

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

поверхня якого утворена перетином кіл однакового діаметру, центри яких з однаковим кроком розташовані під кутом  $\alpha$  до вісі пуансону [6]. Така деформуюча поверхня зменшує вплив сил тертя на зусилля роздачі та підвищує коефіцієнт роздачі  $k_p$ . Актуальними залишаються задачі визначення напружено-деформованого стану заготовок при роздачі пуансоном спеціального профілю.

**Мета роботи. Постановка задачі.** Метою роботи є виконання порівняльного аналізу з використанням МСЕ роздачі трубчастих заготовок традиційним конусним пуансоном і пуансоном спеціального профілю та встановлення впливу форми пуансону на напружено-деформований стан заготовок. Таку задачу можна вирішити створенням математичних моделей з використанням методу скінченних елементів (МСЕ), які враховують комплексний вплив конструктивних факторів (геометричну форму пуансонів), технологічних факторів (відносну товщину заготовки, коефіцієнту тертя, швидкість деформування, локальний вигляд осередку деформації в заготовці) та фізико механічних факторів (діаграму істинних напружень та діаграму пластичності металу). Традиційний конусний пуансон та пуансон спеціального профілю зображені на рис. 1. Традиційний конусний пуансон мав кут конусу  $\alpha = 20^\circ$ . Діаметри кіл  $d$  та крок  $t$  центрів їх розташування під кутом  $\alpha = 20^\circ$  для пуансону спеціального профілю необхідно встановити моделюванням з умови забезпечення рівної по довжині здеформованої частини заготовки. Роздачі підлягали заготовки з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т зовнішнім діаметром  $D_0 = 39$  міліметрів (мм), висотою  $H_0 = 80$  мм та товщиною стінки  $S_0 = 1,5$  мм. Коефіцієнт тертя в розрахунках був  $\mu = 0,08$ .

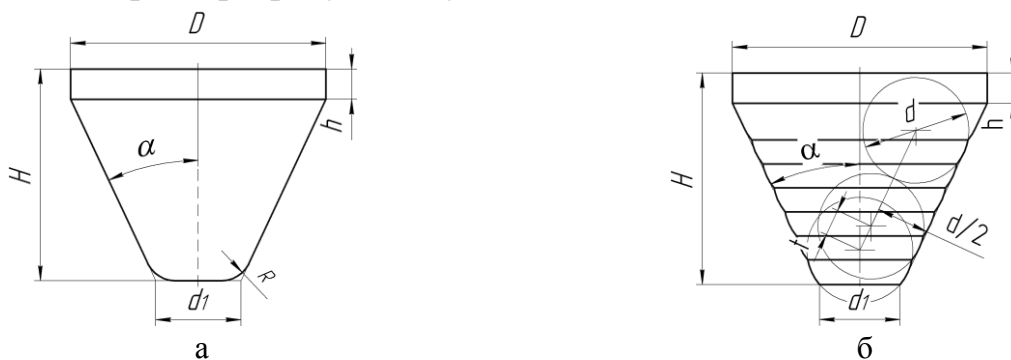


Рис. 1 – Пуансони для роздачі: а – традиційний конусний пуансон, б – пуансон спеціального профілю

**Результати досліджень.** Був проведений порівняльний розрахунковий аналіз з використанням програми DEFORM відкритої та закритої роздачі трубчастої заготовки вищенаведених розмірів традиційним конусним

пуансоном та пуансоном спеціального профілю. При закритій роздачі на бокову поверхню заготовки діяв жорсткий упор, який зміщувався одночасно з пуансоном. Для роздачі пуансоном спеціального профілю встановлено, що діаметри кіл  $D=35$  мм та крок центрів їх розташування  $t=5$  мм під кутом  $\alpha=20^\circ$  забезпечують отримання рівної по довжині zdeформованої частини заготовки. При відкритій роздачі має місце втрата стійкості стінки на циліндричній частині заготовки (рис. 2), тому розрахунки закінчували на початку втрати стійкості стінки.

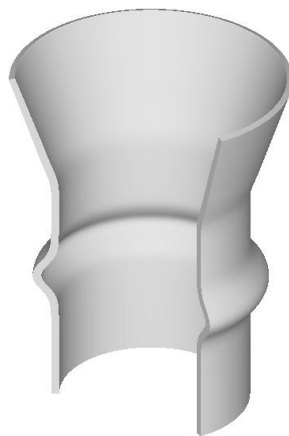


Рис. 2 – Втрата стійкості стінки заготовки

Залежності зусилля роздачі від переміщення пуансону для розглянутих варіантів роздач трубчастих заготовок зображені на рис. 3. При відкритій роздачі традиційним конусним пуансоном та пуансоном спеціального профілю максимальне значення зусилля на початку втрати стійкості стінки складає 63 кН, яке отримане при переміщеннях 27 та 34 мм відповідно. При закритій роздачі пуансоном спеціального профілю величина зусилля досягає 100 кН а переміщення – 50 мм. При цьому, при закритій роздачі максимальна величина переміщення пуансону обмежувалася по причині початку руйнування торця zdeформованої частини заготовки, що буде показано нижче.

Форми та розміри в міліметрах zdeформованих частин заготовок, які отримані після відкритої та закритої роздачі, приведені на рис. 4. По першій схемі роздачі коефіцієнт роздачі для традиційного пуансону склав  $k_p=1,4$ , для пуансону спеціального профілю –  $k_p=1,5$ . По другій схемі –  $k_p=1,7$ . Використання пуансону спеціального профілю при роздачі дозволяє збільшити коефіцієнт роздачі в порівнянні з деформуванням традиційним конусним пуансоном, що пов'язано зі зменшенням сил тертя при формоутворенні. При трьох схемах роздачі має місце потоншення стінок по довжині zdeформованих частин заготовок. Товщина торця стінки після відкритої роздачі традиційним пуансоном вказана товщина 1,18 мм, зпрофільованим пуансоном – 1,16 мм, а

після закритої роздачі – 1,09 мм. Потовщення стінки в місці переходу zdeформованої частини в циліндричну з вихідної товщини  $S_0=1,5$  для наведених варіантів роздач змінюється до величини 1,55, 1,56 та 1,6 мм відповідно.

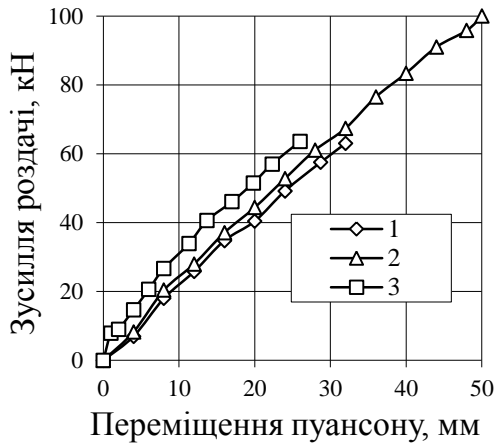


Рис. 3 – Залежності зусилля роздачі від переміщення пуансону:  
1 – відкрита роздача традиційним пуансоном, 2 і 3 – закрыта роздача традиційним пуансоном та пуансоном спеціального профілю відповідно

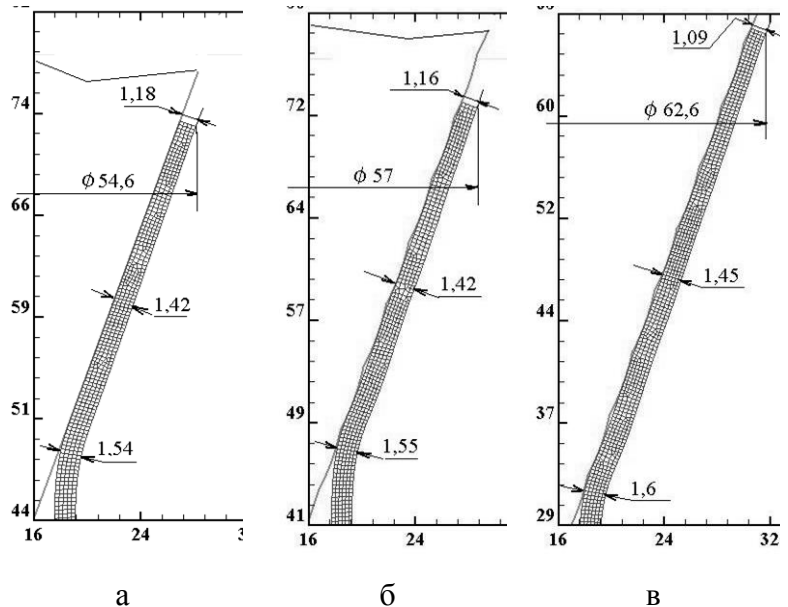


Рис. 4 – Форма та розміри в міліметрах здеформованих частин заготовок: а – після відкритої традиційним пуансоном, б і в – після відкритої та закритої роздачі пуансоном спеціального профілю відповідно

Розподіли радіальних  $\sigma_r$ , осьових  $\sigma_z$ , тангенційних  $\sigma_\theta$ , дотичних  $\tau_{rz}$  напружень та інтенсивності  $\sigma_i$  напружень в здеформованих частинах заготовок при найбільшому зусиллі деформування при відкритій роздачі традиційним конусним пуансоном приведені на рис. 5. Стискаючі радіальні напруження величиною  $\sigma_r=-25\div-88$  МПа займають практично весь об'єм здеформованої частини заготовки. Осьові напруження на торці заготовки відсутні, а потім змінюються по довжині здеформованої частини від  $\sigma_z=-88$  МПа до  $\sigma_z=-400$  МПа в місці переходу здеформованої частини в циліндричну. По всій довжині здеформованої частини виникають розтягуювальні тангенційні напруження, найбільші значення яких  $\sigma_\theta=820-1000$  МПа знаходяться в області торця здеформованої частини виникають розтягуювальні тангенційні напруження, найбільші значення яких  $\sigma_\theta=820-1000$  МПа знаходяться в області торця заготовки. Дотичні напруження знаходяться в межах  $\tau_{rz}=200\div-250$  МПа. Інтенсивність напружень змінюється в здеформованій частині від величини  $\sigma_i=410$  МПа на початку переходу в циліндричну частину до  $\sigma_i=960$  МПа в зоні торця заготовки.

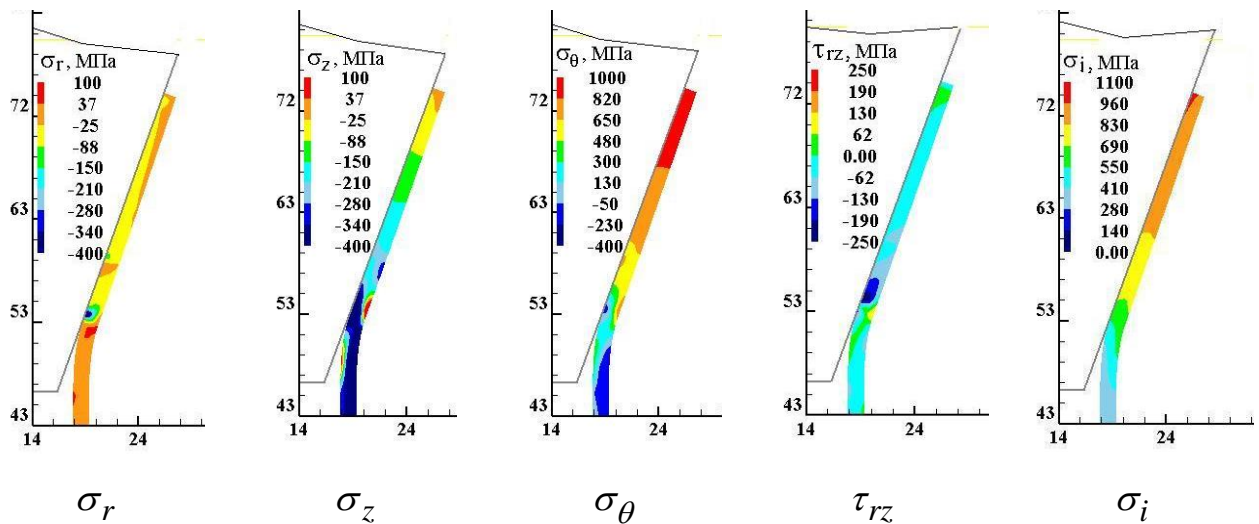


Рис. 5 – Розподіли радіальних  $\sigma_r$ , осьових  $\sigma_z$ , тангенційних  $\sigma_\theta$ , дотичних  $\tau_{rz}$  та інтенсивності  $\sigma_i$  напружень в здеформованих частинах заготовок при відкритій роздачі традиційним конусним пуансоном. Розміри по вісях в міліметрах

Розподіли радіальних  $\varepsilon_r$ , осьових  $\varepsilon_z$ , тангенційних  $\varepsilon_\theta$ , інтенсивності  $\varepsilon_i$  деформацій та ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  в здеформованих частинах заготовок після відкритої роздачі традиційним пуансоном зображені на рис. 6. По довжині здеформованої частини виникають стискаючі радіальні деформації, величини яких знаходяться в межах  $\varepsilon_r = -0,05 \div 0,21$ . Аналогічний розподіл та величину мають осьові деформації  $\varepsilon_z$ . В здеформованій частині виникають розтягувальні тангенційні деформації, які змінюються від величини  $\varepsilon_\theta = 0,1$  в місці переходу в циліндричну частину до  $\varepsilon_\theta = 0,38$  в зоні торця заготовки. Ступінь використання ресурсу пластичності досягає максимального значення  $\psi = 0,83-0,95$  в зоні торця заготовки.

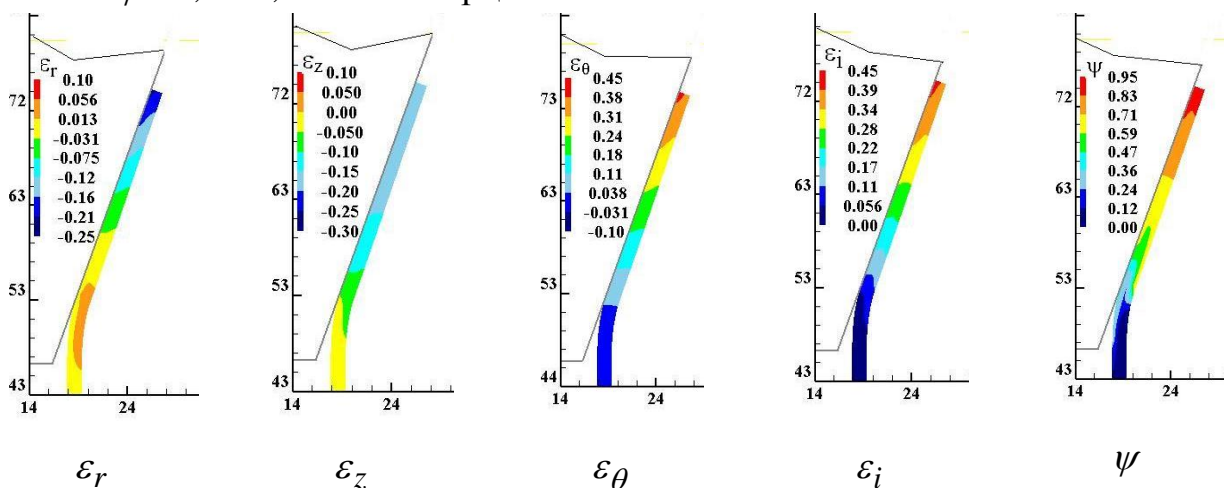


Рис. 6 – Розподіли радіальних  $\varepsilon_r$ , осьових  $\varepsilon_z$ , тангенційних  $\varepsilon_\theta$ , інтенсивності  $\varepsilon_i$  деформацій та ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  в здеформованих частинах заготовок після відкритої роздачі традиційним пуансоном. Розміри по вісях в міліметрах

Розподіли радіальних  $\sigma_r$ , осьових  $\sigma_z$ , тангенційних  $\sigma_\theta$ , дотичних  $\tau_{rz}$  напружень та інтенсивності напружень  $\sigma_i$  в здеформованій частині заготовки при найбільшому зусиллі деформування при відкритій роздачі пуансоном спеціального профілю приведені на рис. 7. Стискаючі радіальні напруження величиною  $\sigma_r = -340 \div -430$  МПа виникають в місцях контакту пуансону з заготовкою. Також мають місце зони з розтягувальними напруженнями, значення яких знаходяться в межах  $\sigma_r = 370 \div 100$  МПа. Стискаючі осьові напруження  $\sigma_z$  розповсюджені практично по всьому об'єму здеформованої частини. В місцях контакту пуансону з заготовкою ці напруження досягають величини  $\sigma_z = -900$  МПа. Також виникають зони, в яких осьові напруження стають розтягувальними.

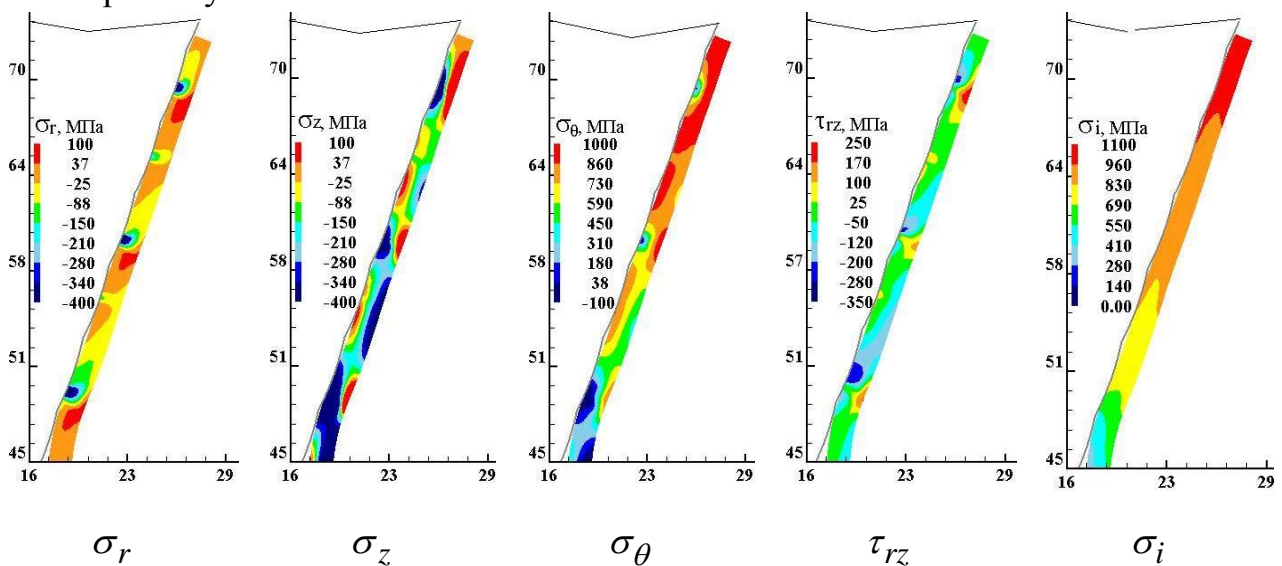


Рис. 7 – Розподіли радіальних  $\sigma_r$ , осьових  $\sigma_z$ , тангенційних  $\sigma_\theta$ , дотичних  $\tau_{rz}$  та інтенсивності напружень  $\sigma_i$  в здеформованих частинах заготовок при відкритій роздачі пуансоном спеціального профілю. Розміри по вісях в міліметрах

Необхідно відмітити, що розподіли напружень  $\sigma_r$  та  $\sigma_z$  в даному випадку суттєво відрізняються від попереднього, при якому виникають тільки стискаючі напруження. Розтягувальні тангенційні напруження займають весь об'єм здеформованої частини заготовки. Найбільші значення  $\sigma_\theta = 860 \div 1000$  МПа виникають в області торця здеформованої частини з подальшим зменшенням до нульових значень в місці переходу здеформованої частини в циліндричну. При цьому, розміри вказаної області зростають в порівнянні з попереднім випадком, що пов'язано з досягнення більшого коефіцієнту роздачі. Величини дотичних напружень змінюються в межах  $\tau_{rz} = 250 \div -350$  МПа. Найбільші значення інтенсивності напружень  $\sigma_i = 960 \div 1100$  МПа виникають в області торця

здеформованої частини заготовки з подальшим зменшенням до величин  $\sigma_i = 280\text{--}410$  МПа в місці переходу zdeформованої частини в циліндричну. В попередньому випадку максимальні значення інтенсивності були  $\sigma_i = 960$  МПа. Розподіли радіальних  $\varepsilon_r$ , осьових  $\varepsilon_z$ , тангенційних  $\varepsilon_\theta$ , інтенсивності  $\varepsilon_i$  деформацій та ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  в zdeформованому металі після відкритої роздачі пуансоном спеціального профілю зображені на рис. 8. Стискаючі радіальні деформації величиною  $\varepsilon_r = -0,05\text{--}-0,3$  виникають на половині довжини zdeформованої частини заготовки, причому найбільші значення по абсолютній величині виникають в області торця заготовки. Аналогічні значення осьових деформацій  $\varepsilon_z$  розповсюджуються практично на всю довжину zdeформованої частини заготовки. Розтягувальні тангенційні деформації  $\varepsilon_\theta$  також займають всю довжину zdeформованої частини. В області торця заготовки величина цих деформацій знаходиться в межах  $\varepsilon_i = 0,38\text{--}0,44$  з подальшим зменшенням до нульових значень в місці переходу zdeформованої частини в циліндричну. Результатом напружено-деформованого стану є ступінь використання ресурсу пластичності  $\psi$  zdeформованого металу. Ресурс пластичності вичерпується в області торця заготовки, досягаючи значень в межах  $\psi = 0,86\text{--}0,98$ .

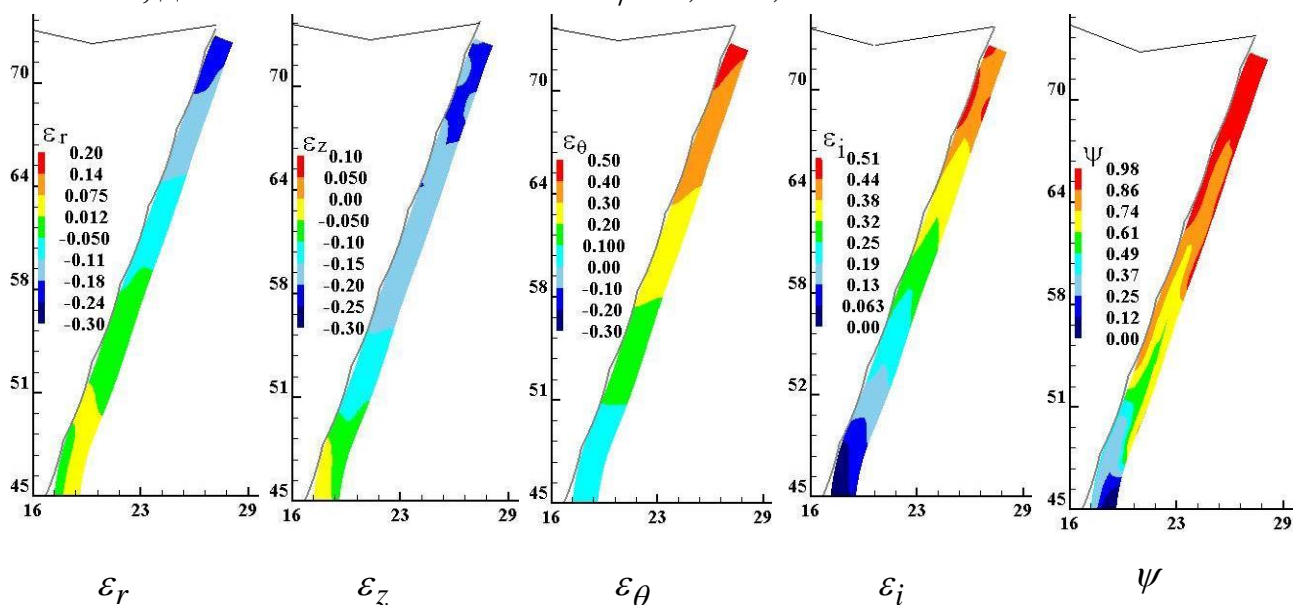


Рис. 8. Розподіли радіальних  $\varepsilon_r$ , осьових  $\varepsilon_z$ , тангенційних  $\varepsilon_\theta$ , інтенсивності  $\varepsilon_i$  деформацій та ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  в zdeформованих частинах заготовок при відкритій роздачі пуансоном спеціального профілю. Розміри по вісях в міліметрах

На рис. 9 наведені розподіли радіальних  $\sigma_r$ , осьових  $\sigma_z$ , тангенційних  $\sigma_\theta$ , дотичних  $\tau_{rz}$  напружень та інтенсивності  $\sigma_i$  напружень в здеформованій частині заготовки при найбільшому зусиллі деформування при закритій роздачі пуансоном спеціального профілю. Вигляд розподілів та величини радіальних  $\sigma_r$  і осьових напружень  $\sigma_z$  практично не відрізняються від аналогічних розподілів для відкритої роздачі, хоча зона з осьовими напруженнями величиною  $\sigma_z = -340 \div -400$  МПа при закритій роздачі займає більшу довжину здеформованої частини. Також в здеформованій заготовці розширяється область з розтягувальними тангенційними напруженнями величиною  $\sigma_\theta = 860-1000$  МПа. Якщо при відкритій роздачі така область займає третину довжини здеформованої частини, то при закритій – половину довжини. При закритій роздачі розподіл дотичних напружень подібний розподілу, який отриманий при

відкритій роздачі, хоча збільшується кількість зон та їх розміри із стискаючими напруженнями  $\tau_{rz}$ . Область з інтенсивністю напружень величиною  $\sigma_i = 960-1100$  МПа займає половину довжини здеформованої частини заготовки, яка отримана закритою роздачею.

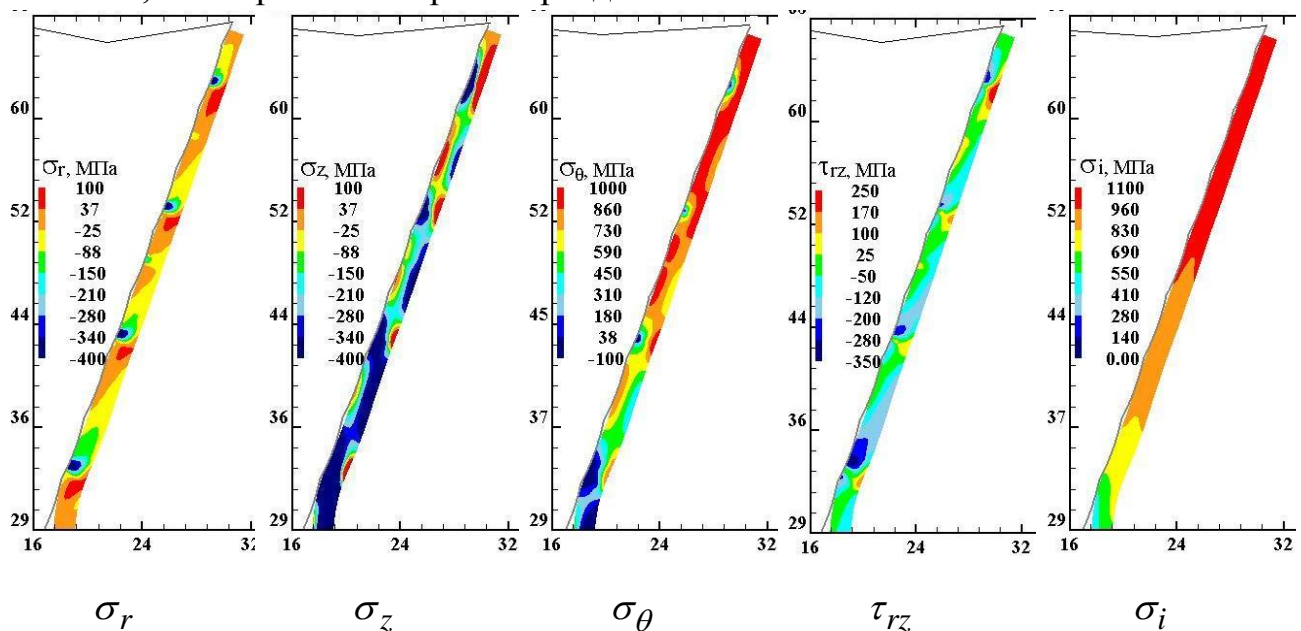


Рис. 9. Розподіли радіальних  $\sigma_r$ , осьових  $\sigma_z$ , тангенційних  $\sigma_\theta$ , дотичних  $\tau_{rz}$  та інтенсивності  $\sigma_i$  напружень в здеформованих частинах заготовок при відкритій роздачі пуансоном спеціального профілю. Розміри по вісях в міліметрах

Розподіли радіальних  $\varepsilon_r$ , осьових  $\varepsilon_z$ , тангенційних  $\varepsilon_\theta$ , інтенсивності  $\varepsilon_i$  деформацій та ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  в здеформованому металі після закритої роздачі пуансоном спеціального профілю



зображені на рис. 10. На відміну від відкритої роздачі, в місці переходу zdeформованої частини в циліндричну виникають розтягувальні радіальні деформації величиною  $\varepsilon_r = 0,05-0,13$ . Також, в порівнянні з відкритою роздачею, розширюються області зі стискаючими осьовими деформаціями величиною  $\varepsilon_z = -0,24 \div -0,35$  та розтягувальними тангенційними деформаціями зі значеннями  $\varepsilon_\theta = 0,44-0,5$ . Завдяки більш інтенсивному пропрацюванню структури металу пластичною деформацією максимальна величина інтенсивності деформації складає  $\varepsilon_i = 0,57-0,65$  (при відкритій роздачі  $\varepsilon_i = 0,44-0,51$ ). В результаті цього ресурс пластичності вичерпується повністю, досягаючи величини  $\psi = 1$  в області торця zdeформованої частини, що унеможливорює подальше деформування.

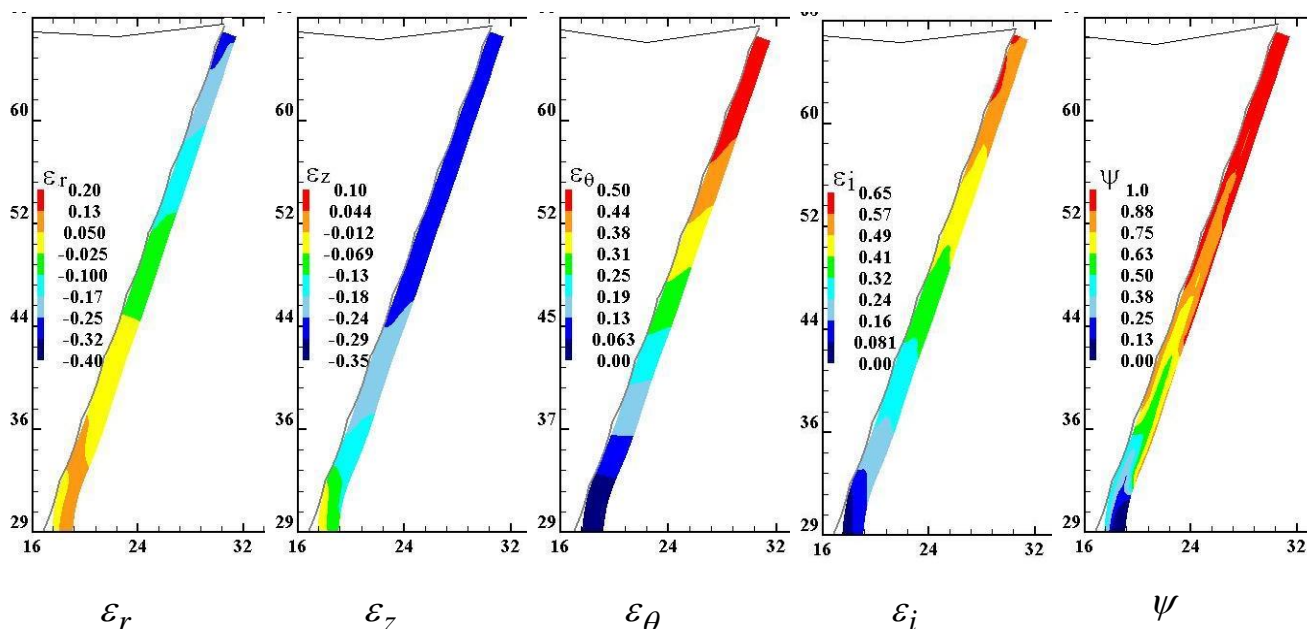


Рис. 10. Розподіли радіальних  $\varepsilon_r$ , осьових  $\varepsilon_z$ , тангенційних  $\varepsilon_\theta$ , інтенсивності  $\varepsilon_i$  деформацій та ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  в zdeформованих частинах заготовок при закритій роздачі пуансоном спеціального профілю. Розміри по вісях в міліметрах

По результатах розрахунків були виготовлені пуансони та проведені експериментальні дослідження відкритої роздачі трубчастих заготовок з нержавіючої сталі традиційним конусним та пуансоном спеціального профілю. На рис. 11 показані результати проведених експериментів. Пуансон спеціального профілю з вихідною заготовкою, які встановлені на випробувальній машині TIRA test 2300, зображені на рис. 11, а. Zдеформована заготовка та традиційний конусний пуансон наведені на рис. 11, б. На рис. 11, в показана zdeформована заготовка та пуансон спеціального профілю. Результати експериментальних досліджень підтвердили дані розрахунків.



Рис. 11 – Результати експериментальних досліджень: а – пуансон спеціального профілю з вихідною заготовкою на машині TIRA test 2300, б – здеформована заготовка та традиційний пуансон, в – здеформована заготовка та пуансон спеціального профілю

**Висновки.** Методом скінченних елементів проведений розрахунковий аналіз відкритої роздачі традиційним конусним пуансоном та пуансоном спеціального профілю, а також закритої роздачі пуансоном спеціального профілю трубчастих заготовок з нержавіючої сталі. Встановлені залежності зусилля роздачі від переміщення пуансону, форма та розміри здеформованих заготовок, напружено-деформований стан в них та ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу. Використання пуансону спеціального профілю дозволяє отримати більший коефіцієнт роздачі, в порівнянні з традиційним пуансоном, завдяки зменшенню впливу тертя при формоутворенні та зміні схеми напруженого стану. При закритій роздачі пуансоном спеціального профілю деформування обмежене по причині руйнування металу. Проведені експерименти підтвердили дані розрахунків.

**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. 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. 3. Аверкиев Ю. А. Холодная штамповка / Ю. А. Аверкиев. Издательство Ростовского университета , 1984. – 288 с. 4. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев., А. Ю. Аверкиев. – М: Машиностроение, 1989. – 304 с. 5. Калюжний В. Л. Вплив кута конусу пуансону на силові режими і якість виробів при роздачі трубчастих заготовок із сталі 12X18H10T / 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.

**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. Kovka i shtampovka: Spravochnik: V 4 t. T. 4. Listovaya shtampovka Pod red. A.D. Matveeva; Red. совет: E.I. Semenov (pred.) i dr. – Moscow: Mashinostroenie, 1985–1987. – 544 p. 3. Averkiev Yu. A. Holodnaya shtampovka Yu. A. Averkiev. Izdatelstvo Rostovskogo universiteta , 1984. – 288 p. 4. Averkiev Yu. A.