

УДК 611. 777. 01

Алієва Л. І.
Малій Х. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВОГО РЕЖИМУ І ФОРМОЗМІНИ ЗАГОТОВКИ ПРИБИ КОМБІНОВАНОМУ РАДІАЛЬНО-ПОЗДОВЖНЬОМУ ВИДАВЛЮВАННІ

Підвищення ефективності процесів точного об'ємного штампування є одним з головних завдань сучасної науки. Використання комбінованих методів деформування дозволяє розширити можливості отримання стрижневих деталей з фланцем і осьовим відростком, які досить поширені в приладо- і машинобудуванні. Альтернативні способи комбінованого видавлювання дозволяють значно зменшити силу, підвищити якість і експлуатаційні властивості виробів, досягти високої продуктивності праці [1–3].

Типові представники деталей (рис. 1) такого плану містять три частини: фланець з найбільшим діаметром D_ϕ і товщиною h , корпус із середнім діаметром D і висотою H і осьовий стрижень з діаметром d і довжиною l .

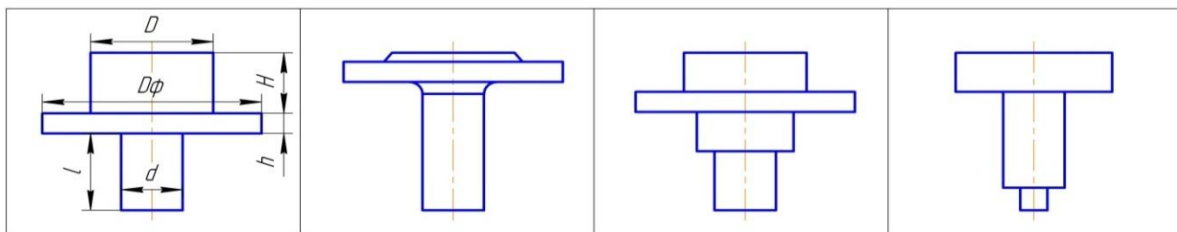


Рис. 1. Типові представники стрижневих деталей з фланцем

Більш продуктивною є технологія комбінованого видавлювання, що поєднує способи радіального і поздовжнього (зворотного або прямого) видавлювання. При цьому в залежності від типорозміру виробів застосовують ту чи іншу комбінацію способів видавлювання [4–6].

Обмеженням відомих процесів поздовжнього і поперечного видавлювання є високі технологічні зусилля і питомі навантаження. Знизити питомі навантаження можна шляхом застосування комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання [7]. Як і інші комбіновані процеси [8] радіально-поздовжнє видавлювання володіє широкими технологічними можливостями.

Радіально-пряме видавлювання доцільно застосовувати при роз'єднаному розташуванні корпусу і стрижня деталі. Такі деталі представляють найбільшу складність проектування технологічного процесу, обумовлену великою протяжністю поверхні тертя в зоні корпусу (і відповідно витратами на сили тертя) і взаємною перешкодою металу в зоні фланця (сформованого) плином металу у стрижень.

Фланець, який вже сформований, може грати роль застійної зони, щодо якої метал продовжує інтенсивно переміщуватися в прямому напрямку. Це призводить до відділення фланця по лініях максимального руйнування зв'язку з вичерпанням ресурсу пластичності металу.

Переміщення металу при радіально-прямому видавлюванні не є складним. Основними параметрами, що впливають на формування, є розміри вихідного отвору стрижня (d), висота фланця (h), а також параметри, що характеризують їх взаємне положення. Вони зумовлюють виникнення зон інтенсивного зсуву і появи великих градієнтів деформацій.

Метою роботи є аналіз особливостей силового режиму та формозміни комбінованого деформування радіально-прямого видавлюванням (рис. 2).

Осередок деформації сформовано з двох автономних осередків прямого та радіально-прямого видавлювання металу (див. рис. 2). При встановленні силового режиму процесу на основі енергетичного балансу потужностей (ЕМ) варто враховувати особливості форми осередку деформування [9]. Приєднаний осередок деформування описується відносним параметром \bar{R}_k ,

який є радіусом поверхні розділу течії матеріалу. Параметр \bar{R}_k визначається з умови мінімуму приведенного тиску. З графіків залежності приведенного тиску від параметра оптимізації \bar{R}_k (рис. 3) видно, що існує мінімум приведенного тиску при певних геометричних параметрах процесу і йому відповідає одне оптимальне значення \bar{R}_k .

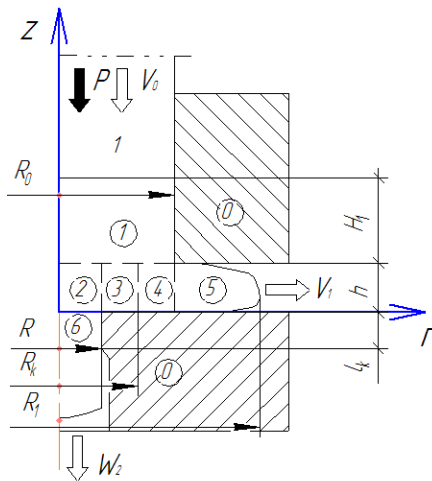


Рис. 2. Розрахункова схема радіально-прямого видавлювання

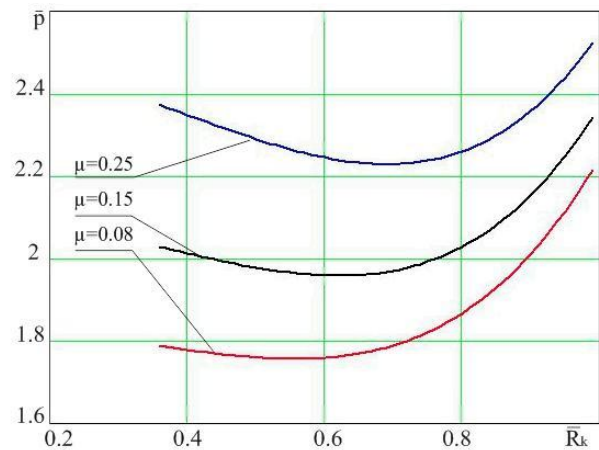


Рис. 3. Визначення мінімуму значення \bar{R}_k при різному терті при $\bar{h} = 0,36$ та $t = 0.36$

Для відносного «плеча» (горизонтальної полиці) матриці $t = 0,7 \dots 0,9$ параметр \bar{R}_k можливо визначати за формулою $\bar{R}_k = t$. Проведені дослідження показали, що при цих значеннях t параметр \bar{R}_k , як і при видавлюванні трубчастих деталей, залежить тільки від величини t [10]. Це означає, що відносна швидкість витікання в прямому напрямку прагне до 1,0, а деформація супроводжується значним зсувом металу уздовж лінії, що з'єднує перехідні кромки матриці. Для інших значень t оптимізований параметр \bar{R}_k визначається за чисельними залежностями.

Графік залежності приведенного тиску від відносної товщини фланця (рис. 4, а) підтверджує, що при збільшенні відносної товщини фланця значення приведенного тиску знижуються. Це пояснюється зменшенням ступеню деформації і контактної поверхні тертя між фланцем і матрицями. Зі збільшенням діаметру фланця збільшується вплив розтягуючих напружень у фланці і, як наслідок, збільшується контактна поверхня тертя. Таким чином, при збільшенні радіуса фланця збільшується приведений тиск видавлювання.

Аналіз можливості використання розрахункових моделей процесів комбінованого видавлювання будується на отриманні оптимальних енергосилових параметрів процесу деформування та параметрів поетапної зміни розмірів напівфабрикату, що відповідають дійсності, тому прогнозування приростів розмірів заготовки є важливою складовою частиною проведених досліджень. Прогнозування поетапного формозмінення заготовки дозволяє оцінити можливість отримання розмірів готової продукції відповідно до вимог та скоригувати процес протікання комбінованого деформування у випадку відхилень від необхідних розмірів [9].

Враховуючи можливість отримання оптимального значення кінематичного параметра W_2 як функції, що залежить від геометричних, технологічних параметрів процесу та ходу ΔHx , приріст розмірів осьового стрижня заготовки на послідовних стадіях процесу деформування для розрахункової схеми з прямолінійними модулями визначаємо шляхом інтегрування $W_{2\ opt}(\Delta Hx)$ за відрізком $[0; \Delta Hx]$, а приріст розмірів фланцевої зони визначаємо

з умови рівності об'єму метала, що витісняється пунсоном та заповнює осьовий стрижень та фланцеву зону за наступними формулами:

$$\Delta l_1 \downarrow = \int_0^{\Delta Hx} W_{2 \text{ opt}}(\Delta Hx) d(\Delta Hx), \quad \Delta l_2 \rightarrow = \sqrt{\frac{R_0^2 \cdot \Delta Hx - R^2 \cdot l_1 \downarrow}{h}} + R_0^2 - R_0,$$

де ΔHx – хід пуансона, що відповідає етапу деформування.

Характер зміни оптимального значення кінематичного параметру W_2 за ходом процесу дозволяє зробити висновок про вагомо незначне поетапне відхилення від значення $W_{2 \text{ opt}} = R_k^2 / R^2$ на всьому протязі процесу деформування, тому отримані співвідношення для розрахункової схеми приймають наступний вигляд:

$$\Delta l_1 \downarrow = \int_0^{\Delta Hx} W_{2 \text{ opt}}(\Delta Hx) d(\Delta Hx) = \int_0^{\Delta Hx} \frac{R_k^2}{R^2} \cdot d(\Delta Hx) = \frac{R_k^2}{R^2} \cdot \Delta Hx,$$

$$\Delta l_2 \rightarrow = \sqrt{\frac{R_0^2 \cdot \Delta Hx - R^2 \cdot l_1 \downarrow}{h}} + R_0^2 - R_0.$$

Враховуючи фактично лінійний характер зміни приросту відносних розмірів (наближено) осьового стрижня $\Delta \bar{l}_1 \downarrow = \left(\frac{\bar{R}_k^2}{\bar{R}^2} \right) \cdot \Delta \bar{H}x$ та можливість отримання поетапної зміни відносних розмірів фланцевої зони $\Delta \bar{l}_2 \rightarrow$ на всьому протязі процесу деформування, наведемо отримані залежності для фіксованих геометричних параметрів процесу та досліджено вплив різних співвідношень на характер зміни розмірів напівфабрикату (рис. 4, б).

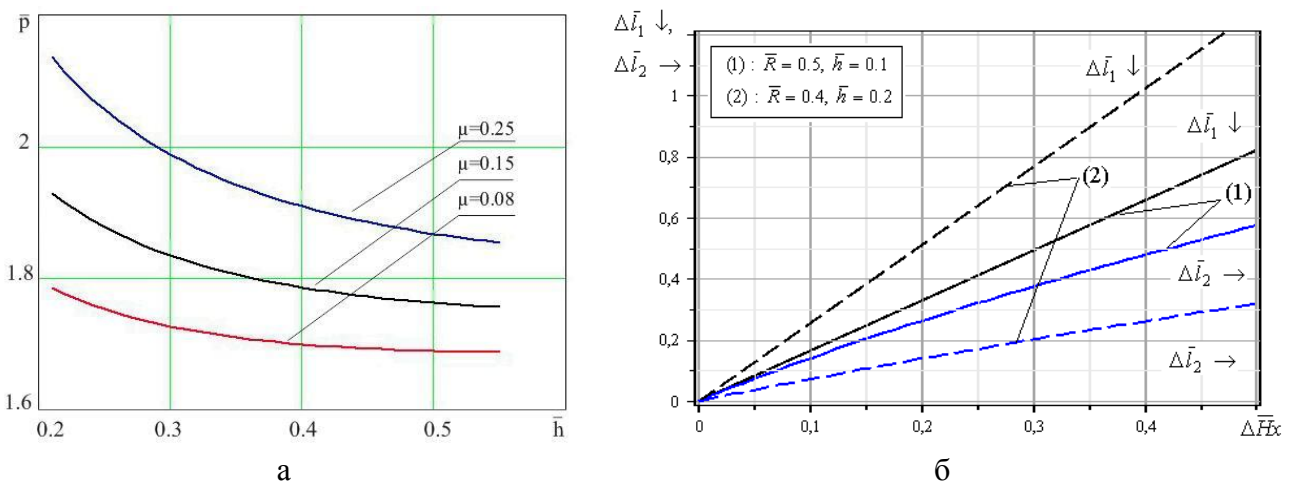


Рис. 4. Залежність приведенного тиску деформування від відносних товщини фланця (а) та приріст відносних розмірів осьової $\Delta \bar{l}_1 \downarrow$ та фланцевої зони $\Delta \bar{l}_2 \rightarrow$ напівфабрикату при різних співвідношеннях геометричних параметрів процесу (б)

Перевірка адекватності отриманих математичних моделей за результатами аналізу приросту лінійних розмірів заготовки і об'ємних її частин (рис. 5, а) дозволили побудувати графіки формозміни напівфабрикату зі співвідношенням початкових розмірів $H_0/D_0 = 1,5$. При порівнянні результатів розрахунку ЕМ та методу скінчених елементів (МСЕ) [9] похибка не перевищує 12 % (рис. 5, б).

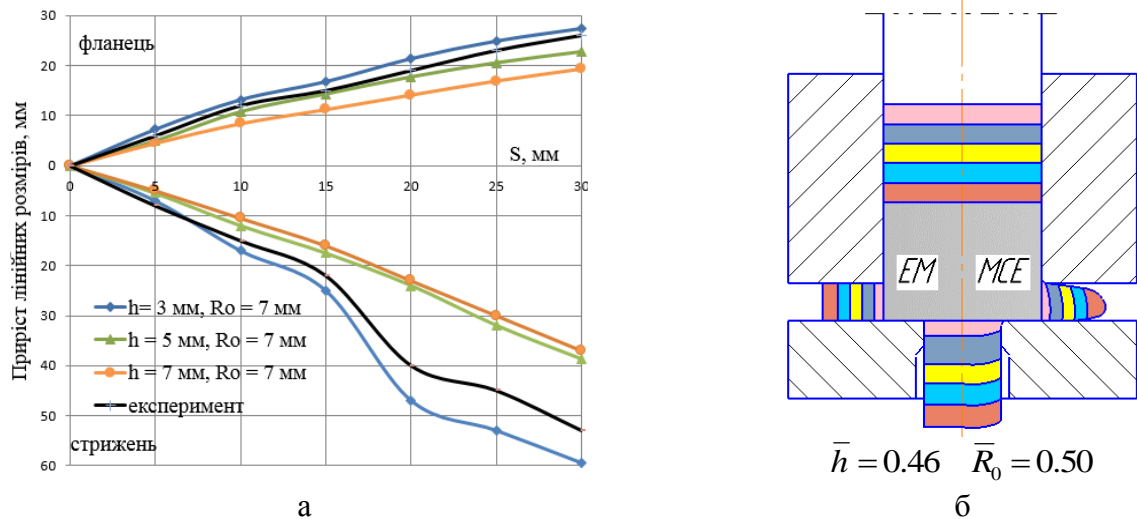


Рис. 5. Приріст лінійних розмірів (а) та порівняння приросту лінійних розмірів (б) при радіально-прямому видавлюванні

Експериментальне дослідження радіально-прямого видавлювання дало змогу порівняти силовий режим деформування та деформований стан заготовки (рис. 6, а). Для дослідження комбінованого видавлювання були використані зразки діаметрами 28,2 мм і 45 мм. Варіювання висоти фланця проводилося в межах $h = 4 \dots 10$ мм і діаметра стрижня – $D = 10 \dots 28$ мм. Результати вимірювань (рис. 6, в) в порівнянні з теоретичними розрахунками на 8–12 % більші.

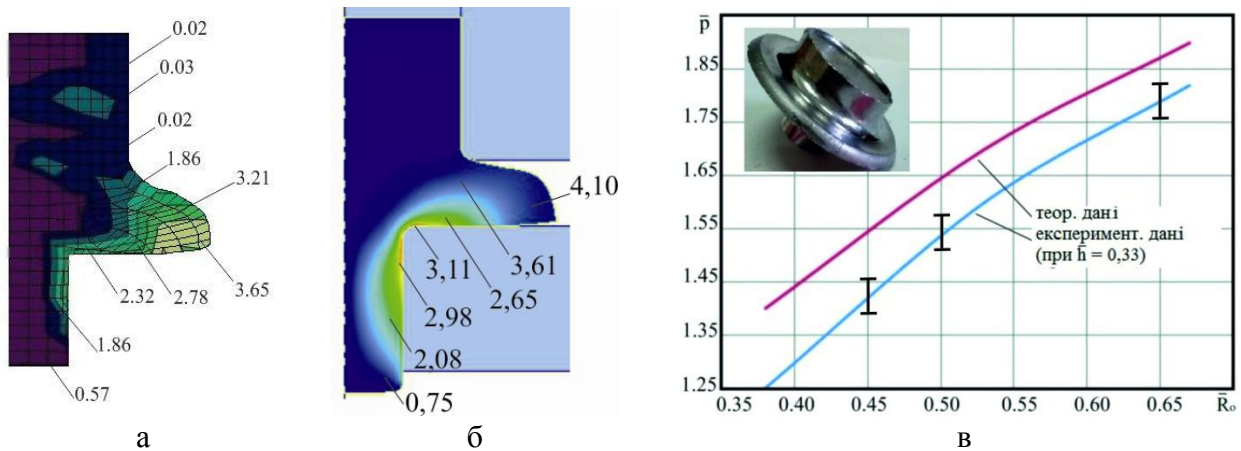


Рис. 6. Поля розподілу інтенсивності деформацій для радіально-прямого на основі методу ділильних сіток (а) та МСЕ (б), графік порівняння результатів розрахунку силових параметрів (в)

Отримані результати підтверджують припущення про наявність небезпечної зони в тілі заготовки, яка розташовується між кромками верхньої та нижньої матриць. Зсувні деформації, які з'являються в цій області, можуть стати причиною відділення фланця від корпусу заготовки. Проведені дослідження радіально-прямого видавлювання з підпором фланця показують збільшення ризику появи тріщин в тілі заготовки, і, як наслідок, може спостерігатися відрив фланця [11].

На рис. 6, а–б показано порівняння інтенсивності логарифмічної деформації e_i отриманої експериментально та МСЕ. При порівнянні експериментальних і теоретичних результатів з розподілу логарифмічних деформацій в заготовці видно, що загальний характер розподілу деформацій по заготовці і форма осередку деформацій співпадають. Для такого

осередку деформування, при радіально-прямому видавлюванні, можливо виділити декілька характерних зон: корпус деталі, що лишається не деформованим; фланцева частина, в якій зосереджені максимальні значення ступеня деформування; зона перехідних кромek інструмента, що характеризується накопиченням ступеня деформації; стрижнева – осьова частина, малодеформована зона.

За рахунок відхилення форми фланцю, при низьких коефіцієнтах тертя, спостерігається накопичення ступеня деформування та гальмування нижніх шарів фланцю, що контактують з нижньою напівматрицею. При формуванні тонкого стрижня деталі спостерігається інтенсивна течія металу в радіальному напрямі. За рахунок сприятливого напружено-деформованого стану в фланцевій частині, а саме діючих розтягуючих напружень, при великих ступенях деформування можливе відділення фланцю від тіла заготовки. В таких випадках раціонально обмежувати радіальну порожнину матриці.

Корпус деталі та осьова частина стрижня лишається не пропрацьованими, що обумовлює неоднорідність механічних властивостей виробів. Для поліпшення структури виробу пропонується застосування знакозмінної деформації в стрижневій частині деталі забезпечує підвищення рівномірності розподілу ступеня деформування за перерізом.

ВИСНОВКИ

Енергетичним методом балансу потужностей встановлено оптимальне значення положення радіусу поверхні розділу течії матеріалу при радіально-прямому видавлюванні від геометрії інструменту. Визначено, що основний вплив на положення межі розподілу течії матеріалу є тертя і відносні розміри приймаючих порожнин матриці. Значення $\bar{R}_k \approx 0.62$ при характерному терті для холодного видавлювання $\mu = 0.08$, і зростає до $\bar{R}_k \approx 0.8$ при коефіцієнті тертя $\mu = 0.25$.

Застосування модульного підходу дозволило більш точно оцінити навантаження при радіально-прямому видавлюванні. Зміна відносної висоти фланцю \bar{h} від 0.21 до 0.51, при інших рівних параметрах деталі, призводить до зменшення приведенного тиску від 3.0 до 2.45; зміна відносного радіусу стрижня $\bar{R} = 0.34..0.66$ – зниження приведенного тиску від 2.4 до 2.1. Теоретичні розрахунки енергосилових показників більші за експериментальні дані на 10–12 %.

Встановлені аналітичні залежності для визначення приросту лінійних розмірів заготовки по ходу процесу деформування. Представлені графічні залежності формозміни заготовки, які дозволяють прогнозувати отримання напівфабрикатів з необхідними геометричними параметрами.

На основі фізичного моделювання підтверджено особливості розташування зон деформування при аналізі процесу радіально-поздовжнього видавлювання. Визначено, що корпус деталі лишається непропрацьованим, що обумовлює неоднорідність механічних властивостей виробів.

Експериментальне дослідження показало правомірність використання розробленої схеми комбінованого деформування, що дозволяє якісно прогнозувати силовий режим і формоутворення заготовки в процесі радіально-прямого деформування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Алиева Л. И. Перспективы развития процессов точной объемной штамповки / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // *Вісник ДДМА : збірник наукових праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 1 (11). – С. 13–19.
2. Тарасов А. Ф. Перспективы использования комбинированных методов обработки металлов давлением / А. Ф. Тарасов // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 216–220.
3. Алієв І. С. Методи пошуку нових технологічних способів видавлювання : колективна монографія / І. С. Алієв // *Теорія та практика обробки матеріалів тиском*. – Запоріжжя : АТ «Мотор-Січ», 2016. – С. 364–385. – ISBN 978-966-2906-60-8.
4. Zhang S. H. Some new features in the development of metal forming technology / S. H. Zhang, Z. R. Wang // *J. Mater. Process. Technol.* – 2004. – № 1. – P. 39–47.

5. Калюжний О. В. *Інтенсифікація формуючих процесів холодного штампування* : монографія / О. В. Калюжний, В. Л. Калюжний. – К. : ТОВ «Сік Груп Україна», 2015. – 292 с.
6. Balendra R. *Research dedicated to the development of advanced metal-forming technologies* / R. Balendra, Y. Qin // *J. Mater. Process. Technol.* – 2004. – № 2. – P. 144–152.
7. Алиев И. С. *Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания* / И. С. Алиев // *Кузнечно-штамповочное производство.* – 1990. – № 2. – С. 7–10.
8. Алиева Л. И. *Альтернативные способы штамповки стержневых деталей с фланцем* / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, Е. М. Солодун // *Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии».* – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – С. 5–8.
9. Алиева Л. И. *Формоизменение стержневых деталей с фланцем при радиально-прямом выдавливании* / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, А. В. Шкира // *Вісник національно технічного університету «ХПІ»* : зб. наук. праць – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 31 (1203). – С. 5–10.
10. *Комбинированное выдавливание полых деталей с фланцем* / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, С. В. Мартынов, Б. С. Мороз // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 231–236.
11. Гончарук Х. В. *Експериментальне дослідження процесу радіально-поздовжнього деформування* / Х. В. Гончарук, С. В. Ковалевский, М. Ю. Корденко // *Тези доповідей VII міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти».* – Київ–Херсон. – 2016. – С. 56–57.

REFERENCES

1. Aliieva L. I. *Perspektivy razvitiya processov tochnoj obemnoj shtampovki* / L. I. Aliieva, Ja. G. Zhbankov // *Visnik DDMA : zbirnik naukovih prac'.* – Kramators'k : DDMA, 2008. – № 1 (11). – S. 13–19.
2. Tarasov A. F. *Perspektivy ispol'zovaniya kombinirovannyh metodov obrabotki metallov davleniem* / A. F. Tarasov // *Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni* : zb. nauk. pr. – Kramators'k : DDMA, 2002. – S. 216–220.
3. Aliiev I. S. *Metodi poshuku novih tehnologichnih sposobiv vidavljuvannja* : kolektivna monografija / I. S. Aliiev // *Teorija ta praktika obrobki materialiv tiskom.* – Zaporizhzhja : AT «Motor-Sich», 2016. – S. 364–385. – ISBN 978-966-2906-60-8.
4. Zhang S. H. *Some new features in the development of metal forming technology* / S. H. Zhang, Z. R. Wang // *J. Mater. Process. Technol.* – 2004. – № 1. – P. 39–47.
5. Kaljuzhnyj O. V. *Intensifikacija formoutvorjuchih procesiv holodnogo shtampuvannja* : monografija / O. V. Kaljuzhnyj, V. L. Kaljuzhnyj. – K. : TOV «Sik Grup Ukraina», 2015. – 292 s.
6. Balendra R. *Research dedicated to the development of advanced metal-forming technologies* / R. Balendra, Y. Qin // *J. Mater. Process. Technol.* – 2004. – № 2. – P. 144–152.
7. Aliiev I. S. *Tehnologicheskie vozmozhnosti novyh sposobov kombinirovannogo vydavlivanija* / I. S. Aliiev // *Kuznechno-shtampovnochnoe proizvodstvo.* – 1990. – № 2. – S. 7–10.
8. Aliieva L. I. *Alternativnye sposoby shtampovki stержnevyyh detalej s flancem* / L. I. Aliieva, K. V. Goncharuk, E. M. Solodun // *Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Resurso-sberezhenie i jenergojefektivnost' processov i oborudovanija obrabotki davleniem v mashinostroenii i metallurgii».* – Har'kov : NTU «HPI», 2016. – S. 5–8.
9. Aliieva L. I. *Formoizmenenie stержnevyyh detalej s flancem pri radial'no-prjatom vydavlivanii* / L. I. Aliieva, K. V. Goncharuk, A. V. Shkira // *Visnik nacional'no tehnichnogo universitetu «HPI»* : zb. nauk. prac' – Harkiv : NTU «HPI», 2016. – № 31 (1203). – S. 5–10.
10. *Kombinirovannoe vydavlivanie polyh detalej s flancem* / L. I. Aliieva, Ja. G. Zhbankov, S. V. Martynov, B. S. Moroz // *Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni* : zb. nauk. pr. – Kramators'k : DDMA, 2007. – S. 231–236.
11. Goncharuk H. V. *Ekperimental'ne doslidzhennja procesa radial'no-pozdovzh'nogo deformuvannja* / H. V. Goncharuk, S. V. Kovalevskij, M. Ju. Kordenko // *Tezi dopovidej VII mizhnarodnoi naukovu-tehnichnoi kon-frencii «Teoretichni ta praktichni problemi v obrobci materialiv tiskom i jakosti fahovoi osviti».* – Kii–Herson. – 2016. – С. 56–57.

Алієва Л. І. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМТ ДДМА;
Малій Х. В. – канд. техн. наук, асист. каф. ОМТ ДДМА.

E-mail: leilialieva2017@gmail.com; kristina.v.goncharuk@gmail.com

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2018 р.