

УДК 621. 983

Калюжний В. Л. д.т.н., проф., Олександренко Я. С., Куліков І.П.  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

## РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВІДКРИТОЇ РОЗДАЧІ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК

Kaljuzny V., Oleksandrenko Y., Kulikov I,  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([kwl\\_2011@ukr.net](mailto:kwl_2011@ukr.net))

### THE EXPERIMENT-CALCULATED ANALYSIS OF OPEN BULGING OF TUBULAR WORKPIECE

*Методом скінченних елементів проведено математичне моделювання процесу роздачі трубчастих заготовок традиційним конусним пуансоном та зпрофільованим пуансоном. Поверхня зпрофільованого пуансону утворена перетином кіл, центри яких розташовані під кутом з відповідним кроком. Крок розташування забезпечує рівну по довжині zdeформовану частину заготовки після роздачі. Застосування зпрофільованого пуансону приводить до зменшення площі контакту з заготовкою та зниження впливу сил тертя на процес роздачі. Встановлено вплив форми пуансона на зусилля процесу роздачі, напружено-деформований стан, ресурс пластичності zdeформованого металу та визначені кінцеві форма і розміри виробів. По результатах розрахунків було спроектовано та виготовлене експериментальне оснащення для реалізації процесу відкритої роздачі. Проведені експериментальні дослідження, отримані дані по зусиллю процесу роздачі конусним пуансоном та зпрофільованим пуансоном, виконане порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень. Використання зпрофільованого пуансону приводить до збільшення коефіцієнта роздачі та зменшення зусилля деформування.*

*Ключові слова:* відкрита та закрита роздача, трубчаста заготовка, математичне моделювання, метод скінченних елементів, традиційний конусний та зпрофільований пуансон, зусилля і коефіцієнт роздачі.

В сучасному машинобудуванні, авіабудуванні в трубопровідній арматурі широко використовуються з'єднувальні перехідники. Одним із ефективних способів виготовлення перехідників різноманітних розмірів є холодна відкрита або закрита роздача трубчастих заготовок (рис.1). Ліворуч від всі симетрії показаний вихідний стан перед роздачею, праворуч – в процесі роздачі. При відкритій роздачі (рис.1а) вихідна трубчаста заготовка 1 висотою  $H_0$ , діаметром  $D_0$  та товщиною стінки  $S_0$ , яка встановлена на плиті 2, підлягає деформуванню конусним пуансоном 3. При відкритій роздачі трубчастих заготовок граничний ступінь деформації обмежений по двох причинах: може бути втрата стійкості стінки циліндричної частини заготовки та можливе виникнення меридіональних тріщин на торці zdeформованої частини заготовки, яке пов'язане з інтенсивним потоншенням стінки до товщини  $S_1$ . Максимальний коефіцієнт роздачі, як відношення діаметру zdeформованої заготовки до діаметру вихідної заготовки ( $k=D_1/D_0$ ), залежить від відносної товщини заготовки ( $S_0/D$ ), кута конусу пуансону  $\alpha$  та тертя між заготовкою і пуансоном [1-4]. Для збільшення коефіцієнту роздачі застосовують закриту роздачу (рис.1б), при якій на бокову поверхню заготовки 1, що встановлена на опорі 3 та деформується пуансоном 4, протидіє жорсткий упор 2. Упор 2 при роздачі зміщується з однаковим переміщенням  $U_0$  з пуансоном. Дія упору зменшує вірогідність втрати стійкості стінки. Як при відкритій, так і при закритій роздачі на формоутворення виробів значний вплив має тертя між заготовкою та пуансоном, зменшення якого є резервом збільшення коефіцієнта роздачі  $k$  [4]. Для зменшення сил тертя замість традиційного конічного пуансону використовують зпрофільований пуансон (рис.2). У зпрофільованого пуансону деформуюча поверхня виконана у вигляді перетину кіл діаметром  $d$ , центри яких розташовані з кроком  $t$  під кутом  $\alpha$ . Актуальними задачами є встановлення величин діаметру  $d$  та кроку  $t$ , які забезпечують отримання максимального коефіцієнту роздачі і рівну по довжині zdeформовану частину заготовки.

Метою роботи є проведення розрахунково-експериментальних досліджень для виявлення впливу геометричної форми пуансону на формоутворення виробів відкритою роздачею.

Ефективність використання методу скінченних елементів (МСЕ) для виконання моделювання роздачі трубчастих заготовок показана в роботі [5]. МСЕ дозволяє врахувати всі основні фактори, які впливають на формоутворення при роздачі: конструктивні фактори (геометричну форму деформуючого інструменту), технологічні фактори (граничний ступінь деформації до моменту втрати стійкості стінки заготовки або руйнування zdeформованого металу, швидкість деформування, тип змащення) та фізико-механічні фактори (пружні властивості металу, діаграми істинних напружень та пластичності металу).

Для розрахункового аналізу МСЕ та проведення експериментальних досліджень процесів відкритої холодної роздачі були використані трубчасті заготовки із сталі 12X18H10T та сталі 10 з наступними розмірами

відповідно (див. рис.1):  $D_0=38$  міліметрів (мм),  $H_0=80$  мм,  $S_0=1,5$  мм і  $D_0=44$  мм,  $H_0=80$  мм,  $S_0=2,5$  мм. Традиційний конусний пуансон мав розміри  $D=84$  мм,  $H=70$  мм,  $h=10$  мм,  $R=10$  мм і  $\alpha=25^\circ$ . (див. рис.2). Аналогічні розміри мав зпрофільований пуансон, а величини діаметру кіл  $d$ , які розташовані під кутом  $\alpha=25^\circ$ , та кроку  $t$  необхідно було встановити моделюванням МСЕ. Вказані величини  $d$  і  $t$  повинні забезпечити зменшення впливу сил тертя та рівну по довжині здеформовану частину заготовки.

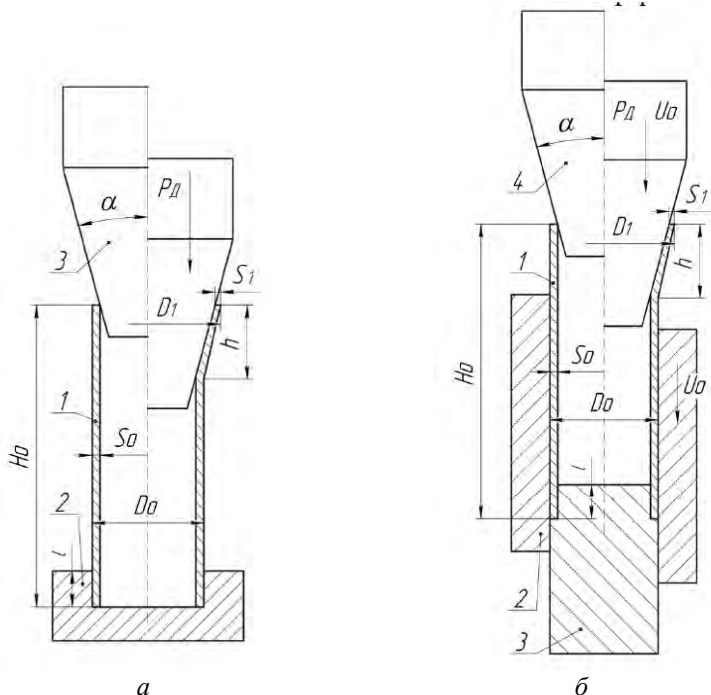


Рис. 1. Схеми роздачі трубчастих заготовок: *а* – відкрита роздача, *б* – закрита роздача

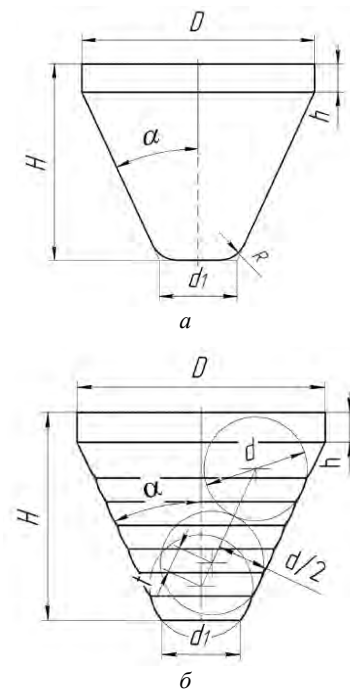


Рис. 2. Конфігурації пуансонів: *а* – традиційний, *б* - зпрофільований

Моделювання МСЕ проводили в програмному комплексі DEFORM. Вісесиметричну задачу формоутворення виробів роздачею зі швидкістю 2 мм/сек розглядали в пружно-пластичній постановці з розподіленням деформування на певну кількість кроків навантаження для виявлення моменту втрати стійкості стінки заготовки. Коефіцієнт тертя між пуансоном та заготовкою був прийнятий  $\mu=0,08$ .

Для зпрофільованого пуансону розрахунком встановлені величини діаметру кіл  $d=35$  мм та кроку  $t=8,8$  мм, які забезпечують рівну по довжині здеформовану частину заготовки при даних розмірах заготовок. Моделюванням визначені залежності зусилля процесів роздачі від переміщення пуансону, кінцеві форми і розміри здеформованих заготовок, напружено-деформований стан та ступінь використання ресурсу пластичності в них.

Розрахункові залежності зусилля роздачі від переміщення пуансону показані на рис. 3. Для всіх варіантів роздачі максимальна величина зусилля має місце в кінці процесу формоутворення виробів (в момент втрати стійкості стінки циліндричної частини заготовки). Зусилля роздачі традиційним конусним пуансоном і зпрофільованим пуансоном на початку процесів (при малих зусиллях деформування) практично співпадають.

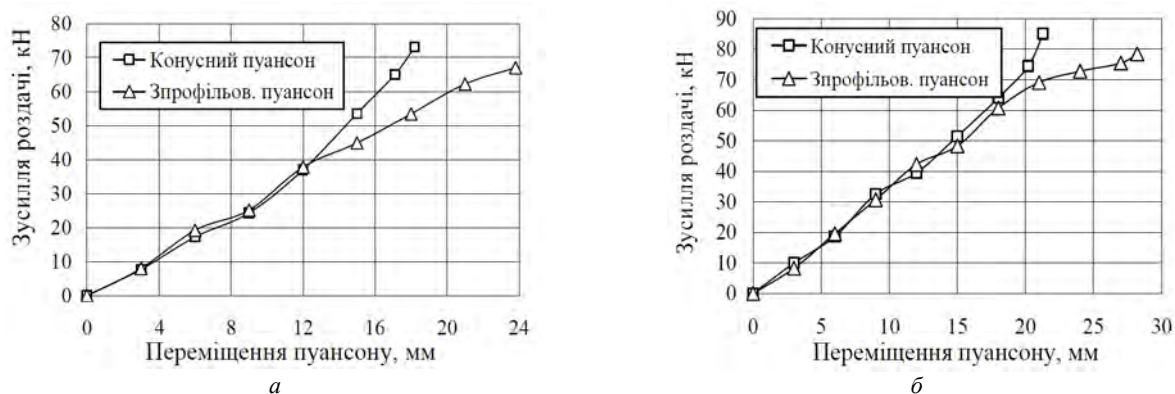


Рис. 3. Розрахункові залежності зусилля процесів роздачі конусним та зпрофільованим пуансонами: *а* – роздача заготовки із сталі 12X18H10T, *б* – роздача заготовки із сталі 10

В подальшому процес роздачі зпрофільованим пуансоном проходить при менших зусиллях в порівнянні з конусним пуансоном. Втрата стійкості стінки заготовки при роздачі зпрофільованим пуансоном починається при більшому його переміщенні, що приводить до зростання ступеню деформації заготовки і коефіцієнта роздачі. Вказаний результат обумовлений зменшенням сил тертя на поверхні заготовки, яка контактує з пуансоном.

Узагальнені дані по роздачі трубчастих заготовок з двох марок сталей традиційним конусним та зпрофільованим пуансонами наведені в таблиці. Використання зпрофільованого пуансону, в порівнянні з конусним пуансоном, приводить до збільшення коефіцієнта роздачі  $k$  для розглянутих марок сталей. Для роздачі заготовок із сталі 10 коефіцієнт  $k$  зріс на 12%, із сталі 12X18H10T – на 7,6%. Такі величини пов'язані з різною вихідною товщиною  $S_0$  трубчастих заготовок. При роздачі має місце потоншення стінки здеформованої частини заготовки. Наприклад, при роздачі заготовок із сталі 10 зпрофільованим пуансоном торець

Таблиця

Узагальнені дані по роздачі традиційним конусним та зпрофільованим пуансонами

Показники процесів відкритої роздачі	Конусний пуансон		Зпрофільований пуансон	
	Заготовки із сталі 12X18H10T	Заготовки із сталі 10	Заготовки із сталі 12X18H10T	Заготовки із сталі 10
Максимальне зусилля деформування Рд, кН	73,1	85,1	67,1	78,4
Максимальне переміщення пуансону $U_0$ , мм	18,2	21,3	23,8	28,2
Діаметр заготовки після роздачі $D_1$ , мм	50,9	54,9	55,1	62,5
Товщина стінки торця заготовки $S_1$ , мм	1,25	2,05	1,18	1,96
Коефіцієнт роздачі $k$	1,34	1,25	1,45	1,42

здеформованої частини з вихідного значення  $S_0=2,5$  мм потоншується до величини  $S_1=1,96$  мм. Також необхідно відмітити, що використання зпрофільованого пуансону приводить до формування виробів при менших силових режимах.

Розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  в об'ємі здеформованих заготовок із сталі 12X18H10T конусним та зпрофільованим пуансоном зображений на рис.4. Розподіл дозволяє оцінити пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією. Величини  $\epsilon_i$  збільшуються, починаючи з місця переходу циліндричної частини заготовки в здеформовану частину, та досягають максимальних значень на торці заготовки. При роздачі конусним пуансоном на торці заготовки отримано  $\epsilon_i=0,35$ , а при роздачі зпрофільованим -  $\epsilon_i=0,42$ , що пов'язано з більшим коефіцієнтом роздачі в останньому випадку.

На рис.5 наведений розподіл ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  по об'єму здеформованих заготовок із сталі 12X18H10T, які отримані роздачею різними пуансонами. При величині  $\psi=1$  відбувається руйнування металу, що деформується. Розподіли вичерпаного ресурсу пластичності для обох випадків роздачі мають однаковий вигляд з розподілами інтенсивності деформацій. При роздачі конусним пуансоном максимальна величина  $\psi=0,29$  (ресурс вичерпаний приблизно на третину), а при роздачі зпрофільованим пуансоном -  $\psi=0,37$ . Таким чином, в момент втрати стійкості стінки заготовки здеформований метал ще має достатню пластичність для продовження процесу роздачі. Для збільшення коефіцієнта роздачі зпрофільований пуансон можна використовувати при закритій роздачі трубчастих заготовок.

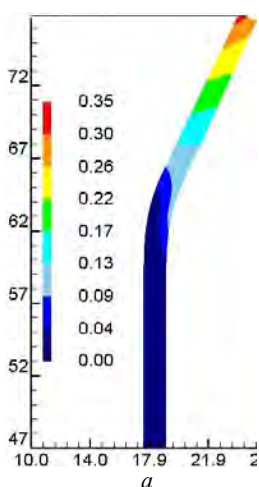


Рис. 4. Розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  в здеформованих заготовках із сталі 12X18H10T:  $a$  – роздача конусним пуансоном,  $b$  – роздача зпрофільованим пуансоном

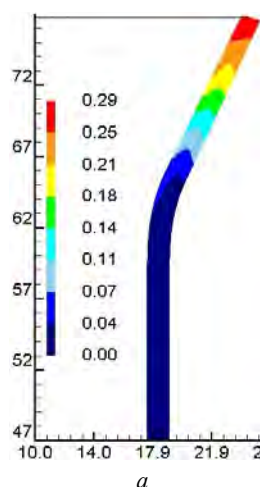
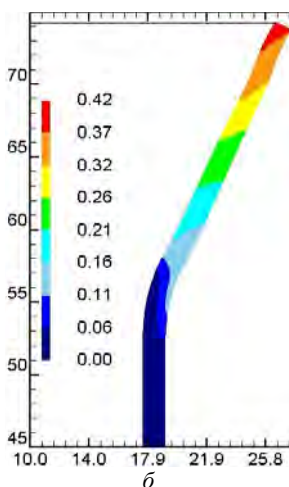


Рис. 5. Розподіл ступеню використання ресурсу пластичності  $\psi$  в здеформованих заготовках із сталі 12X18H10T:  $a$  – роздача конусним пуансоном,  $b$  – роздача зпрофільованим пуансоном

По результатах розрахункового аналізу були спроектовані та виготовлені традиційний конусний та зпрофільований пуансон, опорна плита та вихідні заготовки для проведення експериментальних досліджень по відкритій роздачі трубчастих заготовок. Дослідження були проведені на випробувальній машині TIRA test 2300 в лабораторії кафедри динаміки міцності машин та опору матеріалів НТУУ «КПІ». На рис.6 показана випробувальна машина, на якій встановлені опорна плита, вихідна заготовка та зпрофільований пуансон. Вихідні трубчасті заготовки із сталі 12X18H10T та сталі 10 зображені на рис. 7. В якості змащення при формоутворенні роздачею використовували ВНИИ НП-232.

Випробувальна машина дозволяє фіксувати зусилля деформування від переміщення деформуючого інструменту. Були отримані експериментальні залежності «зусилля роздачі - переміщення пуансону», які зображені на рис.8. Порівняння експериментальних даних та результатів моделювання МСЕ (див. рис.3) показало, що похибка по максимальних значеннях зусиль не перевищує 8%.



Рис. 6. Випробувальна машина TIRA test 2300 з встановленим експериментальним оснащенням



Рис. 7. Вихідні трубчасті заготовки: а – із сталі 12X18H10Т, б – із сталі 10

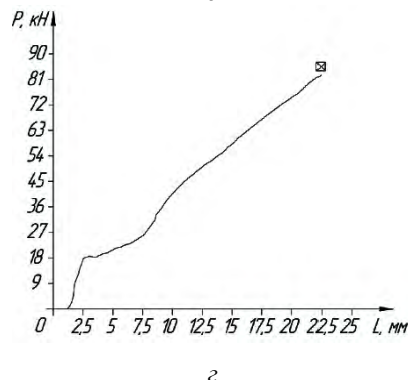
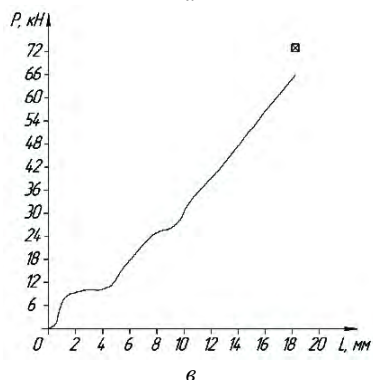
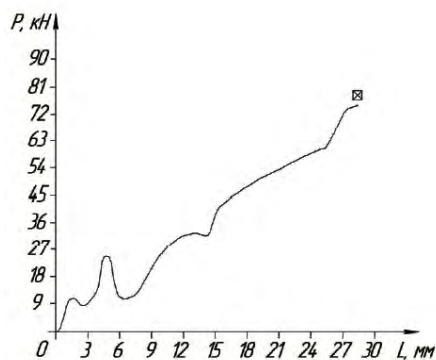
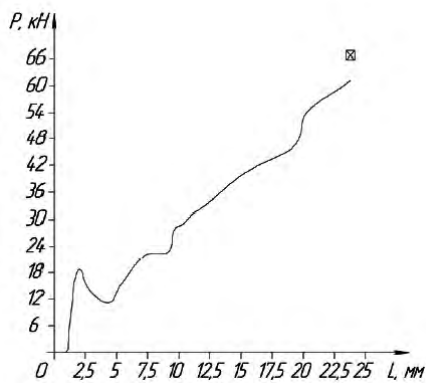


Рис. 8. Експериментальні залежності зусилля роздачі від переміщення пуансону: а і б – роздача зпрофільованим пуансоном заготовок із сталі 12X18H10Т та сталі 10; в і г – роздача конусним пуансоном заготовок із сталі 12X18H10Т та сталі 10



Рис. 9. Заготовки після роздачі традиційним пуансоном та зпрофільованим пуансоном (ліворуч від пуансонів показані заготовки зі сталі 12X18H10T, праворуч – зі сталі 10)

Здеформовані заготовки після відкритої роздачі традиційним конусним пуансоном та зпрофільованим пуансоном показані на рис.9. Розміри zdeформованих заготовок (діаметри  $D_1$ ) з двох марок сталей відрізняються від розрахункових даних на 0,2-0,4 мм. Таким чином експериментальним шляхом підтверджені переваги використання зпрофільованого пуансону, який дозволяє підвищити коефіцієнт роздачі в порівнянні з традиційним пуансоном в 1,2-1,5 разів в залежності від матеріалу трубчастих заготовок та відносної товщини заготовки.

**Висновки.** Методом скінченних елементів проведено математичне моделювання процесів відкритої роздачі трубчастих заготовок із сталі 12X18H10T та сталі 10 традиційним конусним пуансоном та зпрофільованим пуансоном. Розрахунковим шляхом встановлено форму та розміри зпрофільованого пуансону, який забезпечує підвищення ступеню деформації при роздачі. Також визначені зусилля роздачі, напружено-деформований стан і ресурс пластичності в об'ємі zdeформованих заготовок та кінцеві форма і розміри виробів. На основі проведених теоретичних досліджень, було спроектовано та виготовлене оснащення для проведення експериментальних досліджень. Проведені експериментальні дослідження роздачі трубчастих заготовок підтвердили ефективність використання зпрофільованого пуансону для збільшення коефіцієнта роздачі.

**Аннотація.** Методом конечных элементов проведено математическое моделирование процесса раздачи трубчатых заготовок традиционным конусным пуансоном и спрофилированным пуансоном.

Поверхность спрофилированного пуансона образована пересечением окружностей, центры которых расположены под углом с соответствующим шагом. Шаг расположения обеспечивает ровную по длине сдеформированную часть заготовки после раздачи.

Применение спрофилированного пуансона приводит к уменьшению площади контакта с заготовкой и снижению влияния сил трения на процесс раздачи. Установлено влияние формы пуансона на усилия процесса раздачи, напряженно-деформированное состояние, ресурс пластичности сдеформированного металла заготовки. Определены конечные форма и размеры изделий.

По результатам расчетов было спроектировано экспериментальная оснастка для реализации процесса открытой раздачи.

Проведены экспериментальные исследования, получены данные по усилию процесса раздачи конусным та спрофилированным пуансоном, выполнено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Использование спрофилированного пуансона приводит к увеличению коэффициента раздачи и снижению усилия деформирования.

**Ключевые слова:** открытая и закрытая раздача, трубчатая заготовка, математическое моделирование, метод конечных элементов, традиционный конусный и спрофилированный пуансон, усилие и коэффициент раздачи.

**Abstract:** The mathematical simulation of expansion of tubular workpieces by traditional conical punch and profiled punch was carried out by finite element method.

The surface of the profiled punch is formed by the intersection of circumferences, which has centers at angle with appropriate step. The location step provides equal in length deformed part of workpiece after bulging.

Application of profiled punch leads to decrease of contact area with workpiece and to decrease of an influence of frictional forces on bulging process.

It was determined the influence of the shape of punch at the load of bulging, mode of deformation, resource of plasticity of deformed workpiece's metal, final shape and dimension were determined.

By the results of calculation an experimental die tooling was designed for realization of open bulging.

*The experimental research was demonstrated, data of load of bulging by the conical and the profiled punch was obtained, the comparison of theoretical and experimental research was made. The usage of profiled punch leads to increasing of bulging ratio and decreasing of load of bulging.*

*Keywords: open and close bulging, tubular workpiece, mathematical simulation, finite element method, traditional conical punch and profiled punch, load and ratio of bulging.*

#### **Бібліографічний список використаної літератури**

1. *Аверкиев Ю. А.* Холодная штамповка / Ю. А. Аверкиев. Издательство Ростовского университета , 1984. - 288 с.
2. *Аверкиев Ю. А.* Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев., А. Ю. Аверкиев. - М: Машиностроение, 1989. – 304 с.
3. 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.
4. *Калюжний О.В.* Інтенсифікація холодної роздачі трубчастих заготовок конічним пуансоном // Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях», Харків. № 43'2013. - С. 84-90.
5. *Калюжний О.В.* Холодне штампування виробу з двома фланцями із листової заготовки шляхом використання операцій витягування, роздачі і осаджування / О.В. Калюжний // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. праць. – Полтава: НТУ, 2013, вип. 2(37). – С. 105-111.

#### **References**

1. *Averkiev Yu. A.* Holodnaya shtampovka. Izdatel'stvo Rostovskogo universiteta , 1984. - 288 s. Romanovskij V.P. Spravochnik po holodnoj shtampovke. Leningrad: Mashinostroenie. Leningr. otd., 1979. 520 p.
2. *Averkiev Yu. A., Averkiev A. Yu.* Tehnologiya holodnoy shtampovki. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 304 p.
3. *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.
4. *Kalyuzhniy O.V.* Intensifikatsiya holodnoї rozdachi trubchastih zagotovok konichnim puansonom. Visnik NTU «HPI», Seriya «Novi rishennya v suchasnih tehnologiyah», Harkiv. No. 43, 2013. pp. 84-90.
5. *Kalyuzhniy O.V.* Holodne shtampuvannya virobu z dvoma flantsyami iz listovoї zagotovki shlyahom vikoristannya operatsiy vityaguvannya, rozdachi i osadzhuвання. Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo : zb. nauk. prats'. Poltava: NTU, 2013, vip. 2(37). PP. 105-111.

Подана до редакції 03.06.2014