

ter-pressure on the inner surface of wall during swaging ensures obtaining such type of details. It was found out the influence of die radius at energy-power conditions of deformation, metal forming and final dimensions after swaging. Necessary data for technology designing and die tooling designing was determined.

**Keywords:** swaging of hollow workpieces, products with union, of die radius, energy-power conditions of deformation, final dimensions after.

УДК 621.9

*О. В. КАЛЮЖНИЙ*, канд. техн. наук, ст. викладач, НТУУ “КПІ”, Київ

### **АНАЛІЗ ІНЖЕНЕРНИМ МЕТОДОМ ПРОЦЕСУ ВІДБОРТУВАННЯ КРУГЛИХ ОТВОРІВ СФЕРИЧНИМ ПУАНСОНОМ У ЗПРОФІЛЬОВАНІЙ ЗАГОТОВЦІ**

В статті розглянуто аналіз процесу відборткування круглих отворів у зпрофільованій листовій заготовці, отримано аналітичні залежності для визначення зусилля відборткування та розмірів профілю вихідної заготовки, що забезпечить отримання виробів з стінкою постійної товщини. Проведене порівняння результатів моделювання та по аналітичних залежностях. Встановлено, що розбіжність результатів по силових режимах, розмірах профілю заготовки не перевищує 10%. Тому залежності можна рекомендувати для інженерних розрахунків параметрів відборткування круглих отворів у зпрофільованій заготовці.

**Ключові слова:** інженерний метод, відборткування, зпрофільована заготовка, стінка постійної товщини.

**Вступ.** Відборткування отворів різноманітної конфігурації у листових заготовках – широко розповсюджена формоутворююча операція холодного листового штампування. Попереднє утворення отворів виконується пробиванням або механічною обробкою. При відборткуванні отворів використовують пуанسونи з плоским, сферичним або конічним торцем. Зусилля відборткування залежить від геометричної форми пуансону [1], однак практично відсутні дані про залежність технологічної пластичності металу, що деформується, від вказаної форми. Відомо, що при відборткуванні виникають значні розтягувальні тангенційні напруження, які є причиною потоншення стінки та швидкого вичерпання ресурсу пластичності zdeформованого металу. Це приводить до дефектів у вигляді тріщин на торці та бокових поверхнях відборткованої частини. Другим дефектом при формоутворенні виробів відборткуванням є викривлення циліндричної частини відборткованої стінки [2]. Про останній дефект не має даних в джерелах [3,4], які використовуються при розробленні технологічних процесів відборткування. Наявність дефектів суттєво знижує надійність і довговічність конструкцій, які складаються з відборткованих виробів і інших деталей, що з'єднані між собою за допомогою різьби та зварювання. Для виключення утворення вищевказаних дефектів був розроблений спосіб відборткування отворів у зпрофільованій заготовці [5]. Перед відборткуванням виконується профілювання товщини частини заготовки, що підлягає деформуванню. Найбільшу товщину заготовка має навколо отвору з поступовим зменшенням до вихідної товщини на радіусі, який відповідає початку заокруглення матриці. Однак, в літературних джерелах відсутні залежності для визначення розмірів профілю вихідної заготовки для забезпечення товщини відборткованої стінки, яка повинна бути не меншою, чим товщина вихідної заготовки. Також необхідно мати вирази для визначення силових режимів відборткування отворів у зпрофільованій заготовці.

Тому актуальною задачею є отримання простих, але достатньо точних, аналітичних залежностей для інженерних розрахунків таких параметрів на стадії проектування технологій виготовлення виробів відборткуванням.

**Мета роботи.** Метою роботи є проведення теоретичного аналізу процесу відборткування круглих отворів у зпрофільованій листовій заготовці та отримання аналітичних залежностей для визначення зусилля відборткування і розмірів профілю в вихідній заготовці, які забезпечать отримання виробів з стінкою постійної товщини.

© О. В. Калюжний, 2012

**Результати досліджень.** З використанням інженерного методу (ІМ) була розроблена математична модель відборткування круглих отворів сферичним пуансоном у зпрофільованій листовій заготовці. Розрахункова схема для аналізу показана на рис. 1. Задача вісесиметрична, наведена половина схеми до відборткування праворуч від вісі симетрії та в процесі відборткування ліворуч від вісі симетрії. Вихідна заготовка 1 встановлена на матриці 2 і деформується пуансоном 3. В заготовці 1 виконаний отвір радіусом  $r_0$ . Розміри профілю частини заготовки, що відбортковується: початкова товщина  $S_n$ , яка переходить лінійно в вихідну товщину  $S_0$  на радіусі  $R_1 = R_m + r_m$ . Потоншення заготовки при формотворенні починається з цього розміру. На заготовці виділений довільний радіус  $r_n$ . При відборткуванні зусиллям  $P_e$  на поверхні елементарного об'єму діють напруження  $p$  від пуансону та дотичне  $\tau$  від тертя і в об'ємі виникають розтягувальні напруження  $\sigma_\varphi$  і тангенційні  $\sigma_\theta$ . В момент відборткування радіус отвору  $r_0$  збільшився до величини  $r_{om}$ , а довільний радіус  $r_n$  – до радіуса  $R$ .

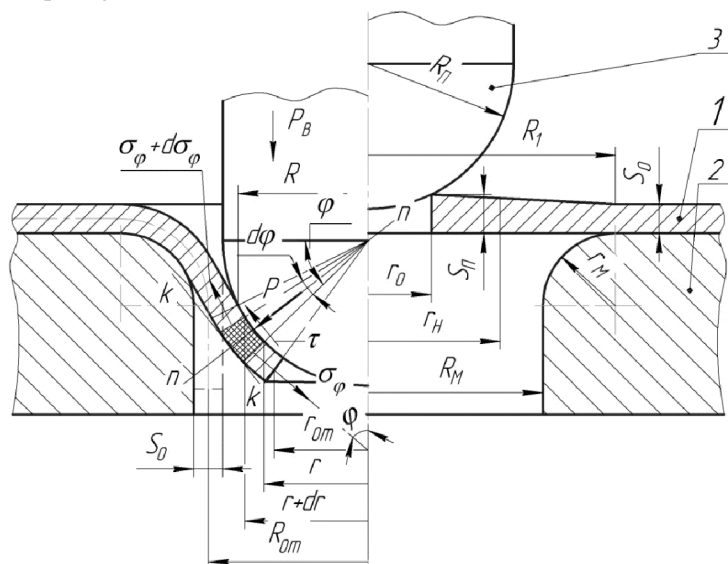


Рис. 1 – Розрахункова схема відборткування: 1 – заготовка, 2 – матриця, 3 – пуансон

Записуємо умову рівноваги сил, які виникають від діючих напружень, на напрямок  $n-n$ , що перпендикулярний дотичній  $k-k$ . При цьому нехтуємо величинами другого порядку і отримуємо:

$$pR_n d\varphi rd\theta - \sigma_\theta SR_n d\varphi d\theta \cos \varphi - \sigma_\varphi Srd\theta d\varphi = 0 \quad (1)$$

Із схеми маємо  $r = Rn \cos \varphi$ , а  $S$  - товщина елементарного об'єму. Після перетворень в формулі (1) знаходимо:

$$\frac{p}{S} = \frac{\sigma_\varphi}{R_n} + \frac{\sigma_\theta}{R_n} \quad (2)$$

Якщо аналогічно записати умову рівноваги сил на дотичну  $k-k$  то отримуємо друге рівняння рівноваги:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_\varphi Sr) - \sigma_\theta S + \frac{\tau r}{\sin \varphi} = 0 \quad (3)$$

Величину дотичного напруження приймаємо у вигляді:

$$\tau = \mu p \quad (4)$$

В (4)  $\mu$ - коефіцієнт тертя. Підставляємо (4) в (2) і, з урахуванням (3), отримуємо:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_{\varphi} S r) - \sigma_{\theta} S - \frac{\mu S r}{\sin \alpha} \left( \frac{\sigma_{\varphi}}{R_n} + \frac{\sigma_{\theta}}{R_n} \right) = 0 \quad (5)$$

Якщо на даному етапі аналізу нехтувати зміною товщини  $S$  при відбортуванні, і вважати  $S$  постійною величиною в рівнянні (5), то маємо:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_{\varphi} r) - \sigma_{\theta} - \frac{\mu r}{\sin \alpha} \left( \frac{\sigma_{\varphi}}{R_n} + \frac{\sigma_{\theta}}{R_n} \right) = 0 \quad (6)$$

Наближена умова пластичності в даному випадку має вигляд:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_s \quad (7)$$

Вирішимо задачу без врахування сил тертя. Тоді з (6) знаходимо:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_{\varphi} r) - \sigma_{\theta} = 0 \quad (8)$$

Після розділення змінних в (8) з урахуванням (7) та інтегрування отримуємо:

$$\ln(\sigma_{\varphi} - + \sigma_s) = -\ln r + C \quad (9)$$

Довільну постійну  $C$  знаходимо з граничної умови, при  $r = r_{om}$

напруження  $\sigma_{\varphi} = 0$ . Тоді кінцевий вираз для  $\sigma_{\varphi}$  після перетворень має вигляд:

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_s \left( 1 - \frac{r_{om}}{r} \right) \quad (10)$$

Максимальне напруження  $\sigma_{\varphi}^{\max}$  буде при  $r = R_{om}$ :

$$\sigma_{\varphi}^{\max} = \sigma_s \left( 1 - \frac{r_{om}}{R_{om}} \right) \quad (11)$$

Для визначення впливу зміцнення на напруження проведемо наближений аналіз.

Максимальне значення відносної тангенційної деформації розтягу  $\varepsilon_{\theta}$  в zdeформованій частині заготовки буде біля краю отвору і визначається наступним чином:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{r_{om} - r_o}{r_o} = \frac{\Delta r}{r_o} = x \quad (12)$$

Для врахування впливу зміцнення на напруження  $\sigma_{\varphi}^{\max}$  вважаємо, що напруження текучості  $\sigma_s$  постійне по довжині осередку деформації і його величина визначається тангенційною деформацією розтягу краю заготовки по виразу (12). При такому підході буде дещо перебільшений вплив зміцнення на величину  $\sigma_{\varphi}^{\max}$ . Використовуємо відому апроксимацію діаграми істинних напружень другого роду:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_{ш}} \left( \frac{\psi}{\psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}} \quad (13)$$

де:  $\sigma_B$  – межа міцності,  $\psi$  - відносне потоншення при випробуванні на розтяг,  $\psi_{ш}$  - відносне потоншення, яке відповідає моменту утворення шийки на зразку. З урахуванням (12) отримуємо:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_{ш}} \left( \frac{x}{\psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}} \quad (14)$$

Підставляємо  $\sigma_s$  із (14) в (11) і знаходимо величину напруження  $\sigma_\varphi$  без врахування тертя на пуансоні і згину на радіусі заокруглення матриці  $r_m$ :

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_{ш}} \left( \frac{x}{\psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}} \left( 1 - \frac{r_{om}}{R_{om}} \right) \quad (15)$$

Замінімо  $r_{om}$  на  $r_{om} = r_o + \Delta r$ :

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_{ш}} \left( \frac{x}{\psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}} \left( 1 - \frac{r_o}{R_{om}} - \frac{r_o}{R_{om}} x \right) \quad (16)$$

В формулі (16) зі збільшенням  $x$  один множник збільшується, а другий зменшується. Тоді функція  $\sigma_\varphi = f(x)$  повинна мати максимум. Прирівнюємо похідну нулю:  $d\sigma_\varphi / dx = 0$ :

$$\frac{\sigma_B}{1 - \psi_{ш}} \left[ \frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}} \left( \frac{x}{\psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}} - 1} \frac{1}{\psi_{ш}} \left( 1 - \frac{r_o}{R_{om}} - \frac{r_o}{R_{om}} x \right) - \left( \frac{x}{\psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}} \frac{r_o}{R_{om}} \right] = 0 \quad (17)$$

Після перетворень отримуємо:

$$\frac{\sigma_B}{1 - \psi_{ш}} \left[ \frac{1}{1 - \psi_{ш}} \left( \frac{x}{\psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}} - 1} \left( 1 - \frac{r_o}{R_{om}} - \frac{r_o}{R_{om}} x - \frac{1 - \psi_{ш}}{\psi_{ш}} \frac{r_o}{R_{om}} x \right) \right] = 0 \quad (18)$$

Звідки знаходимо:

$$x = \psi_{ш} \left( \frac{R_{om}}{r_o} - 1 \right) \quad (19)$$

Із формули (19) витікає, що зміщення краю отвору, яке відповідає виникненню найбільшого розтягувального напруження  $\sigma_\varphi$ , тим більше, чим більше зміцнюється метал

при формоутворенні. Тепер, використовуючи вирази (12) і (19), є можливість визначити з урахуванням зміцнення величину радіусу  $r_{om}$ , при якому виникає максимальне розтягувальне напруження при відбортуванні:

$$r_{om} = r_o \psi_{us} \left( \frac{R_{om}}{r_o} - 1 \right) + r_o \quad (20)$$

Величину напруження в момент, який відповідає максимуму, можна визначити, якщо в формулу (15) підставити значення  $x$  із виразу (19) та  $r_{om}$  із (20):

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_\epsilon}{1 - \psi_{us}} \left( \frac{R_{om}}{r_o} - 1 \right)^{\frac{\psi_{us}}{1 - \psi_{us}}} \left( 1 - \frac{r_o}{R_{om}} - \psi_{us} + \frac{r_o}{R_{om}} \psi_{us} \right) \quad (21)$$

По розподілу напружень в осередку деформації можна визначити деформований стан і отримати вирази для визначення розмірів товщини стінки при відбортуванні. Якщо при знаходженні довільної постійної в рівнянні (9) замість радіусу  $r_{om}$  підставити вихідний радіус отвору  $r_o$ , то формула для напруження  $\sigma_\varphi$  має вигляд:

$$\sigma_\varphi = \sigma_s \left( 1 - \frac{r_o}{r} \right) \quad (22)$$

Тоді, використовуючи рішення Попова Є.О. по відбортуванню круглих отворів у традиційній листовій заготовці (з постійною товщиною  $S_o$ ), можна отримати вираз для визначення зміни товщини стінки при відбортуванні, яка для відбортування зпрофільованої заготовки має вигляд:

$$S = S_n \left( \frac{r_n}{R} \right)^{\frac{\sigma_\theta + \sigma_\varphi}{2\sigma_\theta - \sigma_\varphi}} \quad (23)$$

З урахуванням (22) і що напруження  $\sigma_\theta = \sigma_s$  знаходимо:

$$S = S_n \left( \frac{r_n}{R} \right)^{\frac{2r_n - r_o}{r_n + r_o}} \quad (24)$$

При відбортуванні зпрофільованої заготовки кінцеве значення товщини здеформованої стінки повинно бути на менше товщини  $S_o$ . З формули (24) можна отримати вираз для визначення максимальної товщини  $S_n$  вихідного профілю заготовки, який забезпечить кінцеву товщину  $S_o$ . Для цього замість  $r_n$  треба підставити радіус отвору  $r_o$ , радіус  $R$  замінити на радіус  $R_{om}$ , а  $S$  – на  $S_o$ :

$$S_o = S_n \left( \frac{r_o}{R_{om}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

Звідки:

$$S_n = \frac{S_o}{\sqrt{r_o / R_{om}}} \quad (26)$$

Тоді формула для визначення товщини відбортованої стінки з (25) буде мати вигляд:

$$S = \frac{S_o}{\sqrt{r_o / R_{om}}} \left( \frac{r_n}{R} \right)^{\frac{2r_n - r_o}{r_n + r_o}} \quad (27)$$

Тепер переходимо до визначення максимального зусилля відбортування, яке виникає на проміжній стадії формоутворення, по знайденому напруженню  $\sigma_\varphi$  згідно формули (21). Вертикальне зусилля на пуансоні  $P_\epsilon$  представляє собою суму проєкцій максимального напруження  $\sigma_\varphi$  на вісь пуансону, яка помножена на площу перерізу, що відділяє осередок деформації від недеформованої частини заготовки [6]. В такому випадку для визначення площі перерізу можна брати величину товщини вихідної заготовки  $S_o$ , хоча товщина  $S$  в цей момент буде дещо більшою за  $S_o$  зважаючи на потоншення zdeформованої частини заготовки при відбортуванні. Це приведе до зменшення значення зусилля  $P_\epsilon$  і компенсує той фактор, що при визначенні тангенційної деформації було взято максимальне її значення по формулі (12). Тоді зусилля  $P_\epsilon$  визначаємо по формулі:

$$P_\epsilon = 2\pi R_{om} S_o \sigma_\varphi \cos\varphi$$

Підставляємо вираз для  $\sigma_\varphi$  із (21):

$$P_\epsilon = 2\pi R_{om} S_o \frac{\sigma_\epsilon}{1 - \psi_{us}} \left( \frac{R_{om}}{r_o} - 1 \right)^{\frac{\psi_{us}}{1 - \psi_{us}}} \left( 1 - \frac{r_o}{R_{om}} - \psi_{us} + \frac{r_o}{R_{om}} \psi_{us} \right) \cos\varphi \quad (28)$$

Якщо співвідношення  $k = R_{om} / r_o$  представляю собою коефіцієнт відбортування, то (28) можна переписати так:

$$P_\epsilon = 2\pi R_{om} S_o \frac{\sigma_\epsilon}{1 - \psi_{us}} (k - 1)^{\frac{\psi_{us}}{1 - \psi_{us}}} \left( 1 - \frac{1}{k} - \psi_{us} + \frac{1}{k} \psi_{us} \right) \cos\varphi$$

Величину  $\cos\varphi$  визначаємо з геометричних співвідношень по розрахунковій схемі (див рис. 1):

$$\cos\varphi = \frac{r_{om}}{R_n} = \frac{r_o \psi_{us}}{R_n} \left( \frac{R_{om}}{r_o} - 1 \right) + \frac{r_o}{R_n}$$

Для перевірки адекватності отриманих рішень був проведений чисельний експеримент з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Розрахункова схема відбортування круглого отвору у зпрофільованій заготовці із маловуглецевої сталі з розмірами заготовки і деформуєчого інструменту зображена на рис. 2. Задача вісесиметрична, наведено половину схеми. Зпрофільована заготовка 1 встановлена на матриці 2 та зафіксована притискачем 3. Відбортування отвору виконується за допомогою пуансону 4. Радіус сферичного торця і циліндричної частини пуансону  $R_n = 32$  мм. Радіус отвору в матриці  $R_m = 35$  мм. Наведені розміри профілю вихідної заготовки, які були встановлені моделюванням МСЕ для забезпечення відбортованої стінки з постійною товщиною стінки  $S_o$ . Початкова

товщина профілю  $S_n$ , яка встановлена МСЕ, складає  $S_n=4,8$  міліметрів (мм) з подальшим зменшенням до товщини  $S_o=3$  мм на радіусі заготовки  $R_1 = R_M + r_M = 45$  мм. В дужках показаний розмір  $S_n=4,75$ , що розрахований по формулі (25).

На рис. 3 показані залежності зусилля відборткування від переміщення пуансону: залежність, яка отримана моделюванням МСЕ від початку відборткування до отримання кінцевої форми виробу, а також залежність, що отримана по формулі (28) до отримання максимальної величини зусилля деформування. Зусилля, яке розраховане по інженерному методу більше в порівнянні з даними МСЕ, що пов'язано з взятим максимальним значенням тангенційної деформації при врахуванні зміцнення по виразу (12). Розбіжність в величинах зусилля не перевищує 10 %.

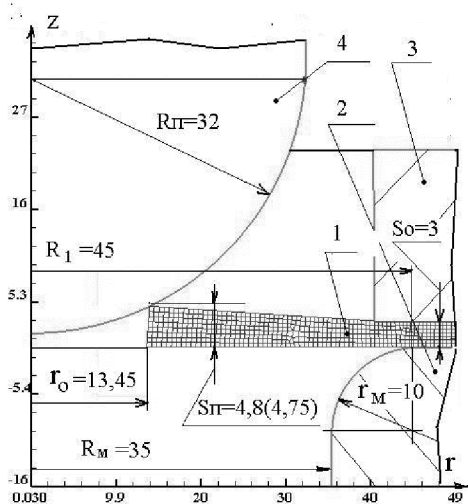


Рис. 2 – Розрахункова схема відборткування отвору у зпрофільованій заготовці для аналізу МСЕ. Всі розміри в міліметрах

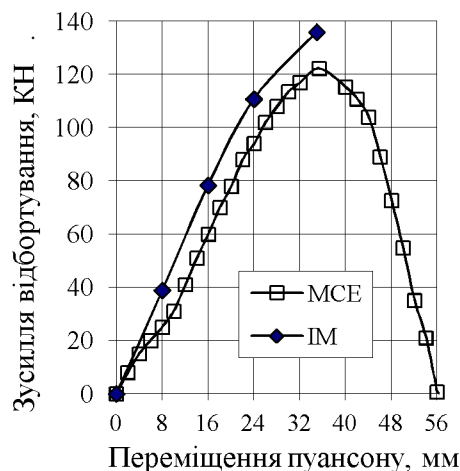


Рис. 3 – Залежності зусилля відборткування від переміщення пуансону, які отримані МСЕ і ІМ

Здеформована заготовка, яка отримана моделюванням МСЕ, з розмірами (L) товщини стінки в момент досягнення максимальної величини зусилля відборткування зображена на рис. 4. Величина радіуса отвору при цьому складає  $r_{om}=25,5$  мм. В дужках показаний розмір  $r_{om}=25$  мм, який визначений по формулі (20). На рис. 5 показана кінцева форма відборткованої частини zdeформованої зпрофільованої заготовки. Попереднє профілювання вихідної заготовки забезпечує отримання стінки з постійною товщиною 3 мм, яка дорівнює товщині вихідної заготовки.

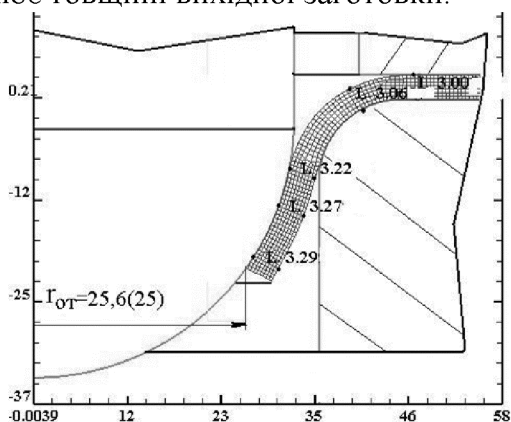


Рис. 4 – Здеформована заготовка, яка отримана моделюванням МСЕ, з розмірами (L) в міліметрах товщини стінки при максимальному зусиллі відборткування

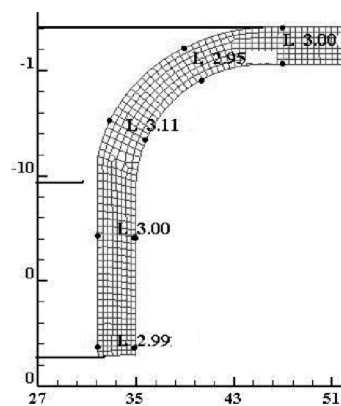


Рис. 5 – Кінцеві розміри (L) в міліметрах відборткованої частини заготовки

Таким чином, аналітичні залежності, які отримані інженерним методом можна використовувати для визначення зусилля відбортування та визначення розмірів профілю для забезпечення отримання відбортованої стінки з постійною товщиною.

**Висновки.** 1. Інженерним методом проведений теоретичний аналіз процесу відбортування круглих отворів у попередньо зпрофільованій заготовці. З урахуванням зміцнення при холодному формоутворенні отримані аналітичні залежності для визначення напружень у здеформованій заготовці, максимальне зусилля відбортування та розмірів профілю, який забезпечує отримання відбортованої стінки з постійною товщиною. 2. Методом скінченних елементів виконаний чисельний експеримент по відбортуванню круглого отвору у зпрофільованій заготовці із маловуглецевої сталі. Моделюванням встановлені форма і розміри профілю частини заготовки, що підлягає відбортуванню, для отримання здеформованої частини з постійною товщиною стінки.

3. Проведене порівняння результатів розрахунків, які отримані моделюванням та по аналітичних залежностях. Встановлено, що розбіжність результатів по силових режимах відбортування, розмірах профілю заготовки не перевищує 10%. Тому залежності можна рекомендувати для інженерних розрахунків параметрів відбортування круглих отворів у зпрофільованій заготовці на стадії проектування технології.

**Список літератури:** 1. *Аверкиев Ю.А.* Холодная штамповка// Ю.А.Аверкиев. Издательство Ростовского университета, 1984. – 288 с. 2. *Калюжний О.В.* Прогнозування та забезпечення якості виробів в процесах відбортування / О.В. Калюжний // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков; 32`2009 р. – С. 118 – 122. 3. *Романовский В.П.* Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., пераб. и доп. // В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 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. Пахолок, 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. *Попов Е. А.* Основы теории листовой штамповки. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп.// Е.А. Попов М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

*Надійшла до редколегії 10.10.2012*

УДК 621.9

**Аналіз інженерним методом процесу відбортування круглих отворів сферичним пуансоном у зпрофільованій заготовці / Калюжний О.В.// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). С.45-52 – Бібліогр.: 6 назв.**

В статье рассмотрен анализ процесса отбортовки круглых отверстий в спрофилированной листовой заготовке, получены аналитические зависимости для определения усилия отбортовки и размеров профиля исходной заготовки, что обеспечит получение изделий со стенкой постоянной толщины. Проведено сравнение результатов моделирования и по аналитическим зависимостям. Показано, что расхождение результатов по силовым режимам, размерам профиля заготовки не превышает 10%. Поэтому зависимости можно рекомендовать для инженерных расчетов параметров отбортовки круглых отверстий в спрофилированной заготовке.

**Ключевые слова:** инженерный метод, отбортовка, спрофилированная заготовка, стенка постоянной толщины.

In article the analysis of flanging process of round holes in profiled preforms is observed. There is received analytical dependence for definition of the flanging process force and sizes of a profile of the preform that will ensure manufacture of details with a wall of fixed width. Comparison of outcomes of simulation and on analytical dependence is spent. It is displayed that the divergence of results of outcomes on force regimes, sizes of the profile does not exceed 10 %. Therefore dependence can recommend for engineering calculations of parameters of the flanging of round holes in profiled preform.

**Keywords:** engineering method, flanging, profiled preform, constant thickness walls