

**Bibliography (transliterated):** 1. *B.L. Bepalov* Tekhnologiya mashinostroyeniya. Moscow: Mashinostroyeniye 1973 god 447s. 2. *Boykov P.I.* Progressivnyye metody v mashinostroyenii. Minsk : Nauka i tekhnika 1978. 352 s. 3. *Suchkov A.E.* Ekonomiya metalla v mashinostroyenii pri obrabotke davleniyem A.E. Suchkov. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1971. – 128 p. 4. Shtampovka pokovok s napravlenym voloknistym stroyeniyem O.A. Bannykh, V.Yu. Lavrinenko, Ye.I. Semenov i dr. Vestnik mashinostroyeniya. 2000. No 10. 200 s. 5. *Ruget G.* Z' evolution du procédé RR de fibrage integral dec vilebré-quins Atti. 5<sup>o</sup> Conv. int. fucinal, Terni, 1970, 503-520, 563-583. 6. Die forget crankshaft production method applied to large products. Zosen, 1970, 15, 7, 36–37 p. 7. Opisanije izobreteniya No 583866 «Sposob izgotovleniya detaley tipa kolenchatykh valov» A. E. Dammer, G. P. Gusikhin, V. G. Kononov, 1978.

Поступила (received) 24.10.2014

УДК 621.983

**В. Л. КАЛЮЖНИЙ**, докт. тех. наук, проф., НТУУ «ХПІ»;  
**І. П. КУЛІКОВ**, магістрант, НТУУ «ХПІ»;  
**Я. С. ОЛЕКСАНДРЕНКО**, інженер, НТУУ «ХПІ», Київ

## **ФОРМА ТА РОЗМІРИ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗДЕФОРМОВАНИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ХОЛОДНІЙ ВІДКРИТІЙ РОЗДАЧІ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК З РІЗНОЮ ВІДНОСНОЮ ТОВЩИНОЮ**

Приведені результати розрахунків методом скінченних елементів холодної відкритої роздачі конусним пуансоном трубчастих заготовок з різною відносною товщиною з нержавіючої сталі. Отримані залежності зусилля роздачі від переміщення пуансону до моменту втрати стійкості стінки циліндричної частини заготовки. Встановлені форма і розміри zdeформованих частин заготовок та розподіли компонент напружено-деформованого стану в них. Розрахований ступінь використання ресурсу пластичності zdeформованого металу. Виявлений розподіл нормальних напружень на поверхні пуансону, яка контактує з заготовкою. Моделюванням отримані всі необхідні дані для проектування технології холодної роздачі

**Ключові слова:** відкрита роздача, трубчаста заготовка, відносна товщина заготовки, конусний пуансон, метод скінченних елементів, зусилля роздачі, напружено-деформований стан заготовок, коефіцієнт роздачі.

**Вступ.** Холодна відкрита та закрита роздача конусним пуансоном застосовується для отримання виробів з порожнистих заготовок. Сутність цієї операції полягає в збільшенні поперечних розмірів указаних заготовок за рахунок зменшення її товщини. Вихідні заготовки для роздачі можуть бути отримані відрізанням з труб, витягуванням з листових заготовок, гнуттям листових полос з подальшим зварюванням. В джерелі [1] приведені експериментальні дані по впливу відпалу та відносної товщини заготовки  $l = S_0 / D_0$  ( $S_0$  – товщина стінки вихідної заготовки,  $D_0$  – зовнішній діаметр заготовки) на коефіцієнт відкритої роздачі  $k_p = D_1 / D_0$  ( $D_1$  – найбільший діаметр zdeформованої частини заготовки) трубчастих заготовок із сталі 10 та

алюмінію, а також вплив відносної товщини на коефіцієнт відкритої роздачі конусним пуансоном заготовок із сталі 15. Наближені дані по визначенню критичного коефіцієнту роздачі з точки зору втрати стійкості стінки заготовки при роздачі викладені в роботах [2, 3]. Експериментальні значення граничних коефіцієнтів роздачі для алюмінієвих сплавів, нержавіючої та середньо вуглецевої сталі і титану приведені в джерелі [4]. В останніх дослідженнях [5, 6] відповідно викладені результати по впливу кута конусу пуансону на силові режими, форму та розміри zdeформованих заготовок і напружено-деформований стан в них при роздачі трубчастих заготовок із нержавіючої сталі та наведені результати по збільшенню коефіцієнту роздачі завдяки використанню пуансону спеціального профілю. Однак, актуальними залишаються задачі встановлення впливу відносної товщини заготовки при відкритій роздачі на силові режими формоутворення, форму та розміри виробів, напружено-деформований стан заготовок 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) [7, 8].

**Мета роботи. Постановка задачі.** Метою роботи є встановлення впливу відносної товщини заготовки на силові режими формоутворення, форму і розміри zdeформованих заготовок та напружено деформований стан в них. Розрахунковий аналіз проводили з використанням пакту програм DEFORM. Метал вважався жорстко-пластичним зі зміцненням, а деформуєчий інструмент абсолютно жорстким. Відкритій роздачі конусним пуансоном з кутом при вершині  $\alpha = 50^\circ$  підлягали трубчасті заготовки із нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 35 мм та товщиною стінки  $S_0 = 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5$  та 4 мм. При цьому величини відносних товщин відповідно приблизно склали 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08 та 0,09. Коефіцієнт тертя на контактуючих поверхнях прийнятий  $\mu = 0,08$ . Процес формоутворення розподілявся на певну кількість кроків навантаження до початку втрати стійкості стінки заготовки. Втрата стійкості починалася, коли по всій довжині циліндричної частини заготовки інтенсивність напружень досягала умовної межі текучості  $\sigma_{0,2}$  матеріалу заготовок

**Результати досліджень.** На рис. 1 приведені залежності зусилля роздачі від переміщення пуансону до моменту втрати стійкості стінок заготовок при формоутворенні трубчастих заготовок з вказаною відотною товщиною. Чим більша відносна товщина, тим більше зусилля роздачі. Збільшення відносної товщини з  $S_0 / D_0 = 0,03$  до 0,07 приводить до зростання переміщення пуансону

до моменту втрати стійкості стінки заготовки. Подальше збільшення величини  $S_0/D_0$  практично не впливає на максимальне переміщення пуансону, при якому стінка заготовки втрачає стійкість. Загальні вигляди виробів в розрізі, які отримані із заготовок з різною величиною  $S_0/D_0$  зображені на рис. 2.

Розподіли нормальних напружень на поверхні пуансону, яка контактує з заготовкою, при максимальному зусиллі роздачі приведені на рис. 3. Найбільші значення цих напружень виникають на початку місця контакту пуансону із здеформованою заготовкою. Початок місця контакту при роздачі заготовок з  $S_0/D_0=0,03$  виникає на радіусі пуансону 18,5 мм з подальшим збільшенням до величини радіусу 19,8 мм для  $S_0/D_0=0,09$ . Далі величини нормальних напружень зменшується при збільшенні величини радіусу пуансону.

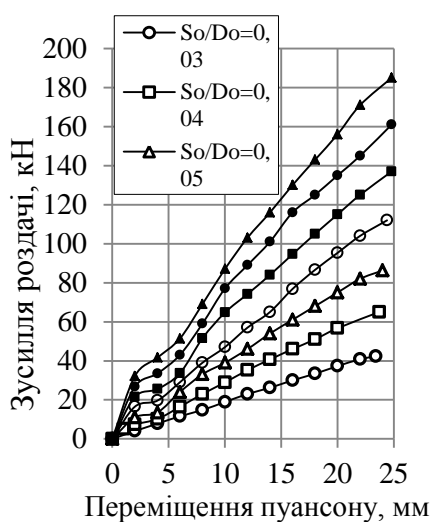
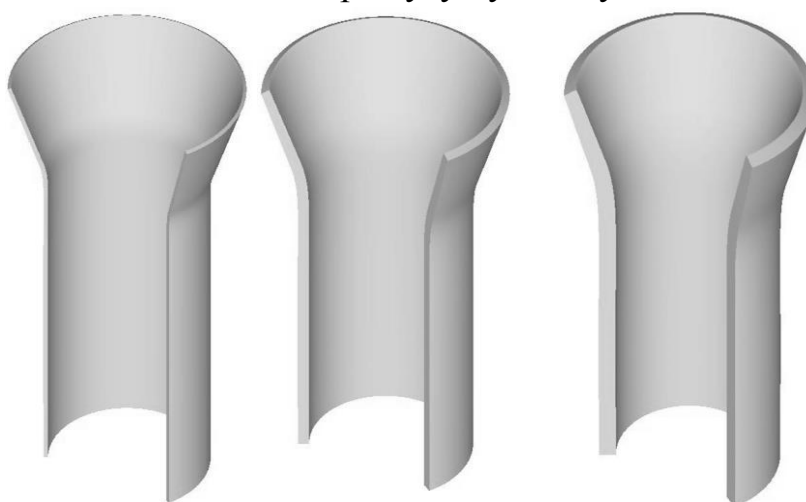


Рис. 1 – Залежність зусилля від переміщення пуансону при роздачі заготовок з різною відносною товщиною  $S_0/D_0$



$S_0/D_0=0,03$        $S_0/D_0=0,06$        $S_0/D_0=0,09$   
 Рис. 2 – Загальні вигляди виробів в розрізі, які отримані із трубчастих заготовок з різною відносною товщиною  $S_0/D_0$

На рис. 4 показані форма та розміри в міліметрах здеформованих частин заготовок, які отримані роздачею трубчастих заготовок з різною відносною товщиною. Тонкими лініями наведений деформуючий пуансон. Для розглянутих значень  $S_0/D_0$  відбувається потовщення стінки в місці переходу здеформованої частини в циліндричну частину трубчастої заготовки. При збільшенні величини  $S_0/D_0$  величина потовщення зростає. Після роздачі заготовки з  $S_0/D_0=0,03$  товщина з 1 мм зростає до 1,03 мм, а після роздачі заготовки  $S_0/D_0=0,09$  товщина збільшується з 4 мм до 4,1 мм. При роздачі має місце потоншення здеформованих частин заготовок, причому інтенсивність

потоншення збільшується при зростанні  $S_0/D_0$ . Товщина торців стінок після роздачі для відносних товщин  $S_0/D_0=0,03$ ; 0,06 та 0,09 відповідно зменшилася з 1 до 0,78 мм, з 2,5 до 1,94 мм та з 4 до 3,1 мм.

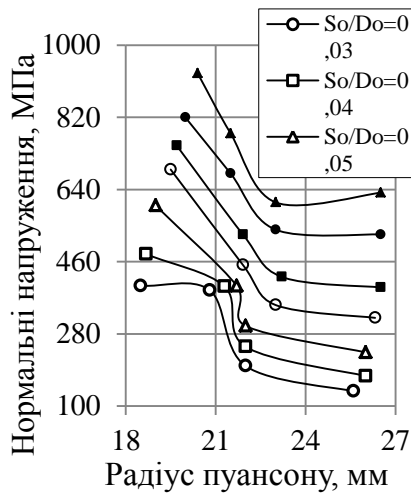


Рис. 3 – Розподіли нормальних напружень на поверхні пуансону при різних величинах

$$S_0/D_0$$

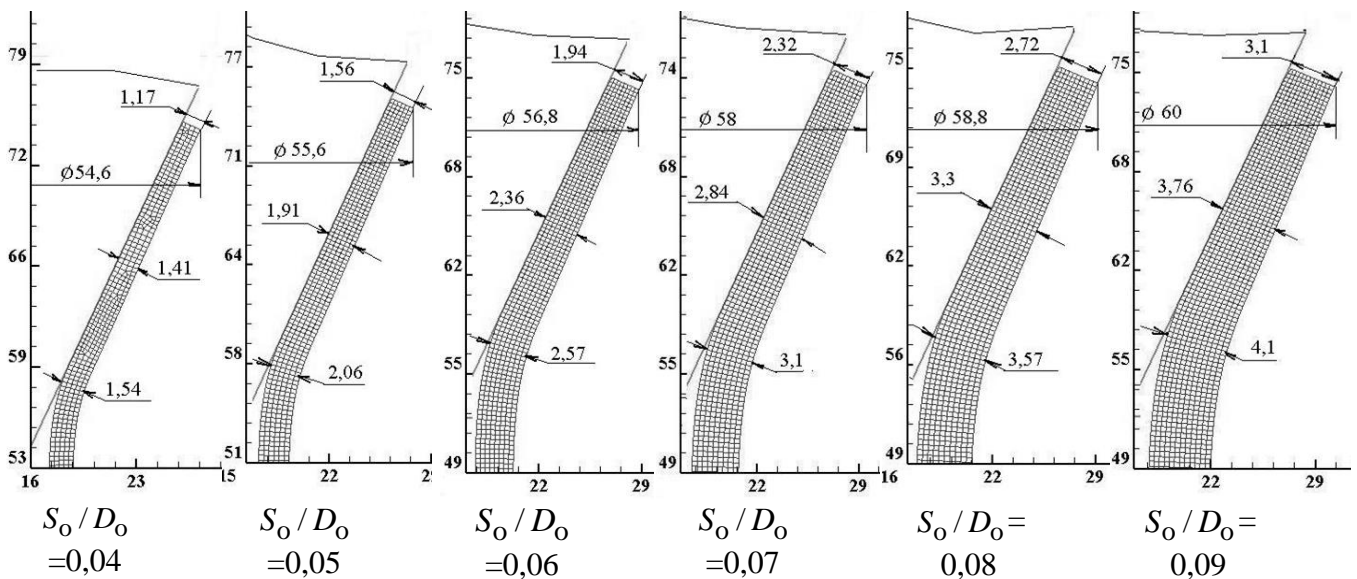


Рис. 4 – Форма та розміри в міліметрах zdeформованих частин заготовок, які отримані роздачею трубчастих заготовок з різною відносною товщиною  $S_0/D_0$

Розподіли радіальних  $\sigma_r$ , осьових  $\sigma_z$ , тангенційних  $\sigma_\theta$  та інтенсивності  $\sigma_i$  напружень в zdeформованих частинах заготовок при роздачі заготовок з відносною товщиною  $S_0/D_0=0,03$ , 0,06 та 0,09 приведені на рис. 5. Стискаючі радіальні напруження величиною  $\sigma_r=-25\div-88$  МПа виникають практично по

всій довжині здеформованої частини заготовки для вказаних величин  $S_0/D_0$ . На початку переходу конусної частини в циліндричну має місце зона, в якій виникають радіальні напруження величиною  $\sigma_r = -280 \div -340$  МПа, причому зі зростанням величини  $S_0/D_0$  вказана зона збільшується по ширині стінки. В місці переходу конусної частини заготовки в циліндричну виникають розтягувальні радіальні напруження величиною  $\sigma_r = 37-100$  МПа. При роздачі стискаючі осьові напруження величиною  $\sigma_z = -340 \div -400$  МПа виникають в циліндричній частині заготовки та в місці переходу циліндричної частини в конусну. При цьому, на внутрішніх шарах металу стінки в місці переходу та зовнішніх шарах металу стінки на початку конусної частини заготовки виникають зони з розтягувальними осьовими напруженнями величиною  $\sigma_z = 37-100$  МПа. По довжині конусної частини осьові напруження зменшуються по абсолютній величині до торця конусної частини.

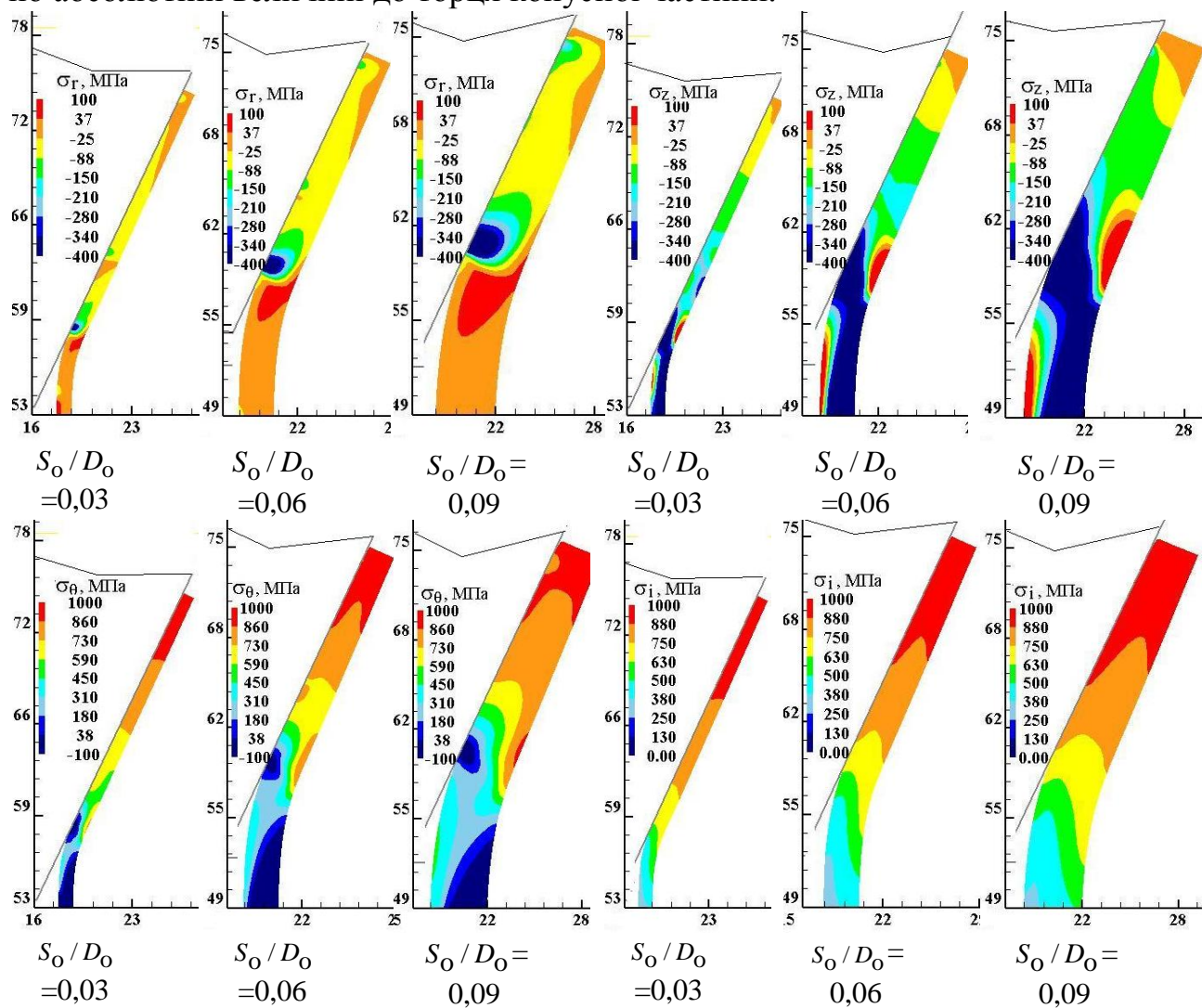


Рис. 5. Розподіли радіальних  $\sigma_r$ , осьових  $\sigma_z$ , тангенційних  $\sigma_\theta$  та інтенсивності  $\sigma_i$  напружень в здеформованих частинах заготовок при роздачі заготовок з різною відносною товщиною  $S_0/D_0$

Найбільші розтягувальні тангенційні напруження величиною  $\sigma_{\theta}=860\text{--}1000$  МПа зосереджені в області торця стінки конусної частини з подальшим зменшенням по довжині до місця переходу конусної частини в циліндричну для різних значень відносних товщин  $S_0/D_0$ . Розподіли та величини значень інтенсивності напружень  $\sigma_i$  також не залежать від відносної товщини заготовки. На третині довжини стінки конусної частини заготовки інтенсивність напружень досягає величин в межах  $\sigma_i=880\text{--}1000$  МПа з подальшим зменшенням до значень  $\sigma_i=380\text{--}500$  в місці переходу конусної частини в циліндричну частину заготовки. Величина інтенсивності напружень дозволяє прогнозувати напруження текучості в здеформованому металі.

Розподіли радіальних  $\varepsilon_r$ , осьових  $\varepsilon_z$ , тангенційних  $\varepsilon_{\theta}$  та інтенсивності  $\varepsilon_i$  деформацій в здеформованих частинах заготовок після роздачі трубчастих заготовок з відносною товщиною  $S_0/D_0=0,03, 0,06$  та  $0,09$  приведені на рис. 6. Вигляд розподілів та величини компонент деформацій практично однакові для всіх розглянутих значень  $S_0/D_0$ . Стискаючі радіальні деформації величиною  $\varepsilon_r=-0,24\div-0,3$  виникають в області торця стінки конічної частини з подальшим зменшенням до нульових значень в місці переходу конусної частини в циліндричну заготовки. Аналогічний вигляд має розподіл осьових деформацій  $\varepsilon_z$ . В області торця стінки величина  $\varepsilon_z=-0,15\div-0,2$ . По всій довжині конусної частини виникають розтягувальні тангенційні деформації  $\varepsilon_{\theta}$ . В місці переходу циліндричної частини в конусну величини таких деформацій знаходяться в межах  $\varepsilon_{\theta}=0,038\text{--}0,11$  з подальшим збільшенням до значень  $\varepsilon_{\theta}=0,31\text{--}0,38$  в області торця стінки конусної частини здеформованої заготовки. Аналогічний розподіл має інтенсивність деформацій  $\varepsilon_i$  з незначною різницею в значеннях. В місці переходу конусної частини в циліндричну отримано  $\varepsilon_i=0,063\text{--}0,13$ , а в області торця заготовки –  $\varepsilon_i=0,44\text{--}0,5$ .

Розподіли ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  в здеформованих частинах заготовок після роздачі трубчастих заготовок з відносною товщиною  $l=0,03; 0,06$  та  $0,09$  зображені на рис. 7. Найбільші значення  $\psi=0,83\text{--}0,95$  в здеформованому металі виникають в області торця стінки конусної частини заготовки. При цьому, розмір вказаної області зменшується зі збільшенням величини  $S_0/D_0$ . По розподілу  $\psi$  можна зробити висновок, що для вказаного матеріалу трубчастих заготовок застосування закритої роздачі для збільшення коефіцієнта роздачі не приведе до бажаного результату без проведення попереднього відпалу вихідних заготовок.

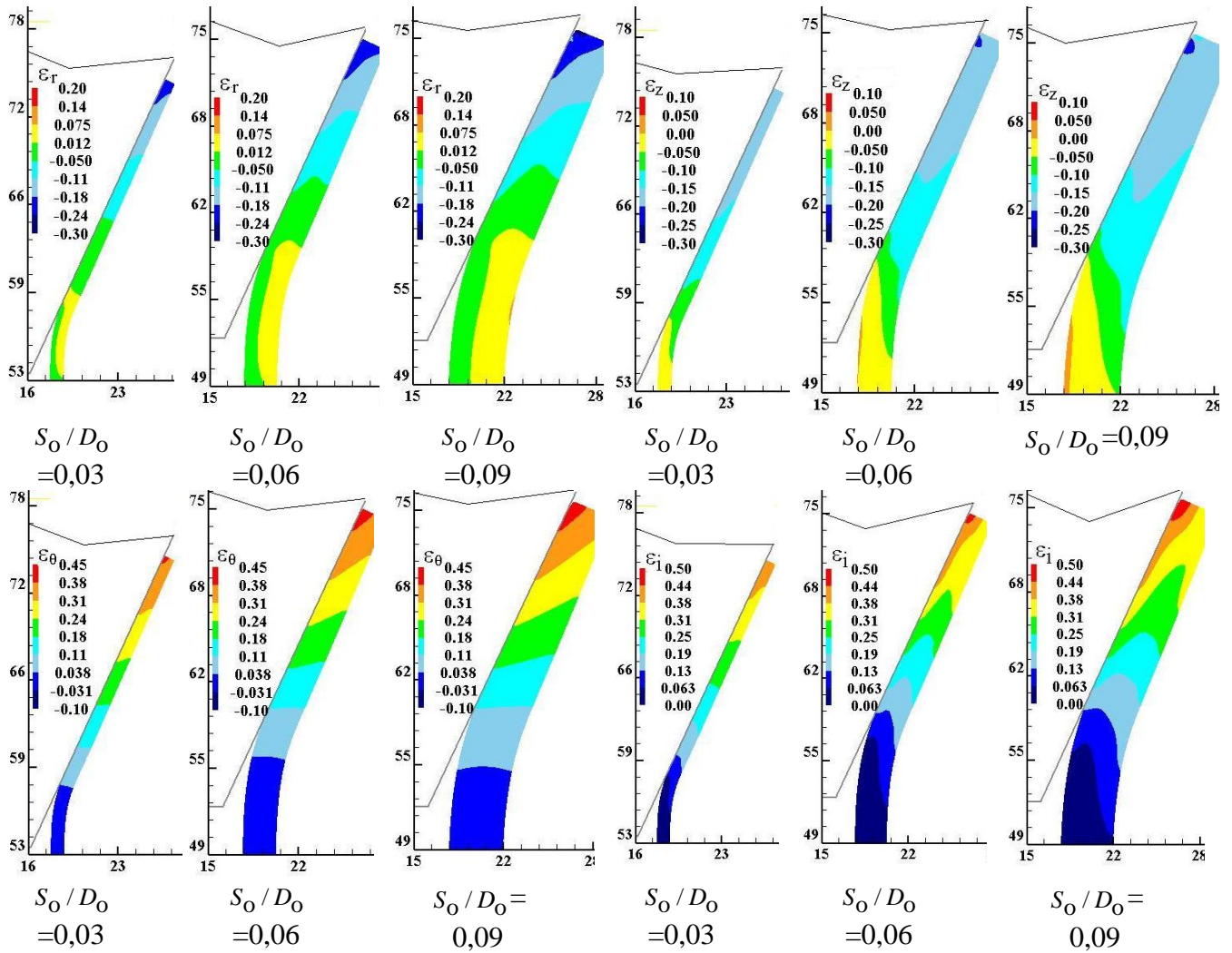


Рис. 6 – Розподіли радіальних  $\varepsilon_r$ , осьових  $\varepsilon_z$ , тангенційних  $\varepsilon_\theta$  та інтенсивності  $\varepsilon_i$  деформацій в zdeформованих частинах заготовок при роздачі заготовок з різною відносною товщиною  $S_0/D_0$

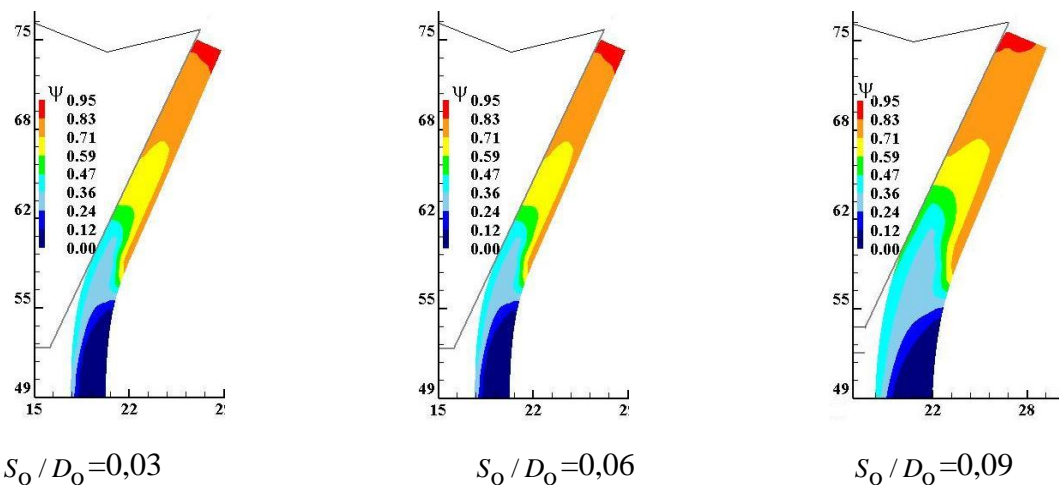


Рис. 7 – Розподіли ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  в zdeформованих частинах заготовок після роздачі трубчастих заготовок з різною величиною  $S_0/D_0$

Таким чином, проведений розрахунковий аналіз дозволив встановити всі необхідні дані для проектування технології холодної роздачі трубчастих заготовок: зусилля та роботу деформації для вибору ковальсько-пресового обладнання; розподіл питомих зусиль на пуансоні – для проектування штампного оснащення; форму та розміри здеформованих заготовок – для оцінки якості виробів.

**Висновки.** Методом скінченних елементів проведений розрахунковий аналіз відкритої роздачі конусним пуансоном трубчастих заготовок з різною відносною товщиною з нержавіючої сталі. Встановлені залежності зусилля роздачі від переміщення пуансону, розподіли нормальних напружень на поверхні пуансону, яка контактує з заготовкою, форма та розміри здеформованих заготовок, напружено-деформований стан в них та ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу. Отримані всі необхідні дані для проектування технології холодної роздачі трубчастих заготовок з нержавіючої сталі.

**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 В.Л. Вплив кута конусу пуансону на силові режими і якість виробів при роздачі трубчастих заготовок із сталі 12Х18Н10Т / В.Л. Калюжний, В.В. Піманов, Я.С. Олександренко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 43. – С. 120–126. 6. Калюжний О.В. Інтенсифікація холодної роздачі трубчастих заготовок конічним пуансоном / О.В. Калюжний // Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2013. – № 43. – С. 84–90. 7. Калюжний О.В. Холодне штампування виробу з двома фланцями із листової заготовки шляхом використання операцій витягування, роздачі і витягування / О.В. Калюжний // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво), Полтава. НТУ, Вип. 2(37), 2013. – С. 105–109. 8. Калюжний В.Л. Двохстороння роздача трубчастої заготовки з подальшим утворенням плоского фланця // В.Л. Калюжний, В.В., Піманов, Я.С. Олександренко / Пластическая деформация металлов: Коллективная монография. Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – 370 с.

**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. – M.: Mashinostroenie, 1985–1987. – 544 p. 5. Kalyuzhniy V.L. Vpliv kuta konusu puansonu na silovI rezhimi I yakIst virobIv pri rozdachI trubchastih zagotovok Iz stalI 12H18N10T V.L. Kalyuzhniy, V.V. Pimanov, Ya.S. Oleksandrenko VIsnik NTU «HPI». – 2013. – No 43. – P. 120–126. 6. Kalyuzhniy O.V. IntensifkatsIya holodnoYi rozdachI trubchastih zagotovok konIchnim puansonom O.V. Kalyuzhniy VIsnik NTU «HPI», SerIya «NovI rishennya v suchasnih tehnologiyah». – 2013. – No43. – P. 84–90. 7. Kalyuzhniy O.V. Holodne shtampuvannya virobu z dvoma flantsyami Iz listovoYi zagotovki shlyahom vikoristannya operatsly vityaguvannya, rozdachI i vityaguvannya O.V. Kalyuzhniy ZbIrnik naukovih prats (galuzeve mashinobuduvannya, budIvnitstvo), Poltava. NTU, Vip. 2(37), 2013. – P. 105-109. 8. Kalyuzhniy V.L. Dvohstoronnya rozdachya trubchastoyi



zagotovki z podalshim utvorennyam ploskogo flantsya V.L. Kalyuzhniy, V.V. PImanov, Ya.S. Oleksandrenko Plasticheskaya deformatsiya metallov: Kollektivnaya monografiya. Dnepropetrovsk: Aktsent PP, 2014. – 370 p.

Надійшла (received) 28.10.2014

УДК 621.983

**О. В. КАЛЮЖНИЙ**, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ

## **НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАГОТОВОК ПРИ РОЗДАЧІ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК ТРАДИЦІЙНИМ КОНУСНИМ ПУАНСОНОМ ТА ПУАНСОНОМ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ**

Приведені результати розрахунків методом скінченних елементів відкритої та закритої роздачі трубчастих заготовок з нержавіючої сталі традиційним конусним пуансоном і пуансоном спеціального профілю. Деформуюча поверхня пуансону спеціального профілю утворена перетином кіл постійного діаметру, центри яких розташовані з відповідним кроком під кутом до вісі пуансону. Використання такого пуансону забезпечує зниження впливу сил тертя при роздачі та збільшення коефіцієнту роздачі. Виконане порівняння силових режимів та напружено-деформованого стану заготовок при відкритій роздачі традиційним конусним пуансоном та пуансоном спеціального профілю. Проведені експериментальні дослідження підтвердили результати розрахунків.

**Ключові слова:** відкрита та закрита роздача, трубчаста заготовка, конусний пуансон і пуансон спеціального профілю, метод скінченних елементів, зусилля роздачі, напружено-деформований стан заготовок, коефіцієнт роздачі.

**Вступ.** Холодна відкрита та закрита роздача трубчастих заготовок використовується для виготовлення перехідників для трубопроводів різної конфігурації, трубчастих заготовок з одним та двома фланцями. Причому, фланці можуть бути перпендикулярні до вісі заготовки та розташовані під певним кутом. Технологія роздачі та штампове оснащення в основному розробляються на базі виробничого досвіду та експериментальних даних [1–4]. Сучасне виробництво деталей методами холодної роздачі ставить задачі зниження собівартості виготовлення виробів, що робить продукцію конкурентоспроможною. На формоутворення при роздачі та коефіцієнт роздачі  $k_p = D_1 / D_0$  ( $D_1$  – найбільший діаметр здеформованої частини заготовки,  $D_0$  – зовнішній діаметр вихідної трубчастої заготовки) впливають відносна товщина заготовки  $l = S_0 / D_0$  ( $S_0$  – товщина вихідної заготовки) та кут конусу пуансону  $\alpha$ . В джерелі [5] з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) вивчено вплив кута  $\alpha$  конусу пуансону на силові режими роздачі, формозміну металу, напружено-деформований стан заготовок та ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу. Одним із методів інтенсифікації холодної роздачі є використання пуансону спеціального профілю, деформуюча