значеннях відносної товщини заготовки із маловуглецевої сталі. Експериментальні значення граничних коефіцієнтів відборткування круглих отворів у заготовках з нержавіючих сталей та алюмінієвих сплавів приведені в джерелі [4]. Для отримання відборткуванням здеформованих частин з постійною товщиною стінки використовують попередньо зпрофільовану заготовку [5]. В такій заготовці отвір утворюють видавлюванням з подальшим пробиванням перемички. При видавлюванні відбувається потовщення частини заготовки, яка потім підлягає відбортванню. Проведені дослідження показали можливість отримання відборткуванням рівної по довжині циліндричної частини відборткованої заготовки з постійною товщиною стінки, яка дорівнює товщині листової заготовки [6]. Вплив геометричної форми пуансону на відборткування круглих отворів у попередньо зпрофільованій заготовці встановлений в роботі [7]. Однак, залишаються невирішені задачі виявлення впливу радіусу

заокруглення матриці на силові режими формоутворення, форму та розміри zdeформованих заготовок, напружено-деформований стан в них та ступінь використання ресурсу пластичності zdeформованого металу. Вказані задачі можна успішно вирішити шляхом створення математичних моделей та проведення розрахункового аналізу з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) [6,7].

**Мета роботи . Постановка задачі досліджень.** Метою роботи є вивчення впливу радіусу заокруглення матриці на силові режими формоутворення, форму і розміри та напружено-деформований стан zdeформованих заготовок при відбортуванні отворів у попередньо зпрофільованих заготовках.

Розрахункова схема для моделювання МСЕ з використанням програми DEFORM з позначеннями для аналізу відбортування отворів в зпрофільованій заготовці сферичним пуансоном показана на рис. 1. Задача вісесиметрична, наведені позначення на половині заготовки та деформуючого інструменту. Заготовка 1 з попередньо виконаним отвором радіусом  $R_o$  і товщиною профілю  $S_{\text{п}}$  біля отвору встановлена на матриці 2, яка має отвір радіусом  $R_m$  та радіус заокруглення  $r_m$ . Заготовка 1 зафіксована притискачем 3. Кут  $\alpha$  профілю встановлювався таким чином, щоб забезпечити рівний торець відбортованої частини. Відбортування виконується пуансоном 4, що має сферичну і циліндричну частини радіусом  $R_{\text{п}}$ . Використані заготовки з маловуглецевої сталі, яка була відпалена після профілювання видавлюванням, з наступними розмірами: діаметр заготовки  $D_3=220$  мм, товщина  $S_o=3$  мм, діаметр отвору  $D_o=27$  мм, висота профілю біля отвору  $S_{\text{п}}=4,8$  мм, радіус профілю  $R_{\text{пр}}$  вибирався в залежності від радіусу заокруглення матриці  $r_m$ . Діаметр отвору матриці  $D_m=2 R_m=70$  мм. Діаметр циліндричної частини пуансону  $D_{\text{п}}=64$  мм, радіус сфери  $R_{\text{п}}=32$  мм. Використані величини радіусу заокруглення матриці  $r_m=4, 6, 8, 10, 12$  та  $14$  мм. При цьому, радіус профілю заготовки відповідно дорівнював  $R_{\text{пр}}=21; 21,7; 22,4; 23; 23,9$  та  $24,6$  мм. Коефіцієнт відбортування для наведених розмірів заготовки та пуансону склав  $k=0,4$ .

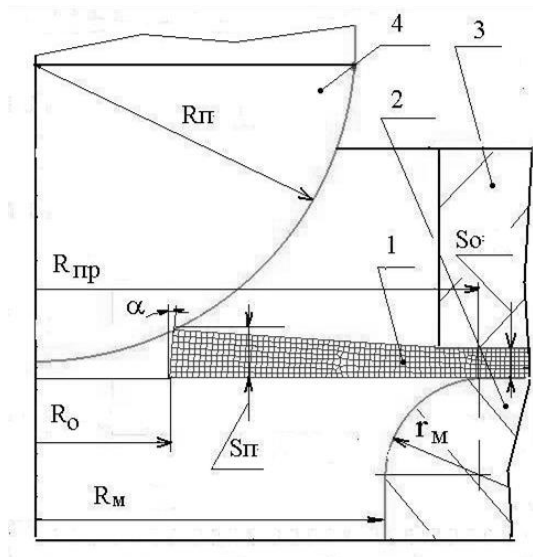


Рис. 1 – Розрахункова схема відбортуння зпрофільованої заготовки

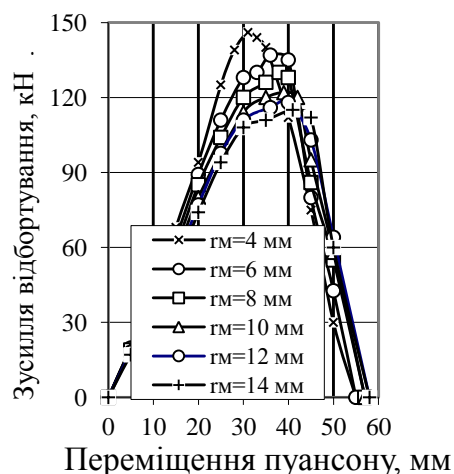


Рис. 2 – Залежність зусилля відбортуння від переміщення пуансону

На рис. 2 приведені залежності зусилля відбортуння від переміщення пуансону, які отримані при відбортунні в матрицях з різним радіусом  $r_M$ . Зі збільшення величини  $r_M$  зусилля відбортуння зменшується. При цьому, досягнення максимуму зусилля відбортуння зміщується в сторону кінцевої стадії відбортуння. Інтенсивне зниження зусилля має місце при зростанні радіусу  $r_M$  з 4 до 10 мм. Подальше збільшення радіусу несуттєво впливає на величину зусилля. Для радіусу  $r_M = 4$  мм максимальна величина зусилля складає 146 кН, для  $r_M = 10$  мм – 122 кН, а для  $r_M = 14$  мм – 115 кН.

Величина радіусу заокруглення  $r_M$  впливає на форму та розміри здеформованої заготовки, які зображені на рис. 3. Найбільше потоншення стінки на радіусі заокруглення матриці відбувається при  $r_M = 4$  мм, при цьому товщина стінки по середині радіусу заокруглення матриці досягає величини 2,93 мм.

Відбортуння в матриці з  $r_M = 6$  мм забезпечує практично однакову товщину стінки по всій довжині здеформованої частини заготовки. Подальше збільшення радіусу  $r_M$  приводить до зменшення потоншення зпрофільованої частини вихідної заготовки. При вищевказаних розмірах профілю товщина стінки після відбортуння в матриці з  $r_M = 14$  мм складає 3,13 мм. Також при збільшенні радіусу  $r_M$  зростає довжина відбортунної частини заготовки. Так, для  $r_M = 4$  мм довжина має величину 21 мм, а для  $r_M = 14$  мм – 24,6 мм. Це пов'язано зі зменшення потоншення профілю заготовки при формоутворенні зі збільшенням радіусу  $r_M$ .

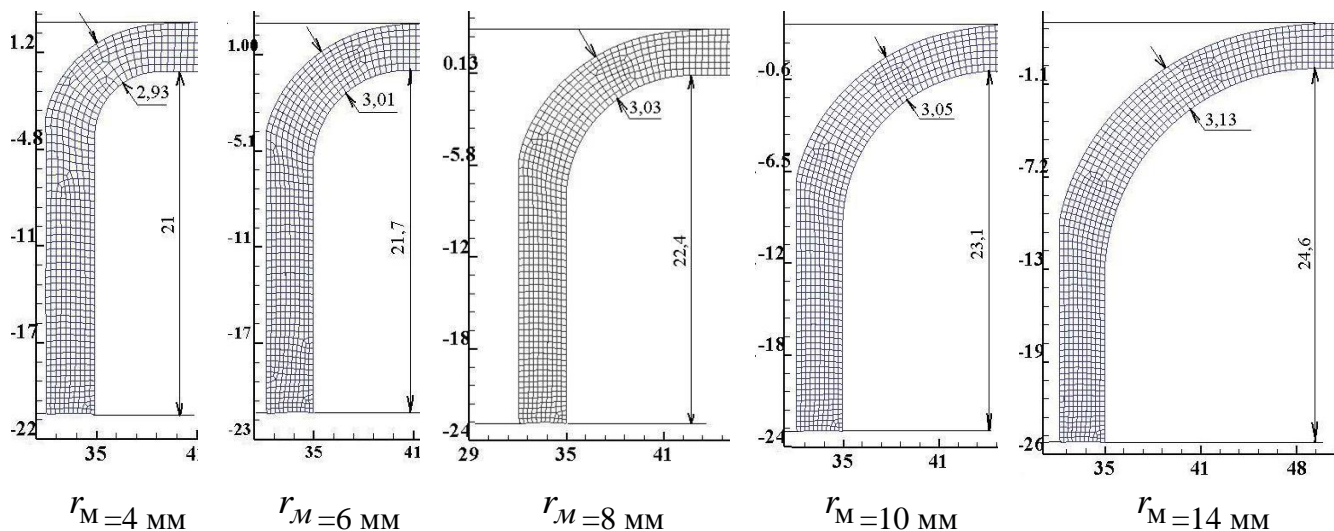


Рис. 3– Форма та розміри в міліметрах zdeформованих частин заготовок після відбортування в матриці з різним радіусом  $r_M$

Радіус заокруглення матриці  $r_M$  впливає на пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією по довжині відбортованих частин заготовок. На рис. 4 наведені розподіли інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  в zdeформованих заготовках після відбортування в матрицях з  $r_M=4, 8$  та  $14$  мм. Найбільші значення  $\epsilon_i=0,83-0,95$  зосереджені в зоні торців стінок з подальшим зменшенням до місця переходу циліндричної області в радіус заокруглення. Після відбортування в матриці з  $r_M=4$  мм у внутрішніх шарах металу стінки на радіусі заокруглення досягається величина  $\epsilon_i=0,24-0,36$ . В інших наведених випадках отримано  $\epsilon_i=0,12-0,24$ . Тому в zdeформованому металі в матриці з  $r_M=4$  мм можна прогнозувати збільшені механічні властивості в стінці на радіусі заокруглення.

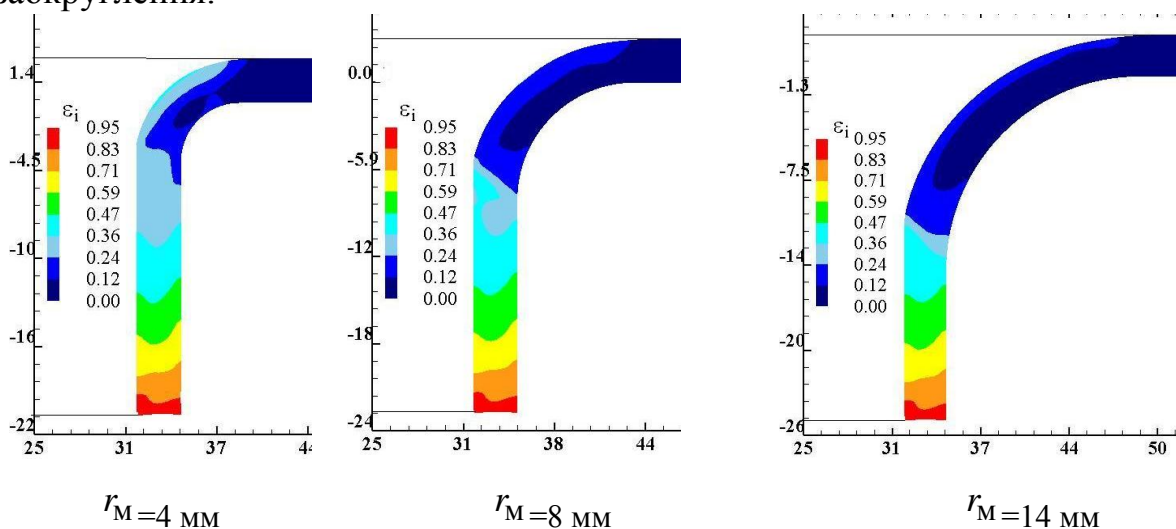


Рис. 4 – Розподіли інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  в zdeформованих частинах заготовок після відбортування в матриці з різним радіусом заокруглення  $r_M$ . Розміри по вісях в міліметрах

Можливість подальшого потоншення стінок після відбортування в матрицях з різним радіусом  $r_M$  можна визначити по розподілу ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  здеформованого металу, розподіли якого по об'єму здеформованих заготовок приведені на рис. 5. На внутрішніх шарах металу стінки на радіусі заокруглення величини  $\psi$  різні. Після відбортування в матриці з  $r_M=4$  мм в цьому місці ресурс пластичності практично вичерпується, досягаючи значень  $\psi=0,86-0,98$ . Для матриці з  $r_M=8$  мм –  $\psi=0,74-0,86$ , а для  $r_M=14$  мм –  $\psi=0,61-0,74$ . В циліндричних областях здеформованих частин заготовок ресурс пластичності здеформованого металу також вичерпується практично повністю:  $\psi=0,86-0,98$ . Таким чином, подальше потоншення стінок після відбортування без проведення відпалу неможливе.

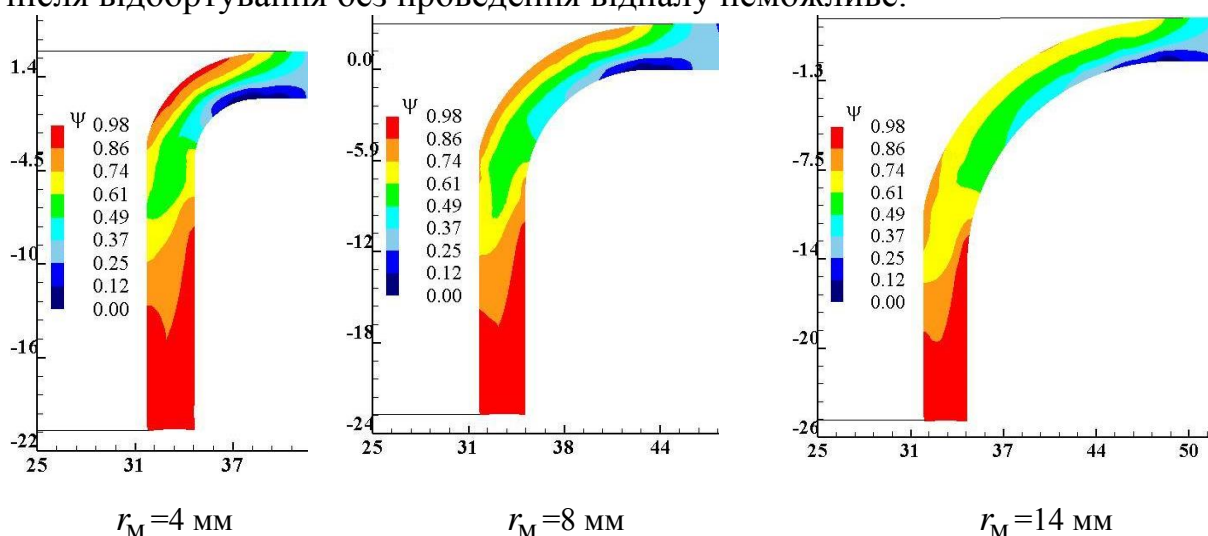


Рис. 5 – Розподіли ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  в здеформованих частинах заготовок після відбортування в матриці з різним радіусом заокруглення  $r_M$

Для перевірки адекватності результатів моделювання та порівняння відбортування отворів в заготовці постійної товщини та в зпрофільованій заготовці із пластичного алюмінію ( $\sigma_{0,2}=40$  МПа) були проведені чисельні по МСЕ та натурні експерименти. Традиційна листова заготовка мала наступні розміри: товщина  $S_0=1,5$  мм, радіус отвору  $R_0=10$  мм зовнішній радіус  $R_3=50$  мм. Поведене моделювання процесу формоутворення отвору видавлюванням пуансоном діаметром 20 мм з кутом конусу торця при вершині  $174^\circ$ . Розміри деформуючого інструменту для відбортування (див. рис. 1): пуансону – радіус  $R_{\Pi}=20$  мм,; матриці – радіуси  $R_M=21,5$  мм і  $r_M=6$  мм.

Розрахунковим шляхом МСЕ визначені розміри профілю  $S_{\Pi}=2,15$  мм і  $R_{\Pi p}=27$  мм, які забезпечили після відбортування постійну товщину стінки (1,5 мм) здеформованої частини заготовки. Тому довжину зпрофільованої частини заготовки можна визначити так:  $R_{\Pi p} \approx 0,95(R_M + r_M)$ . Найбільші

енергосилові витрати мають місце при формоутворенні отвору видавлюванням та отримання потовщення на заготовці. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону приведена на рис. 6. В кінці видавлювання зусилля досягає величини 180 кН. Використання видавлювання при утворенні отвору, в порівнянні з пробиванням або свердлінням, дозволяє економити метал до 75 % на одному отворі. Максимальне зусилля при пробиванні перемички склало 2,7 кН. Форма та розміри zdeформованих заготовок після формоутворення отвору та пробивання перемички, які отримані МСЕ, показані на рис. 7.

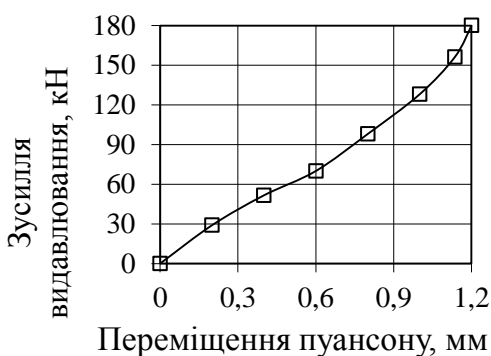


Рис. 6 – Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону

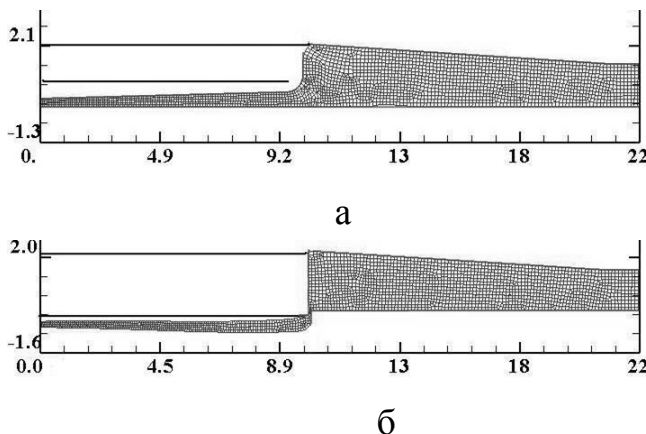


Рис. 7 – Форма та розміри в міліметрах zdeформованих частин заготовок: а – після видавлювання, б – після пробивання перемички

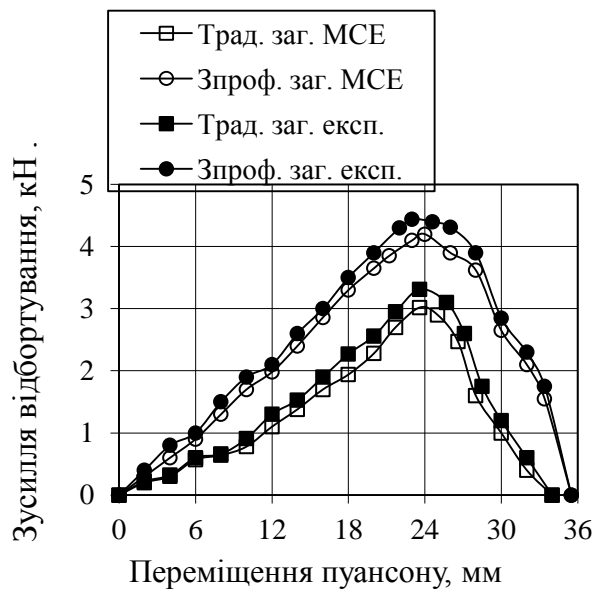


Рис. 8 – Експериментальні та розрахункові залежності зусилля відборткування від переміщення пуансону

Експериментальні дослідження відборткування традиційної та зпрофільованої заготовки проводилися на випробувальній машині TIRA test

2300. На рис. 8 приведені розрахункові та експериментальні залежності зусилля відбортування від переміщення пуансону. Зусилля відбортування зпрофільованої заготовки більше зусилля відбортування традиційної заготовки, що пов'язано з наявністю потовщення на заготовці та зміцненням металу в ньому, яке отримане при видавлюванні. Максимальна величина зусилля відбортування традиційної заготовки складала 3 кН, зпрофільованої – 4,2 кН. Максимальна відмінність в розрахункових по МСЕ та експериментальних даних досягає 6 %.

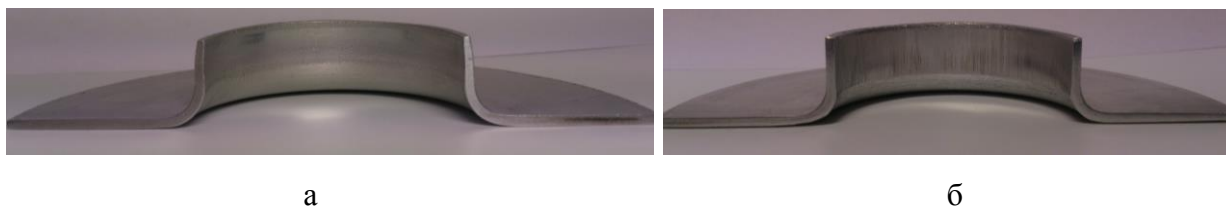


Рис. 9 – Здеформовані заготовки в розрізі, які отримані відбортуванням: а – традиційної заготовки, б – зпрофільованої заготовки

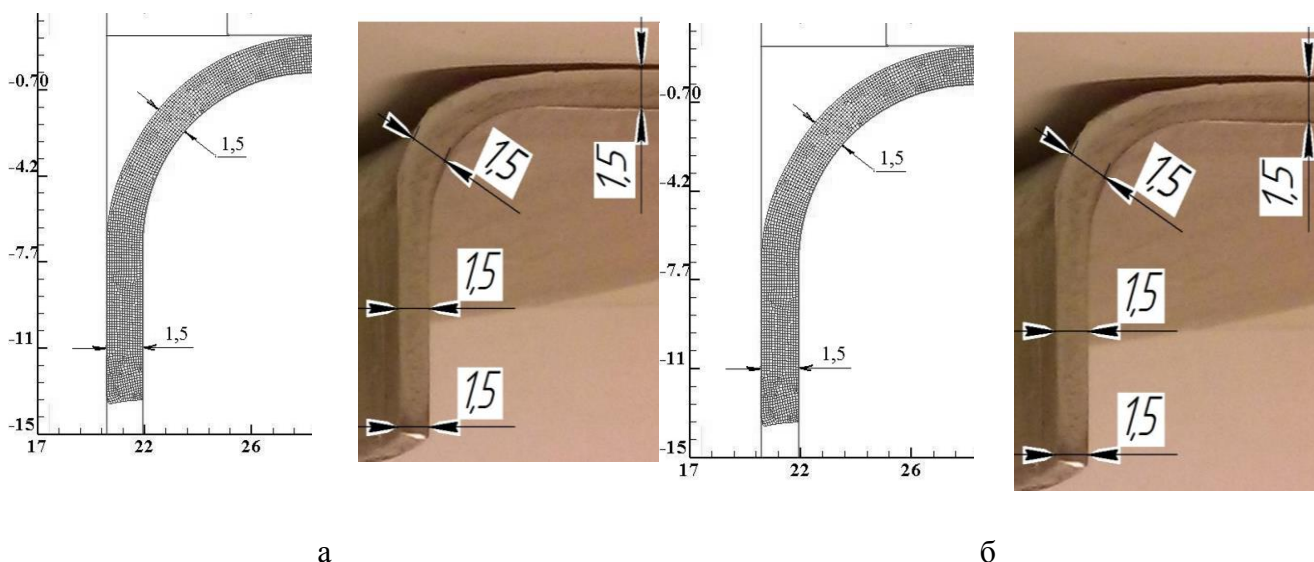


Рис. 10 – Розрахункові по МСЕ та експериментальні форма і розміри в міліметрах zdeформованих частин: а – традиційної заготовки; б – зпрофільованої заготовки

На рис. 9 показані zdeформовані заготовки в розрізі, які отримані відбортуванням традиційної та зпрофільованої заготовки. Розрахункові по МСЕ та експериментальні форми та розміри zdeформованих частин заготовок приведені на рис. 10. На розрахункових даних тонкими лініями зображений деформуючий інструмент. При відбортуванні традиційної заготовки має місце потоншення торця заготовки (з 1,5 до 1 мм) zdeформованої частини та викривлення на величину 0,4 мм (рис. 10, а). Наявність викривлення потребує додаткової операції калібрування шляхом подальшого потоншення. При відбортуванні отворів у попередньо зпрофільованій заготовці стінка zdeформованої частини має постійну товщину 1,5 мм по всій довжині та

виключається її викривлення (рис. 10, б). Отримання вказаної товщини відкриває можливість суттєвого збільшення висоти відбортованої частини подальшим потоншенням в порівнянні з відбортуванням традиційної заготовки.

**Висновки.** Методом скінчених елементів проведений аналіз процесу відбортування отворів у зпрофільованій заготовці із маловуглецевої сталі в матриці з різним радіусом заокруглення. Встановлені залежності зусилля відбортування від переміщення пуансону та форма і розміри zdeформованих заготовок. Зі збільшенням радіусу заокруглення матриці зусилля відбортування зменшується та знижується потоншення стінки на радіусі заокруглення. Радіуси заокруглення матриці впливає на висоту відбортованої частини заготовки. Чим більший радіус, тим більша висота. Для конкретного радіусу заокруглення матриці проведений чисельний та натурний експеримент по відбортуванню круглих отворів у зпрофільованій заготовці з алюмінію. Розрахункові дані показали добру відповідність результатам експерименту, що дозволяє використовувати результати розрахунків для проектування технології відбортування.

**Список літератури:** 1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6–е изд., перераб. и доп. / В. П. Романовский . – Ленингр. отд–ние: Машиностроение. 1979. – 520 с. 2. Аверкиев Ю. А. Холодная штамповка / Ю. А. Аверкиев. Издательство Ростовского университета , 1984. – 288 с. 3. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев., А. Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с. 4. 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. 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. 6. Калюжний В.Л. Виключення потоншення стінки і викривлення торця при відбортуванні отворів / В.Л. Калюжний, С.А. Пахолко, І.П. Куліков// Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2011. – № 46. – С. 41–48. 7. Калюжний В.Л. Вплив геометричної форми пуансону на відбортування круглих отворів у зпрофільованій заготовці / В.Л. Калюжний, І.П. Куліков// Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2012. – № 46. – С. 50–56.

**Bibliography (transliterated):** 1. Romanovskiy V. P. Spravochnik po holodnoy shtampovke. 6–e izd., pererab. i dop. / V. P. Romanovskiy . – Leningr. otd–nie: Mashinostroenie. 1979. – 520 P. 2. Averkiev Yu. A. Holodnaya shtampovka / Yu. A. Averkiev. Izdatelstvo Rostovskogo universiteta, 1984. – 288 P. 3. Averkiev Yu. A. Tehnologiya holodnoy shtampovki / Yu. A. Averkiev., A. Yu. Averkiev. – Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 304 P. 4. Kovka i shtampovka: Spravochnik: V 4 t. T. 4. Listovaya shtampovka / Pod red.. A.D. Matveeva; Red. sovet: E.I. Semenov (pred.) i dr. – Moscow: Mashinostroenie, 1985–1987. – 544 P. 5. Kalyuzhniy O.V. Sposib vidbortuvannya otvoriv // O.V. Kalyuzhniy, P.A. Paholko, I.P. Kulikov. Patent Ukrayini na korisnu model No 69344 MPK 21D 26/02, zayavka u201112215 vId 18.10.2011, opubl.25.04.2012, byul. No 8/2012. 6. Kalyuzhniy V.L. Viklyuchennya potonschennya stlnki i vikrivlennya tortsya pri vidbortuvanniI otvoriv / V.L. Kalyuzhniy, P.A. Paholko, I.P. Kullkov// VIsnik NTU «HPI», SerIya «Novi rishennya v suchasniH tehnologiyah». – 2011. – No 46. – P. 41–48. 7. Kalyuzhniy V.L. Vpliv geometrichnoyi formi puansonu na vidbortuvannya kruglih otvoriv u zprofilovanIy zagotovtsI / V.L. Kalyuzhniy, I.P. Kulikov// Visnik NTU «HPI», Seriya «Novi rishennya v suchasniH tehnologiyah». – 2012. – No 46. – P. 50–56.

Надійшла (received) 28.10.2014