

УДК 621.9

Калюжний О. В.  
Пахолко С. А.**РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІДНОСНОЇ ТОВЩИНИ ЗАГОТОВКИ НА СИЛОВІ РЕЖИМИ ТА ЯКІСТЬ ВИРОБІВ ПРИ ВІДБОРТУВАННІ**

Відбортування – розповсюджена формоутворююча операція холодного листового штампування. Вона використовується для збільшення висоти деталей, які отримують витягуванням, утворення виступів на плоских листових заготовках і в доній частині порожнистих виробів, що отримують витягуванням та обтиском. Вказані виступи необхідні для приєднання до інших деталей методами розвальцювання, зварювання та за допомогою різьби. Також відбортування використовують для отримання виробів типу втулки з фланцями. Відбортування може бути без потоншення та з потоншенням стінки. В літературних джерелах по визначенню параметрів відбортування розрахунки зводяться до знаходження коефіцієнта відбортування для отримання виробів за один перехід [1–2]. Проте майже відсутні дані по визначенню впливу відносної товщини заготовки  $S/d_0$  ( $S$  – початкова товщина заготовки,  $d_0$  – діаметр попередньо отриманого отвору в заготовці) на якість виробів (геометричну форму відбортованої частини з урахуванням пружної деформації, зміцнення та ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу після відбортування). Методом кінцевих елементів (МКЕ) досліджений вплив радіуса заокруглення матриці на зусилля відбортування, кінцеву геометричну форму відбортованої частини та зміцнення здеформованого металу [3–4]. Частково вплив геометрії пуансонів на процес відбортування розглянутий в роботі [5]. Однак для вказаних пуансонів також практично відсутні дані по впливу відносної товщини на формозміну металу при відбортуванні та якість виробів.

Метою даної роботи є визначення шляхом моделювання МКЕ впливу відносної товщини заготовки на силові режими відбортування та якість виробів, а також проведення експериментальних досліджень для підтвердження адекватності створених кінцево-елементних моделей.

Для комплексного врахування конструктивних (геометрична форма матриць і пуансонів), технологічних (коефіцієнт відбортування, тип змащення, швидкість деформування, локальний характер осередку деформації, розвантаження металу після пластичної деформації) та фізико-механічних параметрів (пружні властивості металу, діаграма дійсних напружень, діаграма пластичності) необхідне створення кінцево-елементних моделей відбортування. З урахуванням локального характеру осередку деформації і холодної формозміни метал повинен вважатися пружно-пластичним зі зміцненням. Для визначення розвантаження необхідно використовувати спосіб початкових напружень в МКЕ. Такий спосіб реалізований в пакеті прикладних програм, який розроблений на кафедрі МПМ та РП НТУУ «КПІ».

Теоретичні і експериментальні дослідження виконані для заготовок з маловуглецевої сталі з товщиною  $S = 1$  мм і відносними товщинами ( $S/d_0$ ) 0,14; 0,125 і 0,11 та заготовок товщиною  $S = 1,5$  мм з  $S/d_0 = 0,214$ ; 0,187 і 0,167. Зазори між пуансоном і матрицею будуть наведені нижче.

В результаті проведених розрахунків була визначена залежність зусилля відбортування від переміщення пуансону при різних товщинах  $S$  і відносних товщинах  $S/d_0$ . Вигляд залежностей показаний на рис. 1. Чим більше відношення  $S/d_0$  тим більше зусилля відбортування.

За допомогою моделювання також була визначена кінцева геометрична форма здеформованих заготовок та розподіли компонент напружено-деформованого стану в них.

На рис. 2 зображено кінцеву форму відбортованої частини та розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  по об'єму при відбортуванні заготовок товщиною 1,5 мм з різними  $S/d_0$ . Тонкими лініями показаний деформуєчий інструмент. Зменшення відносної товщини приводить

до меншого потоншення заготовки при відбортуванні. Пропрацювання структури металу пластичною деформацією, як слідує з розподілу інтенсивності деформацій, охоплює не всю здеформовану частину заготовки по висоті. Суттєве зростання  $\varepsilon_i$  починається після радіусу заокруглення заготовки. Максимальні значення  $\varepsilon_i$  отримані на торці відбортованої частини заготовки. Збільшення величини відношення  $S/d_0$  приводить до зростання інтенсивності деформації  $\varepsilon_i$ .

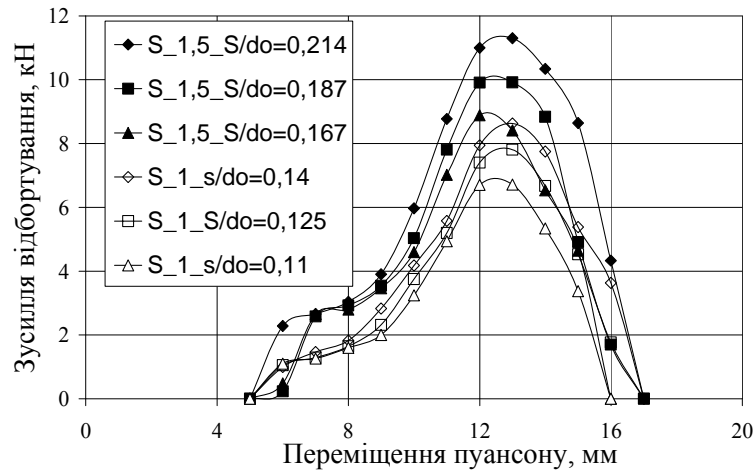


Рис. 1. Залежність зусилля відбортування від переміщення пуансону

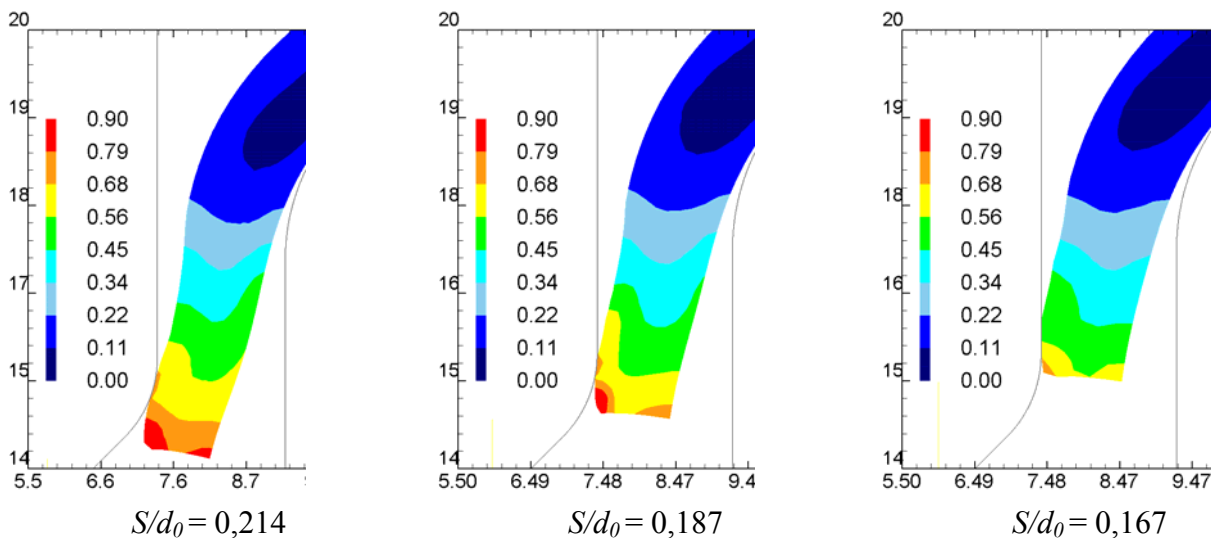


Рис. 2. Кінцева форма виробів та розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  при відбортуванні заготовок товщиною 1,5 мм (розміри в мм)

Аналогічно змінюється геометрична форма відбортованої частини та характер розподілу інтенсивності деформацій в ній в залежності від відносної товщини  $S/d_0$  при відбортуванні заготовки товщиною 1 мм (рис. 3).

Величину зміцнення металу після пластичної деформації визначали по розподілу інтенсивності напружень в здеформованій частині заготовки. Зміцнення металу в стінці при відбортуванні заготовок товщиною 1,5 мм починається на радіусі заокруглення і досягає максимального значення 610 МПа на торці стінки для  $S/d_0 = 0,214$  і 187. Метал зміцнюється в 3 рази в порівнянні з вихідним станом. Для відносної товщини  $S/d_0 = 0,167$  отримано  $\sigma_i = 510$  МПа. При відбортуванні заготовок товщиною 1 мм (рис. 5) отримані наступні максимальні значення інтенсивності напружень для всіх величин  $S/d_0$  – 510 МПа. Таким чином, для з'єднання відбортованих виробів з іншими деталями за допомогою різьби необхідно використовувати відбортування з більшими значеннями відносної товщини заготовки.

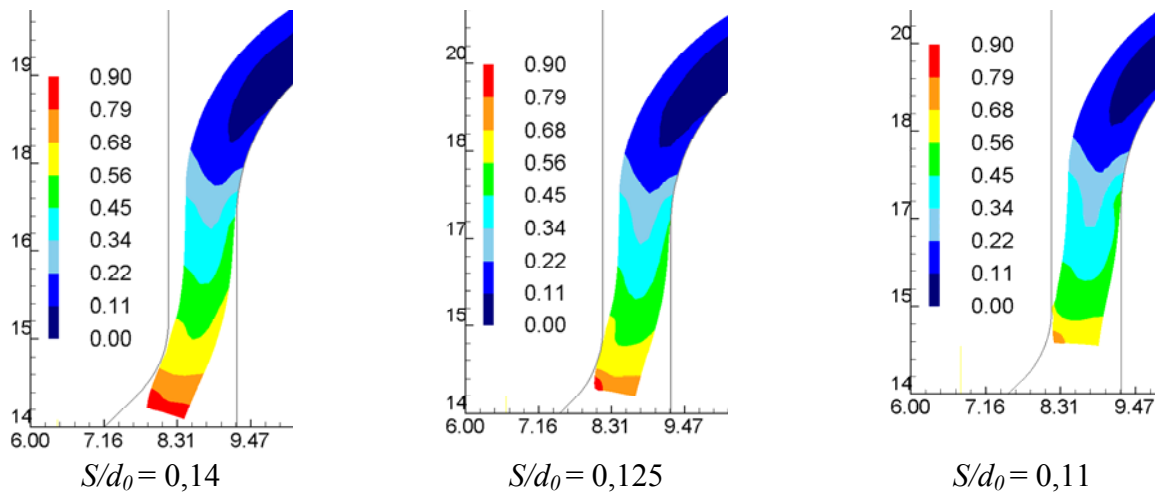


Рис. 3. Кінцева форма виробів та розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  при відбортуванні заготовок товщиною 1 мм (розміри в мм)

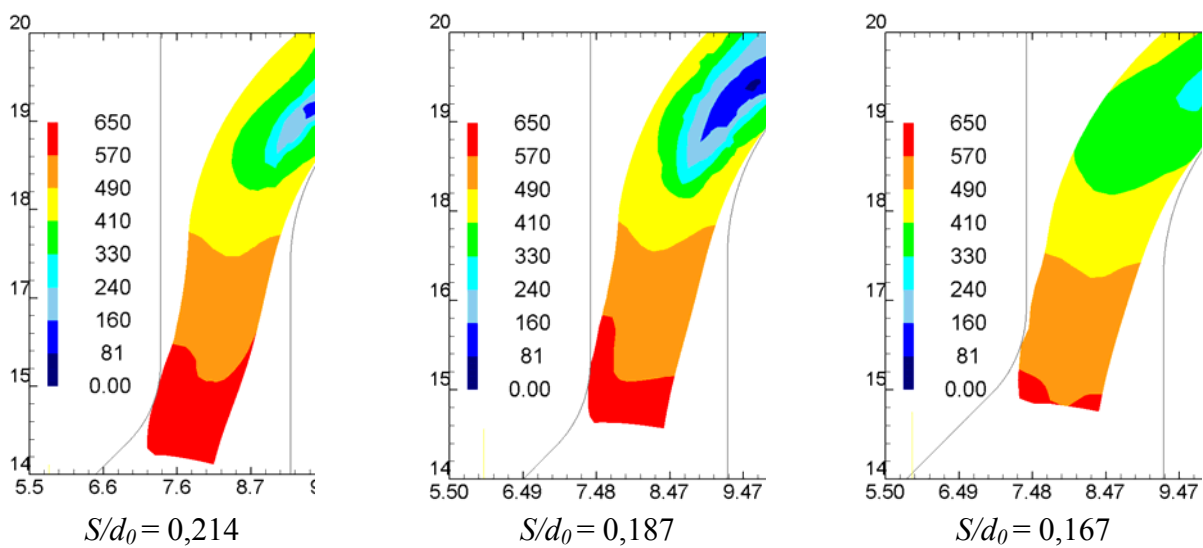


Рис. 4. Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  при відбортуванні заготовок товщиною 1,5 мм (розміри в мм)

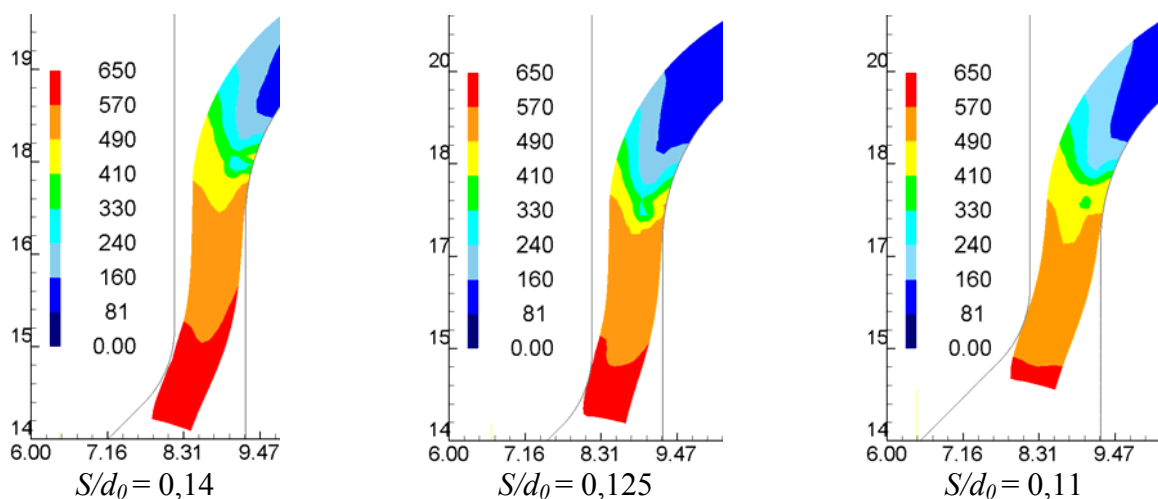


Рис. 5. Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  при відбортуванні заготовок товщиною 1 мм (розміри в мм)

З використанням даних по напружено-деформованому стану був визначений ступінь використання ресурсу пластичності  $\psi$  zdeформованого металу. Розподіли його по об'єму zdeформованої заготовки при відбортуванні заготовок товщиною 1,5 мм і 1 мм представлені

на рис. 6 і 7 відповідно. З рисунків видно, що із збільшенням величини  $S/d_0$  ступінь використання ресурсу пластичності zdeформованого металу зростає. Для з'єднання відбортованих виробів з іншими деталями розвальцюванням необхідно проводити відбортування з малими значеннями відносної товщини.

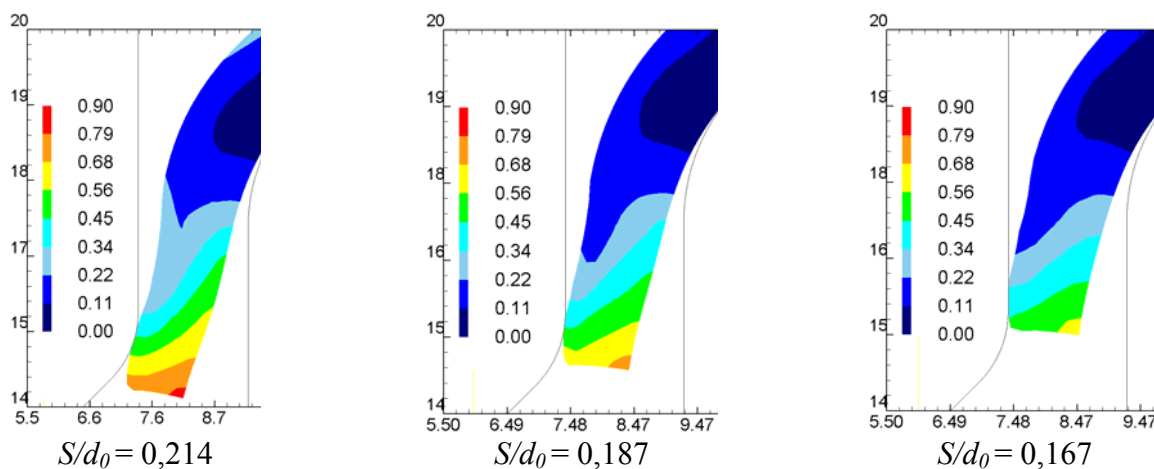


Рис. 6. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності  $\psi$  при відбортуванні заготовок товщиною 1,5 мм (розміри в мм)

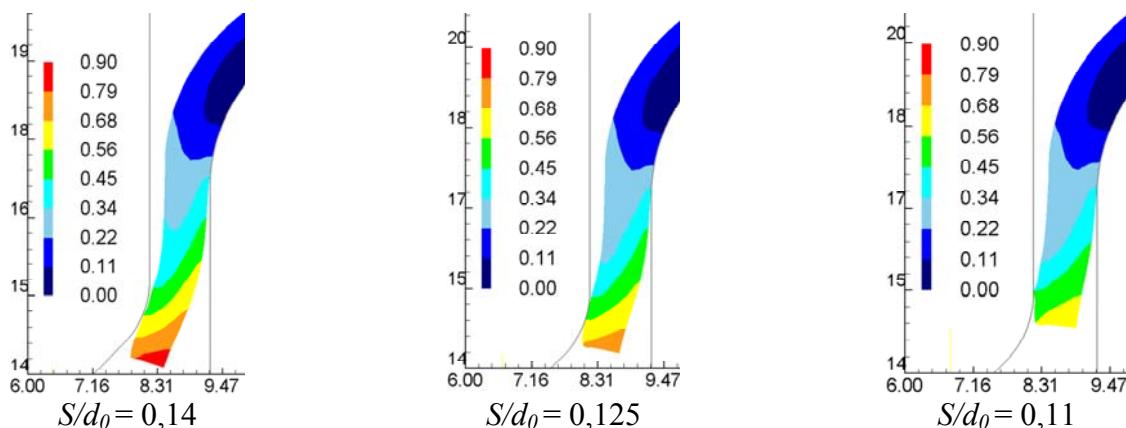


Рис. 7. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності  $\psi$  при відбортуванні заготовок товщиною 1 мм (розміри в мм)

Для проведення експериментальних досліджень використовували шість заготовок (рис. 8) із сталі 08 кп зовнішнім діаметром  $d_z = 48$  мм. Три з них мали товщину 1 мм, і ще три мали товщину 1,5 мм. В заготовках були зроблені отвори діаметрами  $d_0 = 7, 8$  та 9 мм. Розміри заготовок та величини відносної товщини приведені в табл. 1. Робочий інструмент, який використовували в дослідженнях, складався з двох конічних пуансонів з діаметрами 16,3 і 14,8 мм і кутами конусу  $90^\circ$ , а також з матриці діаметром 18,5 мм і радіусом заокруглення 3 мм (рис. 9).

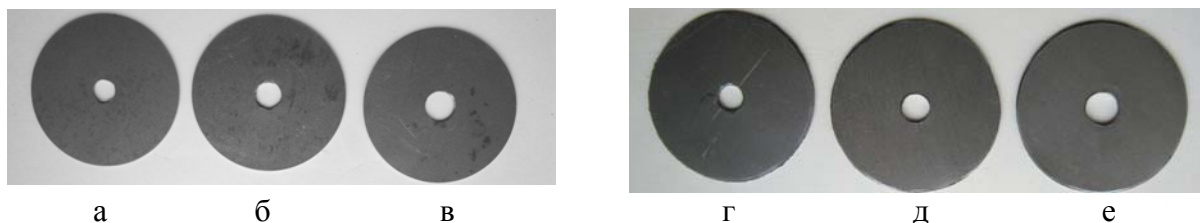


Рис. 8. Заготовки, що використовувалися в експерименті:

а –  $S = 1$ ;  $d = 7$  мм; б –  $S = 1$ ;  $d = 8$  мм; в –  $S = 1$ ;  $d = 9$  мм; г –  $S = 1,5$ ;  $d = 7$  мм; д –  $S = 1,5$ ;  $d = 8$  мм; е –  $S = 1,5$ ;  $d = 9$  мм

Таблиця 1  
Розміри заготовок

$S$ , мм	$d_0$ , мм	$S/d_0$
1	7	0,142
1	8	0,125
1	9	0,111
1,5	7	0,214
1,5	8	0,187
1,5	9	0,166



Рис. 9. Пуансон і матриця для відбортуння

Схема штампу для відбортуння наведена на рис. 10. Плоска заготовка 1 товщиною  $S$  з попередньо пробитим отвором діаметром  $d_0$  встановлюється на матрицю 2 з радіусом заокруглення  $R_m = 3$  мм, яка в свою чергу встановлюється на плиту 3. Заготовка 1 фіксується і притискається до матриці 2 за допомогою контейнера 4. Відбортуння відбувається пуансоном 5. Експериментальні дослідження проводилися на випробувальній машині TIRA test 2300 (рис. 11), яка дозволяє фіксувати графік залежності зусилля від переміщення пуансону. Зада- на швидкість деформування дорівнювала 1 мм/сек. Використовували змащення ВНИИП-232.

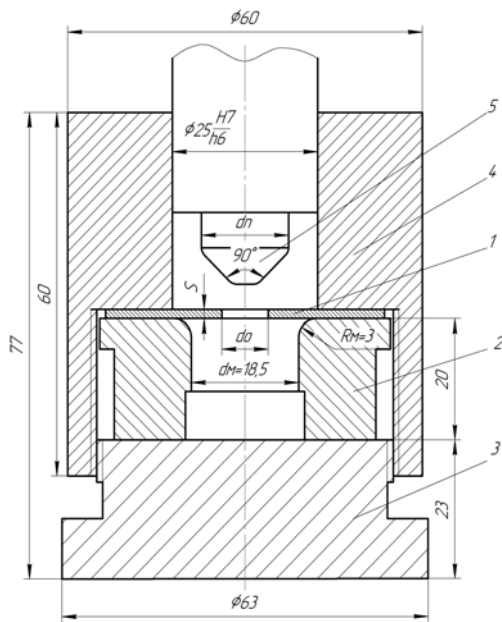


Рис. 10. Схема штампу для відбортуння

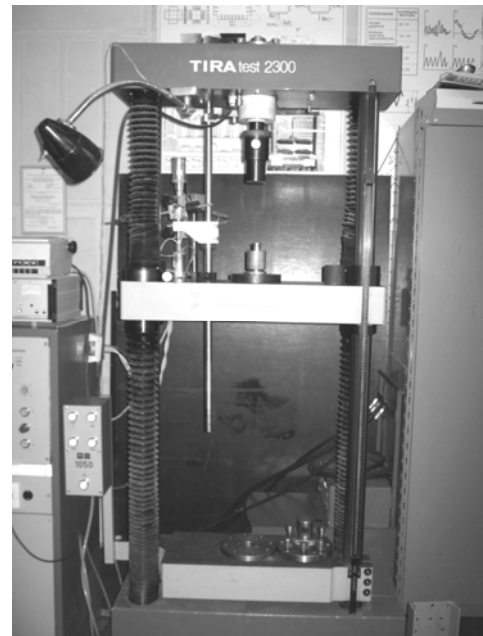


Рис. 11. Випробувальна машина TIRA test 2300 з встановленим штампом

Отримані вироби після відбортуння показані на рис. 12.

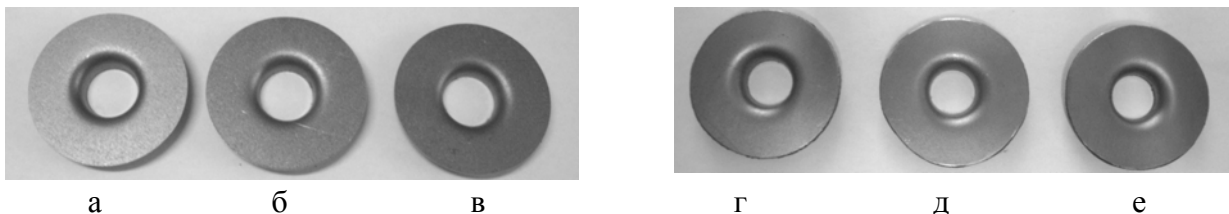


Рис. 12. Вироби, які отримані відбортунням:

а –  $S = 1$ ;  $d = 7$  мм; б –  $S = 1$ ;  $d = 8$  мм; в –  $S = 1$ ;  $d = 9$  мм; г –  $S = 1,5$ ;  $d = 7$  мм; д –  $S = 1,5$ ;  $d = 8$  мм; е –  $S = 1,5$ ;  $d = 9$  мм

Експериментальні залежності зусилля відбортуння від переміщення пуансону представлені на рис. 13.

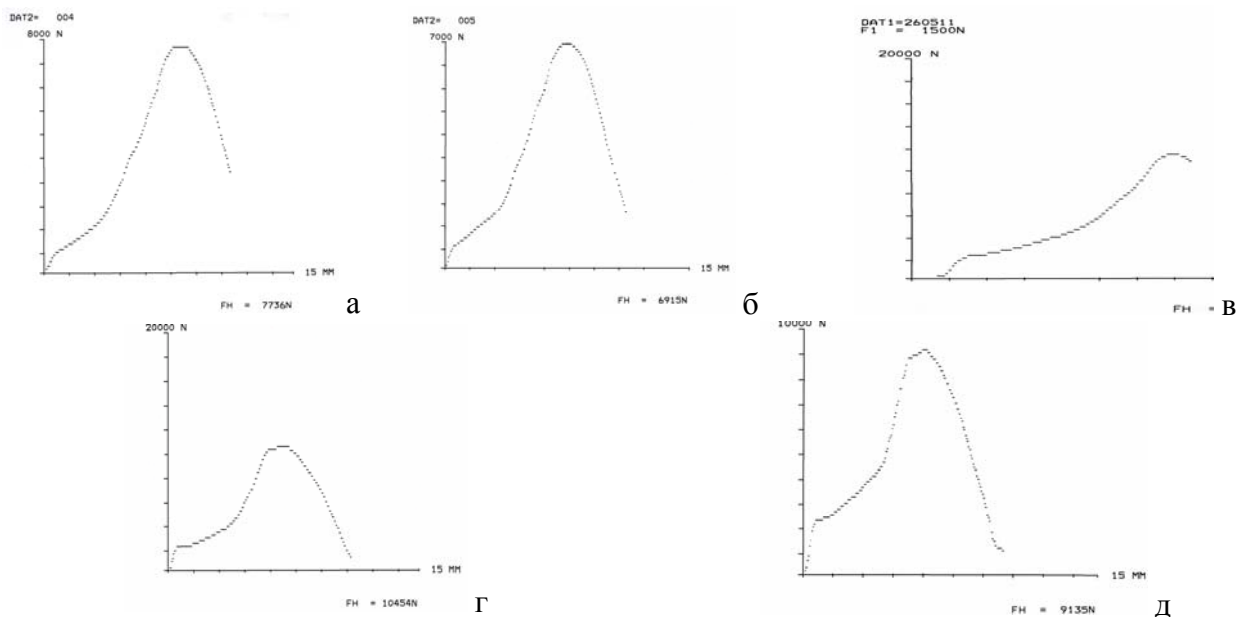


Рис. 13. Експериментальні графіки залежності зусиль відбортування від переміщення пуансона:

а –  $S = 1$ ;  $d = 7$  мм; б –  $S = 1$ ;  $d = 8$  мм; в –  $S = 1,5$ ;  $d = 7$  мм; г –  $S = 1,5$ ;  $d = 8$  мм; д –  $S = 1,5$ ;  $d = 9$  мм

В табл. 2 наведено порівняння результатів моделювання і експериментів по максимальному зусиллю відбортування ( $P$ ) та розрахована похибка  $\Delta$ .

Таблиця 2

Експериментальні і теоретичні значення максимального зусилля відбортування

$S$	$d_0$	$S/d_0$	$P_{\text{теор}}, \text{кН}$	$P_{\text{експ}}, \text{кН}$	$\Delta, \%$
1	7	0,142	8,63	7,74	10
1	8	0,125	7,81	6,92	11
1	9	0,111	6,71	6,3	6
1,5	7	0,214	11,3	11,26	0,5
1,5	8	0,187	9,92	10,45	5
1,5	9	0,166	8,89	9,14	3

Для порівняння розрахункових і експериментальних даних по зміцненню здеформованого металу проводили заміри мікротвердості в 9 точках по висоті відбортованої частини на мікротвердомірі ПМТ-3 на зразках, які показані на рис. 14. Одночасно виконували заміри розмірів відбортованої частини заготовки. Навантаження, яке прикладалося, дорівнювало 100 гс.

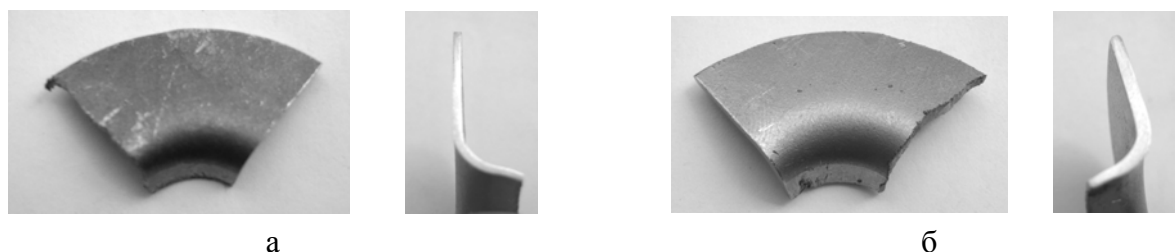


Рис. 4. Частини заготовок, які використовувалися для визначення мікротвердості: а – товщиною 1 мм; б – товщиною 1,5 мм

Застосовували формулу Г. Д. Деля  $\sigma_i = 0,33 \text{ HV}$  для знаходження максимального значення інтенсивності напружень  $\sigma_i$ . Величини мікротвердості, товщини  $S$  та похибка  $\Delta_s$  наведені в табл. 3, максимальні значення інтенсивності напружень в табл. 4. Як видно з таблиць відхилення теоретичних даних від експериментальних змінюються лежать в межах похибки 0,5–11 %.

Таблиця 3

Експериментальні і теоретичні значення товщини та величина мікротвердості по висоті відбортованої частини

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
HV, кг/мм <sup>2</sup>	133	136	153	158	148	143	140	139	131
<i>S</i> <sub>експ</sub> , мм ( <i>S</i> = 1 мм)	0,68	0,71	0,74	0,86	0,93	0,98	0,98	0,98	0,98
<i>S</i> <sub>теор</sub> , мм ( <i>S</i> = 1 мм)	0,62	0,72	0,79	0,90	0,94	0,95	0,99	0,99	0,99
$\Delta s$ , %	9	1	6	4	1	3	1	1	1
HV, кг/мм <sup>2</sup>	158	173	183	180	183	173	187	156	153
<i>S</i> <sub>експ</sub> , мм ( <i>S</i> = 1,5 мм)	0,79	1,11	1,27	1,48	1,49	1,5	1,5	1,5	1,5
<i>S</i> <sub>теор</sub> , мм ( <i>S</i> = 1,5 мм)	0,83	1,11	1,33	1,41	1,47	1,49	1,49	1,49	1,49
$\Delta s$ , %	4,8	0	4	4	1	1	1	1	1

Таблиця 4

Експериментальні і теоретичні максимальні значення інтенсивності напружень у відбортованій частині

<i>S</i> , мм	$\sigma_{i\text{ теор}}$ , МПа	$\sigma_{i\text{ експ}}$ , МПа	$\Delta$ , %
1,0	605	581	4
1,5	603	604	1

## ВИСНОВКИ

Розроблені кінцево-елементні моделі процесу відбортування для круглих отворів. Проведене моделювання відбортування з різними значеннями відносної товщини заготовки. Визначені кінцева геометрія виробів, силові режими, напружено-деформований стан, ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу. Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність розроблених моделей.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке* / В. П. Романовский. – [6-е изд., перераб. и доп.]. – Ленингр. отд-ние : Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. *Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка* / А. Ю. Аверкиев, Ю. А. Аверкиев, Е. А. Белов и др.; под ред. А. Д. Матвеева; ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1985–1987. – 544 с.
3. Калюжний О. В. *Моделювання методом скінченних елементів процесу відбортування отворів в листових заготовках із сталі 20* / О. В. Калюжний, С. А. Пахолко // *Машинобудування. Тези доповідей загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів*. – НТУУ «КПІ»; ММІ, 2010 р. – С. 60–62.
4. Калюжний О. В. *Прогнозування та забезпечення якості виробів в процесах відбортування* / О. В. Калюжний // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. – Харьков, 2009. – № 32. – С. 118–122.
5. Костов Емил. *Разширяване на технологичните възможности на процеса бортоване* / Е. Костов // *Инж. науки*. – 2007; 44. – № 2. – С. 52–57.

Калюжний О. В. – канд. техн. наук, ст. викл. НТУУ «КПІ» ;

Пахолко С. А. – інженер НТУУ «КПІ».

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ.

E-mail: k\_ OMD&ukr.net