

УДК.621.983

Калюжний О. В.  
Соколовська С. С.**КОМБІНОВАНЕ ВИТЯГУВАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ ІЗ ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК З РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ В ДВОХКОНУСНІЙ ТРАДИЦІЙНІЙ МАТРИЦІ ТА МАТРИЦІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ**

Витягування вісесиметричних порожнистих виробів з листових заготовок відноситься до широко розповсюдженої формоутворюючої операції листового штампування. Традиційне витягування вісесиметричних виробів з круглої заготовки, рекомендації по визначенню параметрів для проектування технології, які викладені в джерелах [1–4], вже не відповідають вимогам сучасного виробництва, як по продуктивності штампування, так і по точності форми і розмірів виробів. Використання комбінованого витягування в одноконусній і двохконусній матрицях дозволяє збільшити глибину витягування за один перехід та підвищити точність виробів завдяки потоншенню стінки при формоутворенні виробів [5]. В джерелі [6] встановлені оптимальні кути традиційної двохконусної матриці, які забезпечують мінімальні зусилля деформування та коефіцієнти витягування. Для зменшення зусилля комбінованого витягування в двохконусній матриці та скорочення кількості переходів штампування використовують матрицю спеціального профілю з деформуючою поверхнею, що утворена перетином торів [7, 8]. В такій матриці зменшується площа контакту між заготовкою і матрицею та знижується вплив сил тертя при формоутворенні порожнистих виробів. В роботі [9] приведений порівняльний аналіз комбінованого витягування в традиційній двохконусній матриці та в двохконусній матриці спеціального профілю, також показана ефективність використання останньої матриці. Актуальними залишаються задачі розширення марок матеріалів та встановлення граничного потоншення стінки при формоутворенні порожнистих виробів в матриці спеціального профілю.

Метою роботи є встановлення параметрів граничного формоутворення вісесиметричних порожнистих виробів з різних матеріалів при комбінованому витягуванні в двохконусній традиційній матриці та матриці спеціального профілю.

Схеми комбінованого витягування порожнистих виробів в двохконусній традиційній матриці [5] та в матриці спеціального профілю [7] показані на рис. 1.



Рис. 1. Схема комбінованого витягування в двоконусній матриці:  
а – в традиційній матриці, б – в матриці спеціального профілю

На рис. 1, а наведена схема витягування листової заготовки 1, яка встановлена в традиційній матриці 2 та деформується за допомогою пуансону 3. Деформуюча поверхня такої матриці утворена двома конусами з кутами  $\alpha$  і  $\beta$  та відповідними радіусами заокруглення  $r_1$ ,  $r_2$  та  $r_3$  в місцях переходу між конусними поверхнями та між конусними і циліндричними поверхнями. Комбіноване витягування в матриці спеціального профілю зображене на рис. 1, б, при якому вихідна заготовка 1 підлягає формоутворенню в матриці 2 за допомо-

гою пуансону 3. Деформуючі поверхні цієї матриці утворені перетином торів діаметром  $d$ , які розташовані з постійним кроком  $t$ . Дотичні до поверхонь торів також утворюють кути  $\alpha$  і  $\beta$  по аналогії з попередньою матрицею.

Визначення параметрів процесів комбінованого витягування в традиційній двохконусній матриці (ТМ) та матриці спеціального профілю (МСП) було проведено шляхом математичного моделювання за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) в програмному середовищі DEFORM. Деформуванню підлягали вихідні листові заготовки із міді М2 (умовна межа текучості  $\sigma_{0,2}=120$  МПа), сталі AISI 1010 (аналог відпаленої сталі 10,  $\sigma_{0,2}=240$  МПа) та сталі 12Х18Н10Т ( $\sigma_{0,2}=300$  МПа) діаметром  $D_c=110$  мм і товщиною  $S_o=1,7$  мм. Розміри ТМ згідно рекомендацій роботи [5] були наступні:  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=15^\circ$ ,  $D_i=60,8$  мм,  $r_1=5,5$  мм,  $r_2=12$  мм,  $r_3=15$  мм,  $D_{e1}=100$  мм,  $D_{e2}=60$  мм. Радіус заокруглення пуансону  $r_i=15$  мм, а величина діаметру  $D_i$  вибиралася в залежності від значення одностороннього зазору  $z$  між пуансоном та матрицею.

Розміри МСП були такі:  $d=4$  мм,  $t=4$  мм,  $r_1=5,5$  мм,  $r_2=4$  мм,  $r_3=15$  мм,  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=15^\circ$ . Коефіцієнт витягування в обох матрицях складав  $m = D_i / D_c = 0,55$ .

Для кожного із наведених матеріалів заготовок були встановлені величини граничного потоншення стінки (значення найменшого одностороннього зазору  $z$  між пуансоном та матрицею) при комбінованому витягуванні, які забезпечували формоутворення виробів без руйнування. На рис. 2 показано руйнування zdeформованої заготовки, яке відбувається на певній стадії комбінованого витягування в ТМ і МСП. Форма та розміри в міліметрах zdeформованої заготовки в момент відриву донної частини зображені на рис. 2, а. Руйнування відбувається при деформуванні заготовки по нижньому конусі матриці. Загальний вигляд в розрізі zdeформованої заготовки в момент руйнування наведений на рис. 2, б.

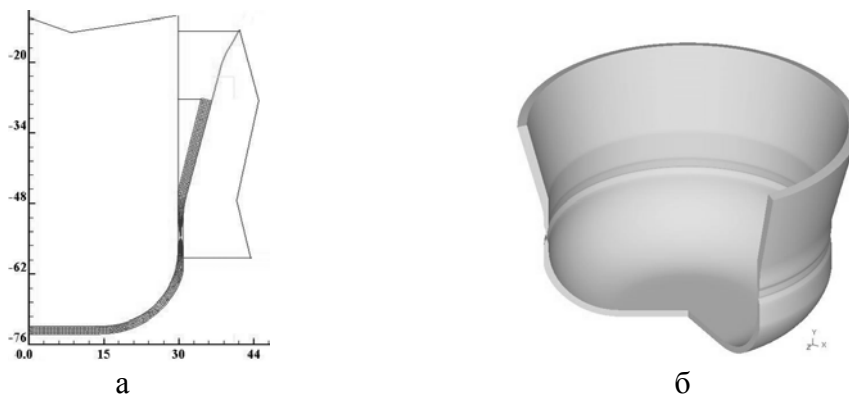


Рис. 2. Руйнування при витягуванні:

а – форма та розміри в міліметрах zdeформованої заготовки в момент відривання донної частини, б – загальний вигляд в розрізі zdeформованої заготовки в момент відривання донної частини

Наведемо результати розрахунків по витягуванню заготовок з міді М2. Було встановлено, що найменші зазори, які забезпечують формоутворення виробів без руйнування в ТМ і МСП, відповідно склали 1,1 мм і 0,9 мм. На рис. 3 показані залежності величини зусилля витягування від переміщення пуансону при різних величинах зазору  $z$  між пуансоном та матрицями. Залежності для витягування в ТМ приведені на рис. 3, а, а на рис. 3, б – для витягування в МСП. Необхідно відмітити, що використання МСП приводить до зменшення зусилля витягування в порівнянні з ТМ завдяки зниженню площі контакту заготовки з матрицею та зменшенню впливу сил тертя. Найбільша величина зусилля витягування в МСП з зазором  $z=0,9$  мм (114 кН) менша від відповідної величини (140 кН) при витягуванні в ТМ з  $z=1,1$  мм. Витягування з  $z=1,1$  мм в МСП відбувається при максимальному значенні зусилля 103 кН. Зменшення

зусилля, в порівнянні з використанням ТМ, склало 18,6%. При формоутворенні з зазором  $z = 1,7$  мм найбільша величина зусилля в ТМ склала 82 кН, а в МСП – 66 кН. Зусилля знижується на 19,5 %. Ще більше зменшення зусилля спостерігається при витягуванні з  $z = 2,21$  мм. Ця величина зазору для даного матеріалу заготовки та інших розглянутих матеріалів відповідає максимальному потовщенню стінки здеформованої заготовки в момент торкання торця здеформованої заготовки бокової поверхні пуансона.

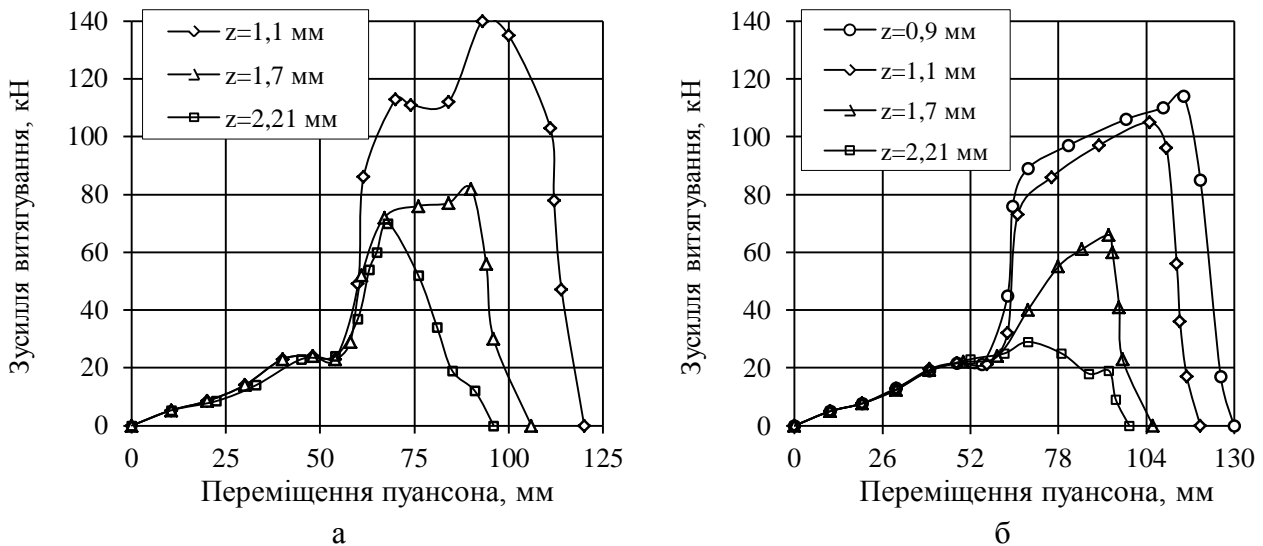


Рис. 3. Залежності зусилля витягування від переміщення пуансона при деформуванні заготовок із міді М2 з різним одностороннім зазором  $z$  :  
а – витягування в ТМ, б – витягування в МСП

Зниження зусилля деформування при використанні МСП приводить до зміни напруженого стану в здеформованій заготовці. Розподіли осьових  $\sigma_z$ , радіальних  $\sigma_r$  та тангенціальних  $\sigma_\theta$  напружень в здеформованих заготовках з міді М2 з одностороннім зазором  $z = 1,1$  мм при максимальному зусиллі витягування в ТМ і МСП приведені на рис. 4. На ньому тонкими лініями зображені фрагменти пуансону та матриці. Необхідно відмітити, що це зусилля виникає на різних стадіях формоутворення в ТМ і МСП. При витягуванні в ТМ найбільше зусилля виникає при завершенні деформування заготовки по нижньому конусу матриці (рис. 4, а), а при витягуванні в МСП – в момент торкання торця заготовки бокової поверхні пуансону (рис. 4, б).

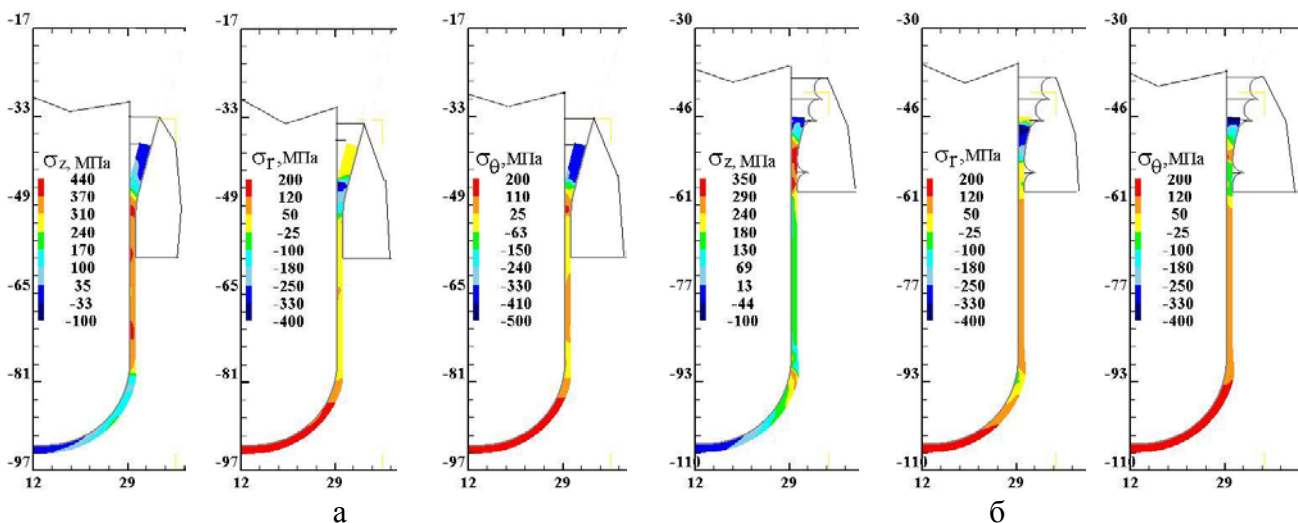


Рис. 4. Розподіли осьових  $\sigma_z$ , радіальних  $\sigma_r$  та тангенціальних  $\sigma_\theta$  напружень в здеформованих заготовках із міді М2 з одностороннім зазором  $z = 1,1$  мм при максимальному зусиллі витягування:  
а – при витягуванні в ТМ; б – при витягуванні в МСП

На цій стадії витягування в ТМ у стінці здеформованої заготовки виникають розтягувальні осеві напруження в межах  $\sigma_z = 370 \dots 440$  МПа, а при витягуванні в МСП у вказаному місці заготовки виникають осеві напруження  $\sigma_z = 180 \dots 240$  МПа. Як відомо, ці напруження є причиною відриву донної частини заготовки при витягуванні. Використання МСП приводить до суттєвого зменшення осевих напружень, тому є можливість зменшення зазору між пуансоном та матрицею. В підсумку зменшується кількість переходів витягування. Розподіли радіальних напружень  $\sigma_r$  для двох матриць практично не відрізняються. При витягуванні в ТМ стискаючі тангенціальні напруження у області торця здеформованої заготовки знаходяться в межах  $\sigma_\theta = -330 \dots -500$  МПа. Використання МСП приводить до виникнення таких напружень величиною  $\sigma_\theta = -180 \dots -330$  МПа. Завдяки цьому зменшується вірогідність гофроутворення на заготовці при витягуванні.

Пропрацювання структури металу холодною деформацією у здеформованих заготовках з міді М2 після витягування можна оцінити по розподілах інтенсивності деформацій, які після формоутворення в МСП з різною величиною зазору  $z$  наведені на рис. 5. Для розглянутих зазорів в донній частині здеформованих заготовок від вісі симетрії до місця переходу в циліндричну частину заготовки величини вказаних деформацій зростають від  $\varepsilon_i = 0,00$  до  $\varepsilon_i = 0,47$ . Далі іде подальше зростання інтенсивності деформацій по висоті до торця здеформованої заготовки. Збільшення величини зазору приводить до зменшення величин  $\varepsilon_i$ . Після витягування з зазором  $z = 0,9$  мм в області торця здеформованої заготовки отримано  $\varepsilon_i = 1,7 \dots 1,9$ , а після витягування з  $z = 2,21$  мм –  $\varepsilon_i = 0,68 \dots 0,80$ .

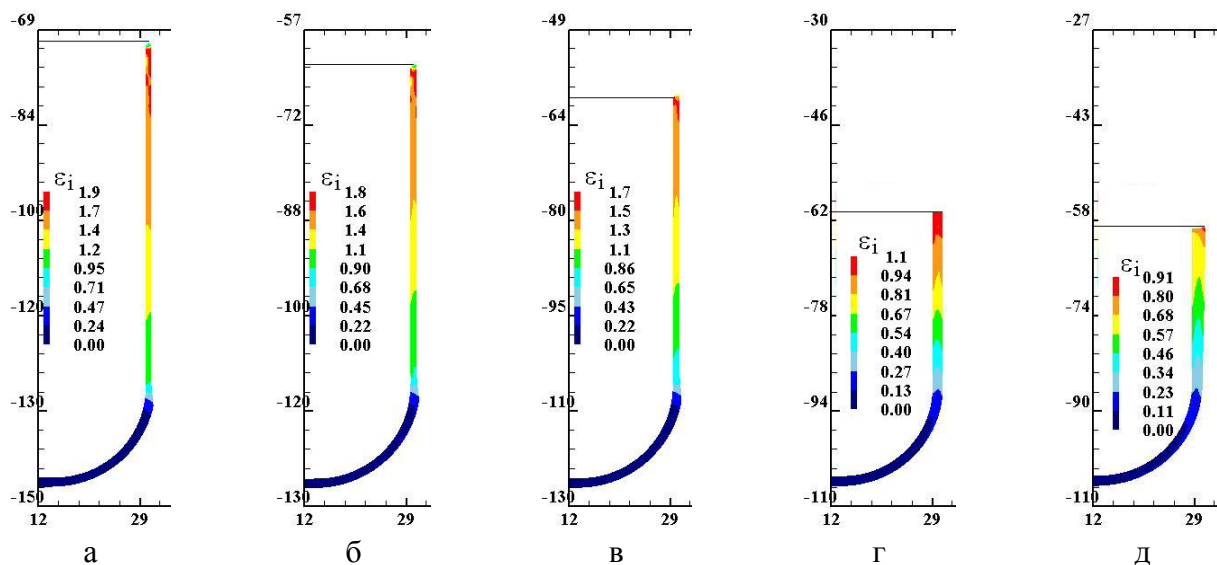


Рис. 5. Розподіли інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  в здеформованих заготовках із міді М2, які отримані витягуванням в МСП з різним одностороннім зазором  $z$  :

а –  $z = 0,9$  мм; б –  $z = 1,0$  мм; в –  $z = 1,1$  мм; г –  $z = 1,7$  мм; д –  $z = 2,21$  мм

На рис. 6 зображені форми та розміри в міліметрах здеформованих заготовок із міді М2, які отримані витягуванням в МСП з різним одностороннім зазором  $z$ . Величини зазорів  $z = 0,9; 1,0; 1,7$  мм забезпечують отримання циліндричної частини заготовки з однаковою товщиною по всій висоті. Чим менший зазор, тим більша висота здеформованої заготовки. Після витягування з  $z = 0,9$  мм вказана висота складала 74 мм, а після витягування з  $z = 2,21$  мм – 42,5 мм. Збільшення величини зазору приводить до зменшення потоншення донної частини заготовок, що пов'язано зі зниженням зусилля витягування. Якщо порівнювати розміри здеформованих заготовок після витягування в ТМ, то вони мають збільшену висоту завдяки більшому потонненню стінки на радіусі заокруглення пуансона. Після витя-

гування з  $z = 1,1$  мм в ТМ висота здеформованої заготовки склала 65,3 мм, а стінка на радіусі заокруглення потоншала до 1,39 мм. Після витягування в МСП ці розміри відповідно дорівнюють 64 мм і 1,46 мм (див. рис. 6). Загальні вигляди в розрізі здеформованих заготовок, які отримані в МСП з різним одностороннім зазором  $z$ , приведені на рис. 7.

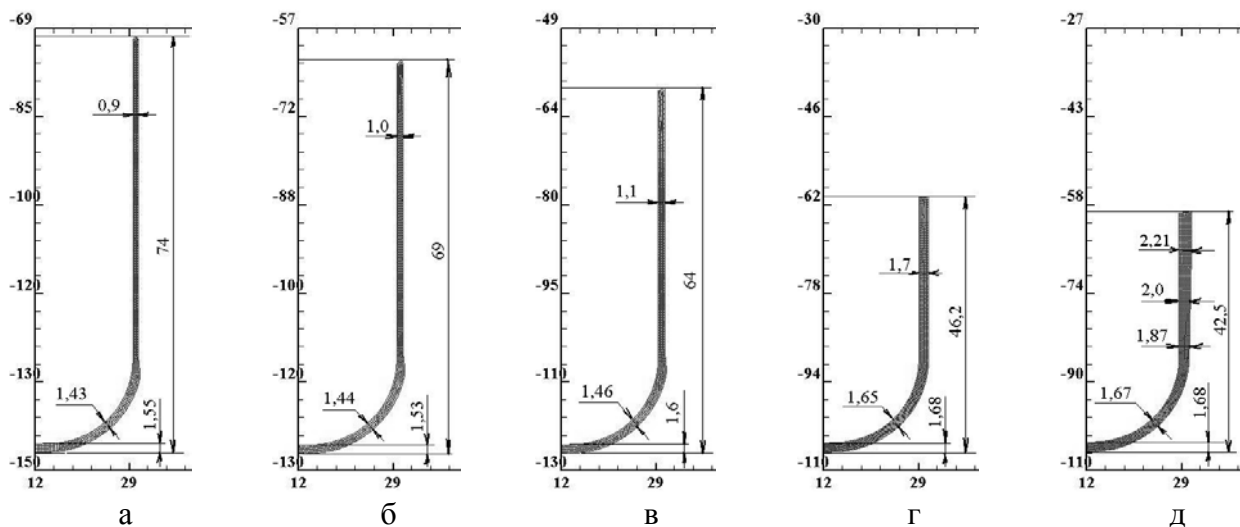


Рис. 6. Форма та розміри в міліметрах здеформованих заготовок із міді М2, які отримані витягуванням в МСП з різним одностороннім зазором  $z$  :

а –  $z = 0,9$  мм; б –  $z = 1,0$  мм; в –  $z = 1,1$  мм; г –  $z = 1,7$  мм; д –  $z = 2,21$  мм

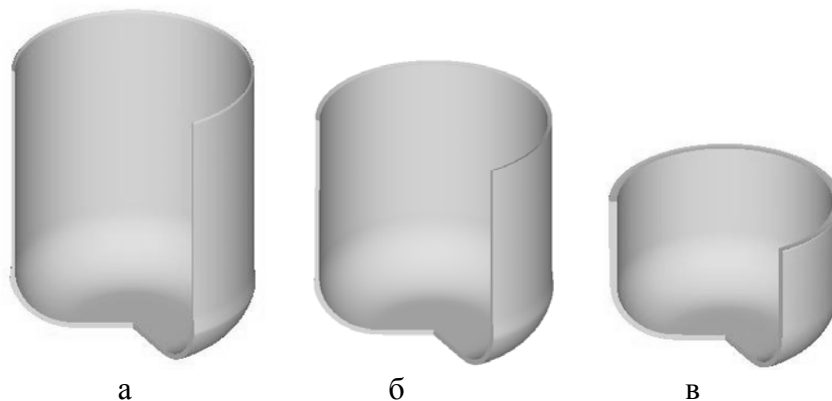


Рис. 7. Загальні вигляди в розрізі здеформованих заготовок, які отримані в МСП з різним одностороннім зазором  $z$  :

а –  $z = 0,9$  мм; б –  $z = 1,1$  мм; в –  $z = 2,21$  мм

Далі наведемо результати розрахунків для витягування в ТМ і МСП листових заготовок із сталі 12Х18Н10Т. Моделюванням встановлено, що при витягуванні в ТМ найменшим зазором, при якому заготовка деформується без руйнування, є зазор  $z = 1,1$  мм. При витягуванні в МСП гранична величина такого зазору складає  $z = 1,0$  мм.

На рис. 8 приведені залежності зусилля витягування від переміщення пуансона при витягуванні заготовок із сталі 12Х18Н10Т з різним одностороннім зазором  $z$ . Залежності для витягування в ТМ показані на рис. 8, а, а для витягування в МСП зображені на рис. 8, б. Як і в попередньому випадку, використання МСП приводить до зменшення зусилля деформування. Витягування в МСП заготовки з зазором  $z = 1,0$  мм відбувається при меншому зусиллі в порівнянні з формоутворенням в ТМ з зазором  $z = 1,1$  мм. Найбільша величина зусилля в останньому випадку складає 350 кН. Деформування заготовки в МСП з  $z = 1,1$  мм проходить при максимальному зусиллі 273 кН. Зменшення зусилля складає 22%. Якщо порівняти результати формоутворення в двох матрицях для зазорів  $z = 1,7$  мм і  $z = 2,21$  мм, то максимальні величини зусилля зменшуються відповідно на 24,7% та 55%.

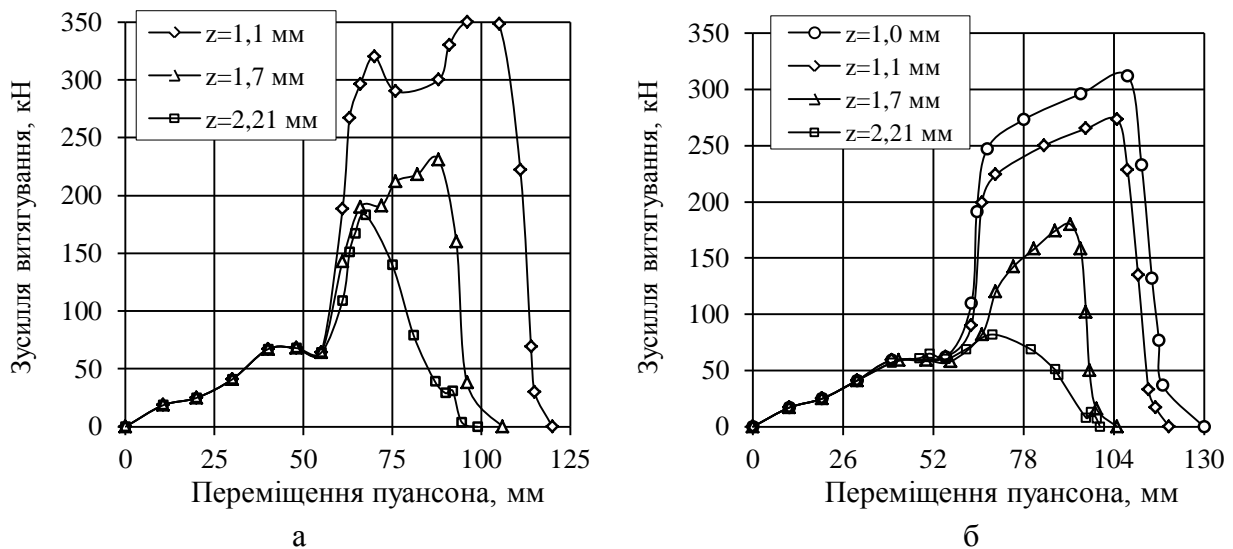


Рис. 8. Залежності зусилля витягування від переміщення пуансона при деформуванні заготовок із сталі 12X18H10T з різним одностороннім зазором  $z$  :  
а – витягування в ТМ; б – витягування в МСП

Використання МСП для витягування заготовок із сталі дає більші величини зменшення зусилля в порівнянні з деформуванням заготовок із міді.

Розподіли інтенсивності деформацій у здеформованих заготовках із сталі 12X18H10T, які отримані при різних величинах зазору  $z$ , практично не відрізняються від розподілів у здеформованих заготовках із міді М2, що отримані при однакових зазорах (див. рис. 5).

Також не відрізняються форми та розміри здеформованих заготовок (див. рис. 6).

Для витягування заготовок із сталі AISI 1010 мінімальні односторонні зазори, при яких проходить формоутворення без руйнування в ТМ і МСП складають відповідно  $z = 1,1$  мм і  $z = 1$  мм. Для наведеної сталі залежність зусилля витягування від переміщення пуансона при різних величинах зазору приведені на рис. 9. Порівняння результатів по найбільших величинах зусилля витягування показало, що зниження значень зусилля завдяки використанню МСП склало: при зазорі  $z = 1,1$  мм – на 13,5%, при  $z = 1,7$  мм – на 13,5%, при  $z = 2,21$  мм – на 53,1%.

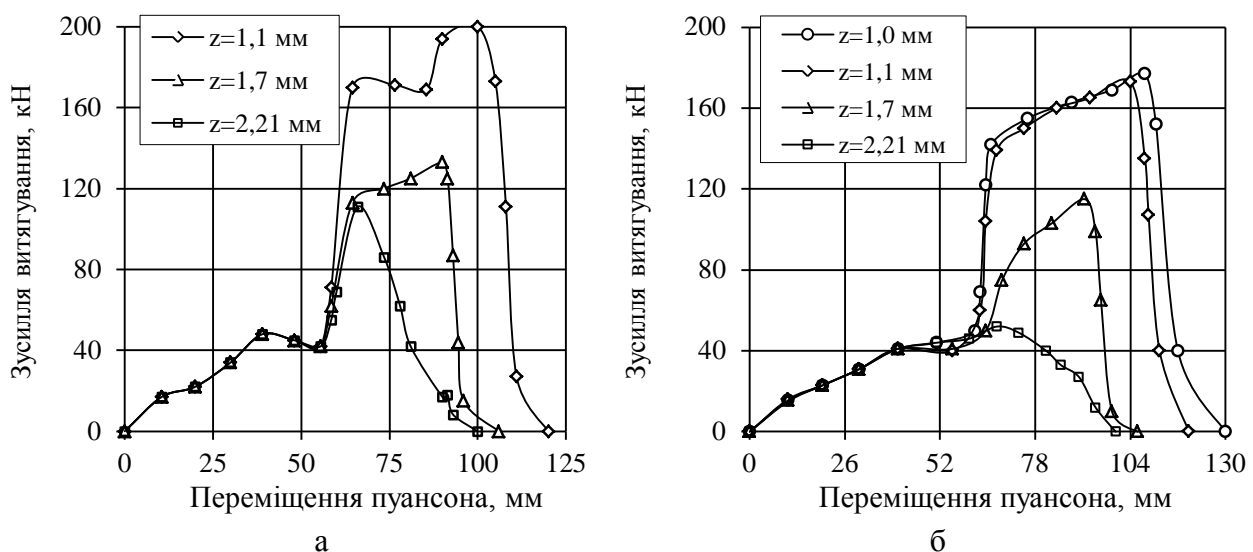


Рис. 9. Залежності зусилля витягування від переміщення пуансона при витягуванні порожнистих виробів із сталі AISI 1010:  
а – витягування в ТМ; б – витягування в МСП

Таким чином, чим міцніший матеріал вихідних листових заготовок, тим більше зниження зусилля витягування при використанні матриці спеціального профілю.

За результатами розрахунків був виготовлений штамп для комбінованого витягування в матриці спеціального профілю порожнистих деталей із сталі 10 з зовнішнім діаметром 60,8 мм. На рис. 10 приведений штамп, який встановлений на гідравлічному пресі ДБ2432 зусиллям 1,6 МН. Вихідні заготовки діаметром 110 мм і товщиною 1,7 мм зображені на рис. 11. На рис. 12 приведені деталі, які отримані витягуванням з одностороннім зазором між пуансоном і матрицею 1 та 2,21 мм



Рис. 10. Штамп для витягування, який встановлений на гідравлічному пресі зусиллям 1,6 МН



Рис. 11. Вихідні листові заготовки сталі 10



Рис. 12 Деталі, які отримані витягуванням з різними зазорами  $z$



$z = 1,0$  мм       $z = 2,21$  мм

Рис. 12 Деталі, які отримані витягуванням з різними зазорами  $z$

## ВИСНОВКИ

З використанням методу скінченних елементів проведений аналіз комбінованого витягування листових заготовок із міді М2, сталей 10 і 12Х18Н10Т в традиційній двоконусній матриці та в матриці спеціального профілю. Для вказаних матеріалів встановлені величини мінімальних односторонніх зазорів між матрицею і пуансоном, при яких комбіноване витягування проходить без руйнування. Для витягування з різними зазорами виявлені залежності зусилля витягування від переміщення пуансонів. Використання матриці спеціального профілю приводить до зниження зусилля деформування, осьових розтягувальних напружень в небезпечному перерізі заготовки та скорочення кількості переходів формоутворення порожнистих виробів. Чим міцніший матеріал вихідної листової заготовки, тим більша ефективність зниження зусилля. Розрахунком визначені кінцеві форми та розміри zdeформованих заготовок та їх напружено-деформований стан.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп.* / В. П. Романовский. – Л. : Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. *Ковка и штамповка. Справочник: В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка* / Под ред. А. Д. Матвеева. – 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. Валиев С. А. *Комбинированная глубокая вытяжка листовых заготовок* / С. А. Валиев. – М. : Машиностроение, 1973. – 176 с.
6. Калюжний В. Л. *Визначення оптимального кута вхідного конусу двоконусної матриці для комбінованого витягування вісесиметричних виробів* / В. Л. Калюжний, А. С. Запороженко // *Збірник наукових праць. Серія галузеве машинобудування, будівництво.* – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – Вип. 2 (37). – С. 99–105.



7. Калюжний О. В. Зменшення кількості переходів витягування вісесиметричних виробів з використанням матриці спеціального профілю / О. В. Калюжний // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов.* – Краматорськ : ДГМА, 2013. – № 4 (37). – С. 93–97.

8. Калюжний О. В. Зменшення зусилля та підвищення продуктивності формоутворення при комбінованому витягуванні вісесиметричних виробів / О. В. Калюжний // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях».* – Харків, 2013. – № 42'2013. – С. 126–131.

9. Калюжний О. В. Порівняльний аналіз ефективності процесу комбінованого витягування в двоконусній матриці та матриці спеціального профілю / О. В. Калюжний // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 32–37.

#### REFERENCES

1. Romanovskij V. P. *Spravochnik po holodnoj shtampovke. 6-e izd., pererab. i dop.* / V. P. Romanovskij. – L. : Mashinostroenie, 1979. – 520 s.

2. Kovka i shtampovka. *Spravochnik: V 4 t. T. 4. Listovaja shtampovka / Pod red. A. D. Matveeva.* – M. : Mashinostroenie, 1985–1987. – 544 s.

3. Averkiev Ju. A. *Holodnaja shtampovka / Ju. A. Averkiev.* – Izdatel'stvo Rostovskogo universiteta, 1984. – 288 s.

4. Averkiev Ju. A. *Tehnologija holodnoj shtampovki / Ju. A. Averkiev, A. Ju. Averkiev.* – M. : Mashinostroenie, 1989. – 304 s.

5. Valiev S. A. *Kombinirovannaja glubokaja vytjazhka listovyh zagotovok / S. A. Valiev.* – M. : Mashinostroenie, 1973. – 176 s.

6. Kaljuzhnij V. L. *Viznachennja optimal'nogo kuta vhidnogo konusu dvokonusnoi matrici dlja kombinovanogo vitjaguvannja visesimetrichnih virobiv / V. L. Kaljuzhnij, A. S. Zaporozhchenko // Zbirnik naukovih prac'. Serija galuzeve mashinobuduvannja, budivnictvo.* – Poltava : PoltNTU, 2013. – Vip. 2 (37). – S. 99–105.

7. Kaljuzhnij O. V. *Zmenschennja kil'kosti perehodiv vitjaguvannja visesimetrichnih virobiv z vikoristannjam matrici special'nogo profilju / O. V. Kaljuzhnij // Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov.* – Kramators'k : DGMA, 2013. – № 4 (37). – S. 93–97.

8. Kaljuzhnij O. V. *Zmenschennja zussilla ta pidvishhennja produktivnosti formoutvorennya pri kombinovanomu vitjaguvanni visesimetrichnih virobiv / O. V. Kaljuzhnij // Visnik NTU «HPI», Serija «Novi rishennja v su-chasnih tehnologijah».* – Harkiv, 2013. – № 42'2013. – S. 126–131.

9. Kaljuzhnij O. V. *Porivnjal'nij analiz effektivnosti procesu kombinovanogo vitjaguvannja v dvokonusnij matrici ta matrici special'nogo profilju / O. V. Kaljuzhnij // Obrabotka materialov davlenim : sbornik nauchnyh trudov.* – Kramatorsk : DGMA, 2014. – № 1 (38). – S. 32–37.

Калюжний О. В. – канд. техн. наук, доц. каф. ДММ та ОМ НТУУ «КПІ»;

Соколовська С. С. – магістр кафедри МПМ та РП НТУУ «КПІ».

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ.

E-mail: Av-k@ukr.net

Статья поступила в редакцию 25.09.2015 г.