

## АНАЛІЗ СИЛОВИХ РЕЖИМІВ ТА ЯКОСТІ ВИРОБІВ ПРИ ВІДБОРТУВАННІ ПУАНСОНАМИ РІЗНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

*Методом конечных элементов выполнен анализ отбортовки полых заготовок, которые получены вытяжкой из малоуглеродистой стали. Определено влияние цилиндрического, конического и сферического пуансонов на силовые режимы отбортовки и работу деформации. Установлена конечная геометрия изделия, напряженно-деформированное состояние, упрочнение и степень использования ресурса пластичности металла после деформации. Показана возможность получения изделий с ровной стенкой после отбортовки за счет коррекции формы пуансона. По результатам расчета разработана технология изготовления полых изделий из малоуглеродистой стали. Технология состоит из операций вытяжки, пробивки отверстий под отбортовку и отбортовки.*

*The analysis of burring of hollow perform obtained by drawing of blanks made of low-carbon steel was carried out by finite element method. The influence of cylindrical, conical and spherical punches on the load modes of burring and work of deformation was determined. The final geometry of detail, mode of deformation, strengthening and ratio of metal plasticity resource after deformation were determined. Possibility of making details with smooth wall after burring because of correction of punch's shape was shown. By results of calculation the manufacturing method of hollow products from low-carbon steel is developed. The manufacturing method consists of operations of a drawing, punching for burring and burring.*

**Вступ.** Відборткування – розповсюджена формоутворююча операція листового штампування. Вона використовується для збільшення висоти деталей, які отримують витягуванням, утворення виступів на плоских листових заготовках і в доній частині порожнистих виробів. Вказані виступи необхідні для приєднання інших деталей розвальцюванням, зварюванням та за допомогою різьби. Також відборткування використовують для отримання виробів типу втулки з фланцями. Відборткування може бути без потоншення та з потоншенням стінки. В літературних джерелах по визначенню параметрів відборткування розрахунки зводяться до знаходження коефіцієнта відборткування за один перехід [1-2]. Проте майже відсутні дані по визначенню геометрії відборткованої частини з урахуванням пружної деформації і потоншення матеріалу, а також по зміцненню здеформованого металу після відборткування. На силові режими та формозміну металу в процесах відборткування суттєво впливають геометрія деформуючого інструменту - матриць і пуансонів та зазор між пуансоном та матрицею. Методом скінченних елементів (МСЕ) досліджений вплив радіуса заокруглення матриці на зусилля відборткування, кінцеву геометричну форму відборткованої частини та зміцнення здеформованого металу [3-4]. В роботах [1-2] для процесів відборткування циліндричних отворів рекомендують пуанسونи циліндричної, конічної та сферичної форми. Частково вплив геометрії пуансонів на процес відборткування розглянутий в роботі [5]. Однак для вказаних пуансонів відсутні дані по геометричній формі відборткованої частини та недостатньо відомостей по зміцненню здеформованого металу. Визначення таких даних дозволить удосконалити існуючі та розробити нові способи відборткування.

**Постановка задачі.** Метою даної роботи є визначення шляхом моделювання МСЕ впливу геометричної форми пуансонів на силові режими, закономірності формозміни металу та кінцеву геометричну форму здеформованої частини в процесах відборткування для підвищення якості виробів. Показниками якості при відбортванні є кінцева геометрична форма стінки, зміцнення здеформованого металу.

**Результати досліджень.** Для створення скінченно-елементних моделей і проведення розрахункового аналізу процесів відборткування використовували спеціалізований пакет прикладних програм для аналізу процесів холодного об'ємного та листового штампування, який розроблений на кафедрі МПМ та РП НТУУ «КПІ». Розрахунковий аналіз проводили для віссиметричних порожнистих листових заготовок із маловуглецевої сталі 08 товщиною 1,5 міліметра (мм), які отримані витягуванням.

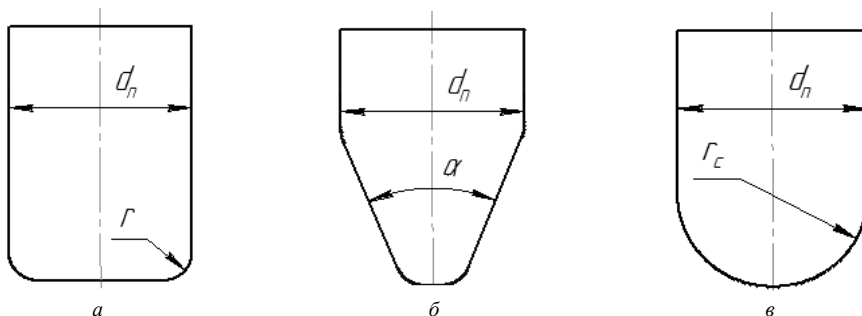


Рис. 1. Геометричні форми пуансонів для відборткування: а- циліндрична, б- конічна, в-сферична

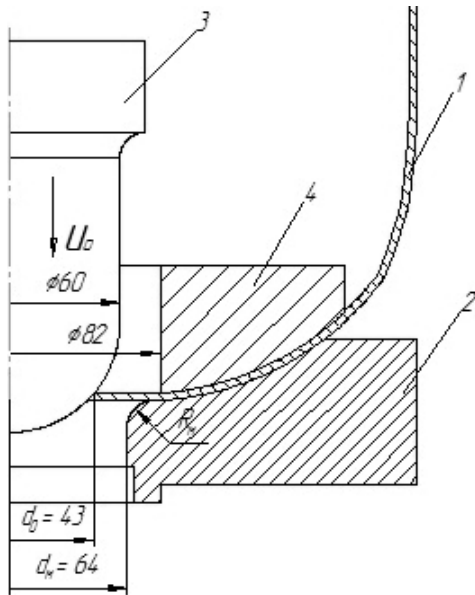


Рис. 2. Розрахункова схема процесу відбортування сферичним пуансоном

Метал вважався ізотропним пружно-пластичним. Математичні моделі процесів відбортування враховували геометричну форму пуансонів і матриць, тертя на контактуючих поверхнях, пружні властивості сталі, зміцнення здеформованого металу по діаграмі істинних напружень, можливість руйнування при холодній формозмінні та розвантаження після пластичної деформації. Використовували пуанسونи наступної геометричної форми (рис. 1): циліндричні діаметром  $d_p$  з плоскими торцями і радіусами заокруглень ( $r$ ) 2, 4 і 8 мм; конічні з кутами ( $\alpha$ )  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  і  $60^\circ$ ; сферичні з радіусом сфери ( $r_c = d_p/2$ ) 30 мм. Діаметр циліндричної частини пуансонів  $d_p = 60$  мм. Оскільки задача віссиметрична, то розглядали половину заготовки. Для прикладу наведена розрахункова схема для відбортування сферичним пуансоном (рис. 2). Порожниста заготовка 1 з отвором в донній частині діаметром  $d_0 = 43$  мм, яка отримана витягуванням, встановлюється на матрицю 2 з радіусом заокруглення  $R_m = 7$  мм. Діаметр матриці  $d_m = 63$  мм. За допомогою притискача 4 заготовка фіксується на матриці 2. Відбортування відбувається за допомогою пуансона 3. Деформуючий інструмент при моделюванні вважався абсолютно жорстким. Коефіцієнт відбортування ( $d_0/d_m$ ) для всіх пуансонів був однаковий. Величина зазору між пуансоном та матрицею відповідала товщині стінки заготовки. При моделюванні процес відбортування

розподілявся на певну кількість кроків навантаження. Пуансон рухався вниз із швидкістю деформування 2 мм/сек з переміщенням на кожному кроці навантаження  $U_0 = 0,5$  мм. Результати розрахунків виводили через кожних 5 кроків навантаження, що дало змогу спостерігати як змінюються форма і розміри відбортованої частини та виявити можливість руйнування під час формоутворення виробів.

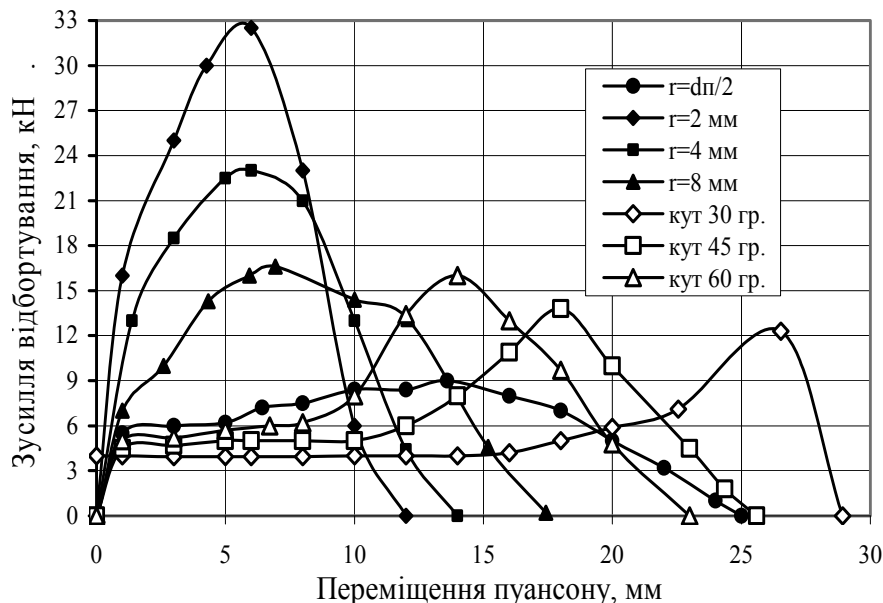


Рис. 3. Залежність зусилля відбортування від переміщення пуансону

В результаті проведених розрахунків була визначена залежність зусилля відбортування від переміщення пуансону (рис. 3). Найменше зусилля (9 кН) отримане при відбортуванні сферичним пуансоном, найбільше (32 кН)— при використанні плоского пуансону з радіусом заокруглення циліндричної частини і торця  $r = 2$  мм. Радіус заокруглення  $r$  циліндричного пуансону впливає на величину зусилля формоутворення. Так при радіусі  $r = 8$  мм зусилля зменшується на 46 % в порівнянні з радіусом заокруглення  $r = 2$  мм. Циліндрична форма пуансона  $r = 2$  мм для відбортування потребує найменшого ходу повзуна пресу в порівнянні з іншими пуансонами.

При відбортуванні конічним пуансоном мінімальне зусилля встановлене для кута  $30^\circ$ . Збільшення кута до  $60^\circ$  приводить до зростання зусилля на 15 %. Використання конічних і сферичних пуансонів потребує більшого ходу повзуна пресу в порівнянні з циліндричними. Крім зусилля відбортування, з вказаного графіку можна визначити роботу деформації для реалізації процесів відбортування на кривошипному пресовому обладнанні.

Моделюванням встановлені кінцева геометрична форма здеформованої заготовки та напружено-деформований стан в ній. Кінцева форма та розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_e$  по об'єму здеформованої заготовки, яка відбортована циліндричним пуансоном з різним радіусом заокруглення торця, представлені на рис. 4.

Тонкими лініями зображені пуансон радіусом (30 мм) і матриця (радіусом 31,5 мм). Найбільше викривлення стінок по висоті і по діаметру при відбортуванні має місце при радіусі пуансону  $r=2$  мм. Збільшення радіуса  $r$  приводить до вирівнювання відбортованої стінки по висоті, хоча торець має викривлення в сторону отвору, величина якого складає 0,18 мм.

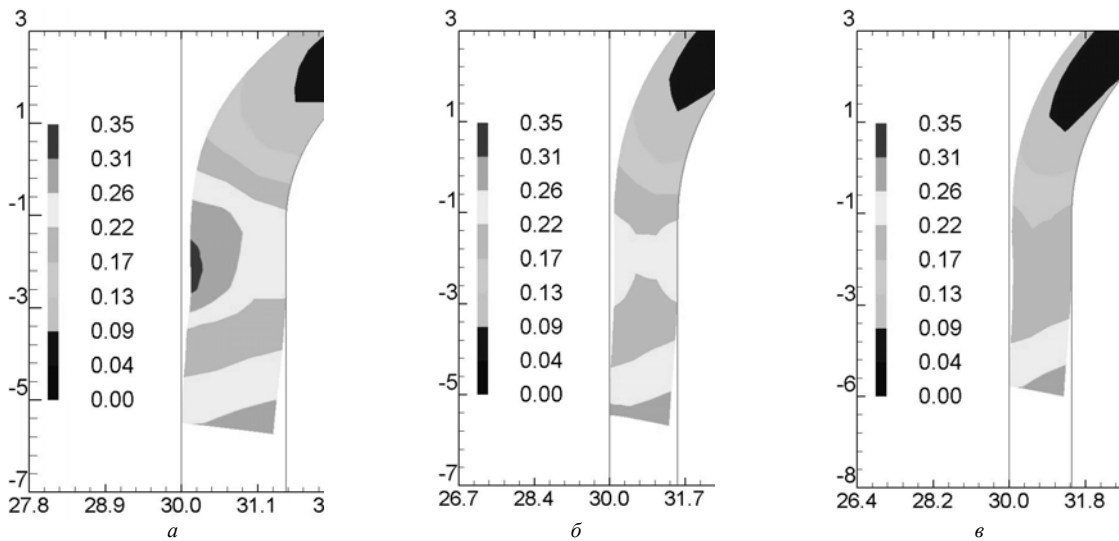


Рис. 4. Кінцева форма zdeформованої частини та розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_z$  при відбортуванні циліндричним пуансоном з різним радіусом заокруглення торця:  $r = 2$  мм (а),  $r = 4$  мм (б),  $r = 8$  мм (в). Розміри наведені в міліметрах

Величини інтенсивності деформацій в відбортованій стінці також залежать від радіуса заокруглення  $r$ . Інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією по ширині і висоті стінки проходить при використанні пуансону з  $r = 2$  мм. По середині стінки  $\epsilon_z$  досягає значення 0,22-0,35. Вказана форма пуансону може бути рекомендована для відбортування під подальше нарізання різьби для з'єднання деталей на внутрішній або зовнішній стороні стінки. Збільшення радіуса  $r$  пуансону приводить до більш рівномірного розподілу  $\epsilon_z$  по висоті стінки.

Кут конусу пуансона  $\alpha$  (див. рис. 1) також впливає на кінцеву форму відбортованої частини та розподіл інтенсивності деформацій в ній. Геометрична форма zdeформованої заготовки та розподіл  $\epsilon_z$  при відбортуванні вказаними пуансонами показані на рис. 5.

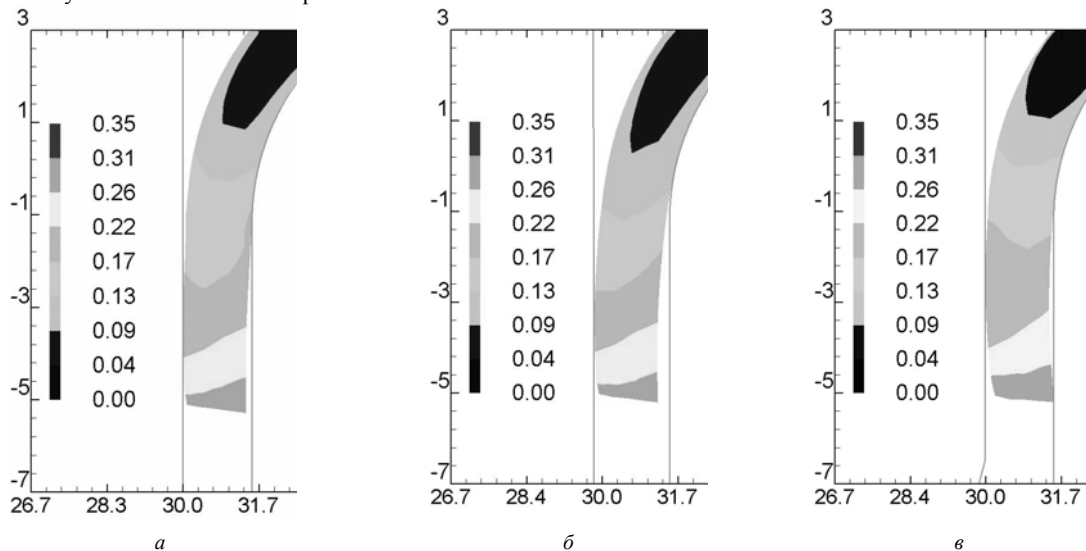


Рис. 5. Кінцева форма zdeформованої частини та розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_z$  при відбортуванні кінчними пуансонами:  $\alpha = 60^\circ$  (а),  $\alpha = 45^\circ$  (б),  $\alpha = 30^\circ$  (в). Розміри в міліметрах

Найменший зазор між відбортованою частиною заготовки і матрицею отримано для кута пуансона  $30^\circ$ . Однак, при відбортуванні цим пуансоном має місце максимальне викривлення торця стінки. Розподіл інтенсивності деформацій практично однаковий для розглянутих кутів пуансонів. Інтенсивність деформацій по висоті стінки змінюється від 0,1 на закінченні радіуса заокруглення матриці до 0,3 на торці стінки. Узагальнені результати по величинах максимальних зазорів між zdeформованою частиною заготовки і деформуючим інструментом при відбортуванні циліндричними і кінчними пуансонами приведені в таблиці 1.

Розрахунковим шляхом встановлена можливість отримання рівної відбортованої стінки по всій висоті за допомогою уточнення діаметра пуансону. Для прикладу, на рис. 6 наведена геометрична форма стінки з розподілом інтенсивності

деформацій  $\epsilon_i$  після відбортування сферичним пуансоном традиційної форми (рис. 6а). В результаті потоншення стінки між матрицею і відбортаною частиною виникає зазор, максимальний розмір якого складає 0,06мм.

Крім того, по причині викривлення торця стінки також виникає зазор 0,1 мм між пуансоном і стінкою. Сферичний пуансон забезпечує отримання при відбортуванні більш точної стінки в порівнянні з циліндричними і конічними пуансонами. Стінка, яка отримана скорегованою геометрією пуансону, представлена на рис. 6б. Збільшення діаметра пуансона на 0,2 мм забезпечило отримання рівної стінки по висоті з незначною відмінністю в розподілі інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  в заготовці на радіусі заокруглення матриці.

Таблиця 1

Величини зазорів

Геометрія пуансонів	Величини зазорів в міліметрах	
	Між пуансоном і заготовкою	Між матрицею і заготовкою
$r=2$ мм	0,14	0,18
$r=4$ мм	0,11	0,19
$r=8$ мм	0,1	0,18
$\alpha=60^\circ$	0,08	0,13
$\alpha=45^\circ$	0,11	0,27
$\alpha=30^\circ$	0,2	0,10

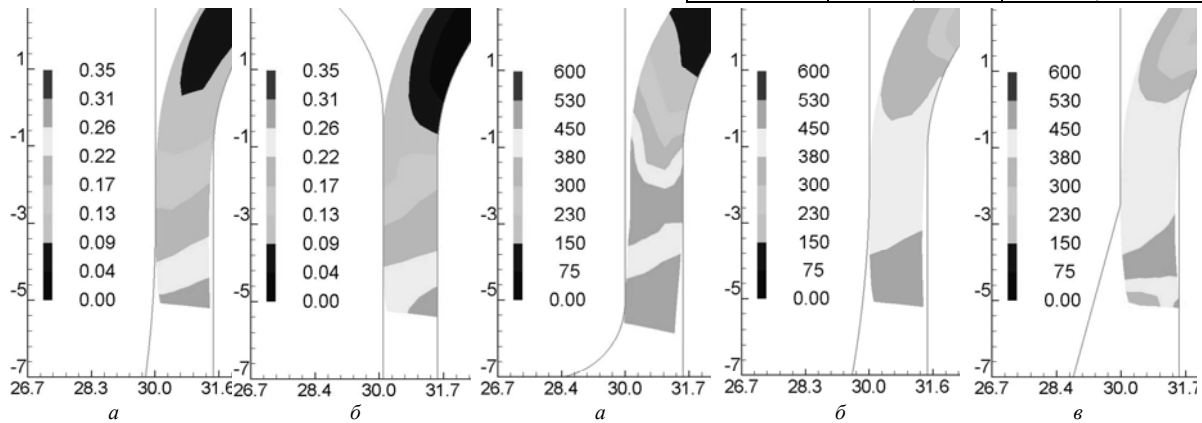


Рис. 6. Геометрична форма стінки з розподілом інтенсивності деформацій після відбортування сферичним пуансоном: а- традиційної форми, б- скорегованої форми. Розміри в міліметрах

Рис. 7. Розподіл інтенсивності напружень в заготовці після відбортування однакових заготовок пуансонами наступної геометричної форми: циліндричний  $r = 2$  мм (а), сферичний (б); конічний  $\alpha = 30^\circ$  (в). Розміри в міліметрах

Величину зміцнення металу визначали по розподілу інтенсивності напружень в zdeформованій частині заготовки. Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  після відбортування циліндричним, сферичним та конічним пуансонами представлений на рис. 7. Найбільше зміцнення металу по висоті стінки має місце при відбортуванні циліндричним пуансоном (рис. 7а). Починаючи з радіуса заокруглення матриці в стінці отримано  $\sigma_i=485$  МПа. Метал зміцнюється в 2,4 рази в порівнянні з вихідним станом. При відбортуванні сферичним пуансоном метал зміцнюється по висоті стінки більш рівномірно (рис. 7б), ніж в попередньому випадку, та при використанні конічного пуансону (рис. 7в). Практично по всій висоті стінки відбортування сферичним пуансоном забезпечує величину  $\sigma_i=415$  МПа.

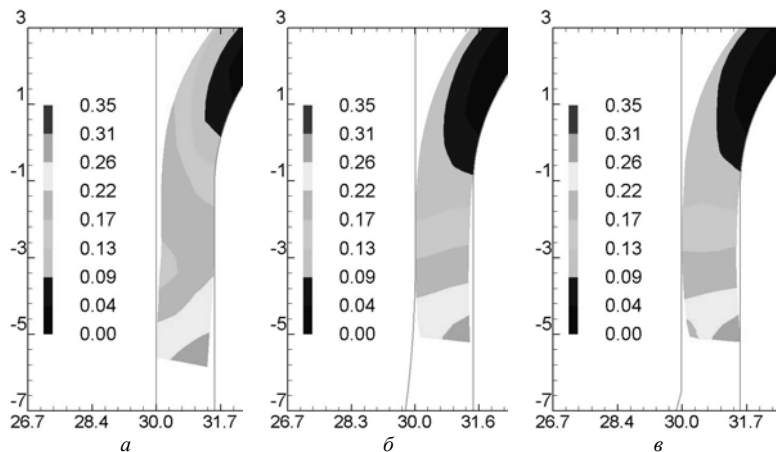


Рис. 8. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності в заготовці після відбортування однакових заготовок пуансонами наступної геометричної форми : циліндричний  $r_p = 2$  мм (а), сферичний (б); конічний  $\alpha = 30^\circ$  (в)



Рис. 9. Заготовки із маловуглецевої сталі після витягування та відбортування

З використанням розрахункових даних по напружено-деформованому стану був визначений ступінь використання ресурсу пластичності  $\psi$  zdeформованого металу. Розподіл його по об'єму zdeформованої заготовки після відбортування пуансонами різної геометричної форми представлений на рис. 8. Для всіх вказаних форм пуансонів максимальне значення  $\psi=0,3$  (при  $\psi=1$  починається руйнування). Оскільки пластичність металу використовується на третину, то відкриваються можливості потоншення стінки при відбортуванні для забезпечення точності стінки та необхідного зміцнення zdeформованого металу відбортаної частини.

Результати розрахунків стали підґрунтям для розробки технології виготовлення порожнистих виробів з мало вуглецевої сталі операціями листового штампування. На першому переході із листової заготовки витягуванням отримується порожнистий напівфабрикат. Наступна операція – підрізка торця заготовки механічною обробкою для видалення флестонів, які утворюються при витягуванні. На третьому переході виконується пробивання отвору під подальше відбортування. Четвертий перехід включає операцію відбортування. Напівфабрикати після витягування і підрізки торців стінки та готові вироби після відбортування зображені на рис. 9.

#### **Висновки.**

1. Методом скінченних елементів проведено моделювання процесу відбортування циліндричним пуансоном з різним радіусом заокруглення торця, конічним з різним кутом конуса та сферичним.

2. Встановлено, що найменше зусилля відбортування має місце при використанні сферичного пуансона, найбільше – при відбортуванні циліндричним пуансоном, причому збільшення радіуса заокруглення приводить до зменшення зусилля. Кут конусу пуансону також впливає на зусилля деформування. При збільшенні кута конусу зростає зусилля відбортування.

3. Встановлена геометрична форма zdeформованої частини заготовки. Розглянуті пуансони не забезпечують отримання стінки без викривлень при зазорі між матрицею і пуансоном, який дорівнює товщині вихідної заготовки. Показано можливість отримання рівної стінки за рахунок корегування діаметра пуансону.

4. Визначений напружено-деформований стан, зміцнення та ступінь використання ресурсу пластичності zdeформованого металу.

5. При необхідності нарізання різьби в відбортованій частині її необхідно отримувати циліндричним пуансоном з малим радіусом заокруглення, яка забезпечує максимальне зміцнення zdeформованого металу.

6. Визначений ступінь використання ресурсу пластичності в стінках відбортованої частини заготовки дозволяє виконувати подальші операції потоншення стінок відбортованої частини без відпаду відбортованих заготовок.

#### **Список літератури.**

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. / В. П. Романовский — Ленингр. отделение: Машиностроение., 1979. — 520 с.
2. Аверкиев Ю.А. 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. Калужний О.В. Моделювання методом скінченних елементів процесу відбортування отворів в листових заготовках із сталі 20 / О.В. Калужний, С.А. Пахолко // Машинобудування. Тези доповідей загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів. — НТУУ «КПІ»; ММІ, 2010 р. — С. 60 — 62.
4. Калужний О.В. Прогнозування та забезпечення якості виробів в процесах відбортування / О.В. Калужний // Вестник Национального технического университета «ХПИ». — Харьков; 32'2009 р. — С. 118 — 122.
5. Костов Емил. Разширяване на технологичните възможности на процеса бортоване / Е. Костов // Инж. науки, 2007; 44, №2. — С. 52 — 57.