

УДК.621.983

Калюжний В. Л.
Соколовська С. С.

ВПЛИВ ТЕРТЯ НА ФОРМОУТВОРЕННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ ІЗ СТАЛІ 10 КОМБІНОВАНИМ ВИТЯГУВАННЯМ В ОДНОКОНУСНІЙ МАТРИЦІ

Витягування вісесиметричних порожнистих виробів з листових заготовок відноситься до широко розповсюджених формуютьючих операцій листового штампування. Рекомендації по визначенню параметрів для проектування технологій витягування і штампового оснащення виробів з круглих листових заготовок, які викладені в джерелах [1-4], базуються на виробничому досвіді і експериментальних даних. Практично відсутні дані по впливу тертя на формоутворення виробів та зусиллях знімання виробів із пуансонів. Використання комбінованого витягування в одноконусній і двохконусній матрицях дозволяє збільшити глибину витягування за один перехід та підвищити точність виробів завдяки потоншенню стінки при формоутворенні [5]. В джерелі [6] шляхом моделювання за допомогою метода скінченних елементів (МСЕ) встановлені оптимальні кути двохконусної матриці, які забезпечують мінімальні зусилля деформування та коефіцієнти витягування. Показана можливість створення достатньо точних математичних моделей на базі МСЕ. В роботах [7, 8] приведені дані по впливу відносної товщини заготовки, коефіцієнта витягування на формоутворення порожнистих виробів в конусних матрицях. Однак в літературних джерелах по витягуванню в конусних матрицях також немає даних по зусиллях знімання виробів з пуансонів, недостатньо висвітлений вплив коефіцієнта тертя на силові режими формоутворення виробів, напружено-деформований стан та температуру здеформованих заготовок.

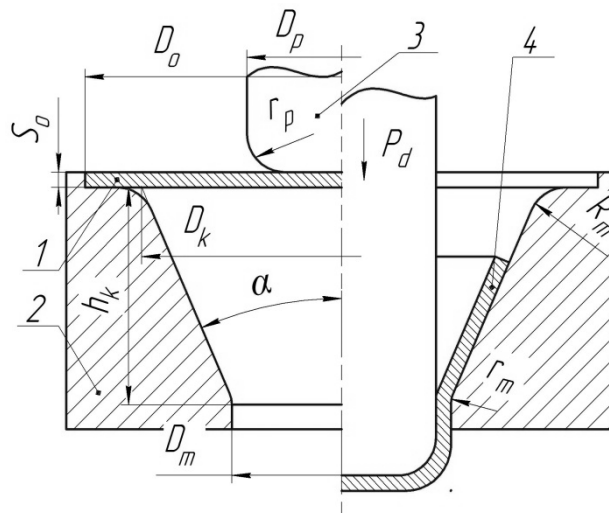


Рис. 1. Схема комбінованого витягування в одноконусній матриці

Метою роботи є встановлення впливу коефіцієнта тертя на формоутворення вісесиметричних порожнистих виробів із сталі 10 при комбінованому витягуванні в одноконусній матриці.

На рис. 1 наведена схема комбінованого витягування в одноконусній матриці. Ліворуч від вісі симетрії показаний вихідний стан при витягуванні. Вихідну листову заготовку 1 діаметром D_0 встановлюють в одноконусній матриці 2 та деформують за допомогою пуансона 3. Деформуюча поверхня матриці 2 утворена конусом з кутом α та відповідними радіусами заокруглення r_m та R_m в місцях переходу між конусними і циліндричними поверхнями. Ді-

аметр отвору матриці D_m . Праворуч від вісі симетрії показане положення в процесі витягування із zdeформованою заготовкою 4. Встановлення впливу коефіцієнта тертя на формоутворення порожнистих виробів комбінованим витягуванням в одноконусній матриці було проведено шляхом математичного моделювання за допомогою МСЕ в програмному середовищі DEFORM. Деформуванню підлягали вихідні листові заготовки із сталі 10 (з умовною межею текучості $\sigma_{0,2} = 260$ МПа) діаметром $D_o = 95$ мм і товщиною $S_o = 1,5$ мм. Розміри одноконусної матриці були наступні: $\alpha = 20^\circ$, $D_m = 38$ мм, $R_m = 4$ мм, $r_m = 30$ мм, $D_k = 94,5$ мм. Радіус заокруглення пуансон $r_p = 8$ мм, а величина діаметра $D_p = 35$ мм. Відносна товщина заготовки складає $n = (S_o / D_3) 100 = 1,58$ %, а коефіцієнт витягування – $m = D_m / D_3 = 0,4$. Моделювання проводилося при значеннях коефіцієнта тертя $\mu = 0,05$; $0,08$ і $0,1$. Використана пружно-пластична модель металу.

Розрахункові положення заготовки і деформуючого інструмента в розрізі приведені на рис. 2. Положення на початку витягування зображене на рис. 2, а (1 – вихідна заготовка, 2 – матриця, 3 – пуансон). На рис. 2, б приведені положення в кінці витягування з утворенням порожнистого виробу. При моделюванні знімання виробу із пуансона торець виробу спирався на нерухомий знімач 4 (рис. 2, в), а пуансон рухався вгору. Положення в кінці знімання приведені на рис. 2, г.

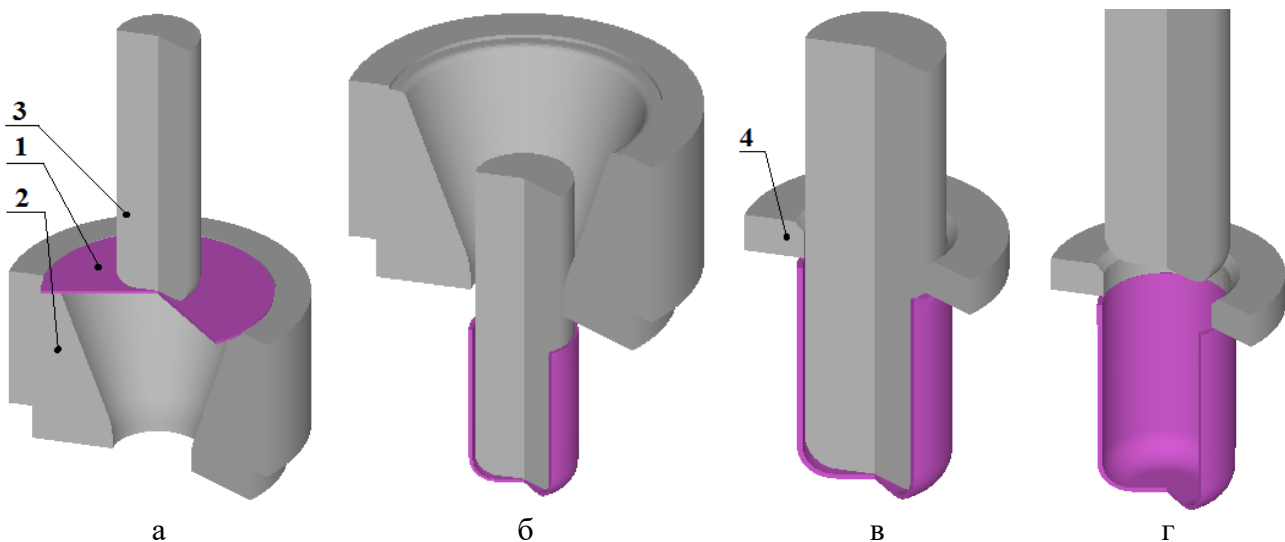


Рис. 2. Розрахункові положення заготовки і деформуючого інструмента:

а – положення на початку витягування, б – положення в кінці витягування, в – положення на початку знімання виробу із пуансона, г – положення в кінці знімання

Для кожного значення коефіцієнта тертя моделюванням були визначені залежності зусилля витягування і зусилля знімання виробів із пуансонів та напружено-деформований стан, ступінь використання ресурсу пластичності і температура zdeформованого металу. Графіки залежностей зусилля витягування від переміщення пуансонів представлені на рис. 3. Вигляд залежностей практично однаковий для розглянутих величин коефіцієнтів тертя. На стадії згинання заготовок на радіусі матриці R_m та деформування по конусу матриці зусилля однакові. Коли торець zdeформованої заготовки заходить в зазор між матрицею і пуансоном зусилля відрізняються. Максимальні значення зусиль отримані в момент торкання торця zdeформованої заготовки бокової поверхні пуансона. При формоутворенні з коефіцієнтом $\mu = 0,05$ це значення зусилля витягування складає 90,5 кН, при $\mu = 0,08$ - 106 кН, при $\mu = 0,1$ - 116 кН. Наведені графіки дозволяють визначити роботу деформації при витягуванні і вибрати ковальсько-пресове обладнання для реалізації процесів на виробництві.

Для проектування штампового оснащення необхідно знати зусилля знімання виробу із пуансонів після витягування. Залежності зусилля знімання від переміщення пуансонів показані на рис. 4 (див. рис. 2в). Зусилля знімання залежить від величин залишкових стискаючих радіальних напружень σ_r , які виникають у zdeформованій заготовці після завершення прикладання зусилля деформування зі сторони пуансона. Максимальні значення зусиль знімання виникають на початку зворотного руху пуансона. Чим більший коефіцієнт тертя, тим більша найбільша величина зусилля знімання. Для витягування з $\mu = 0,05$ отримано 0,55 кН, для $\mu = 0,08$ - 0,9 кН, для $\mu = 0,1$ - 1,18 кН.

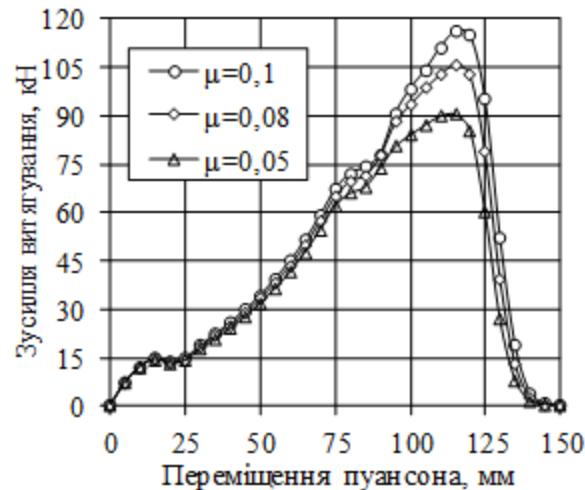


Рис. 3. Залежності зусиль витягування від переміщення пуансонів

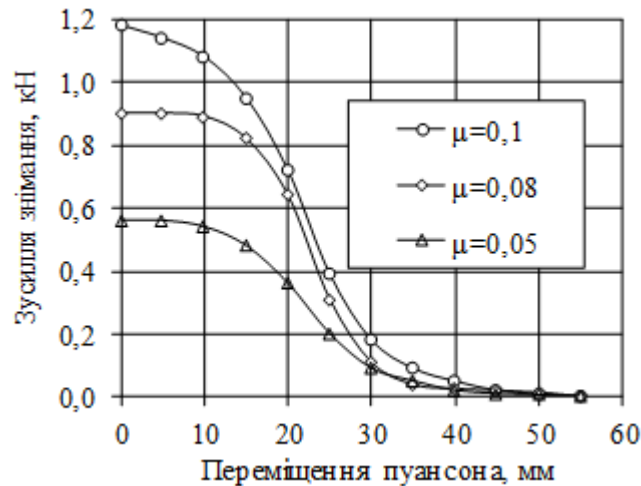


Рис. 4. Залежності зусиль знімання виробу із пуансонів від переміщення пуансонів

Причиною руйнування zdeформованих заготовок при комбінованому витягуванні в одноконусній матриці є виникнення значних осьових розтягувальних напружень σ_z у стінці zdeформованої заготовки на радіусі заокруглення пуансона, в місці переходу з радіуса заокруглення в циліндричну частину, а також в місці виходу стінки із зазору між матрицею і пуансоном. На рис. 5 показані розподіли осьових напружень σ_z у zdeформованих заготовках при максимальному значенні зусилля витягування. Стискаючі осьові напруження величиною $\sigma_z = -100$ МПа виникають в осередку деформації, який знаходиться в зазорі між матрицею і пуансоном. Чим більша величина коефіцієнта тертя, тим більші величини розтягувальних напружень σ_z , які виникають у стінці циліндричної частини zdeформованої заготовки та у стінці на радіусі заокруглення пуансона. При витягуванні з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,05$ у стінці циліндричної частини отримано $\sigma_z = 400 \dots 620$ МПа, а на радіусі заокруглення пуансо-

на $\sigma_z=240$ МПа (рис. 5, а). Для формоутворення виробів із $\mu=0,08$ (рис. 5, б) у вказаних місцях відповідно отримано $\sigma_z=400\dots650$ МПа і $\sigma_z=250$ МПа., а для $\mu=0,1$ – $\sigma_z=400\dots680$ МПа і $\sigma_z=290$ МПа (рис. 5, в). Для прикладу, на рис. 6, приведені розподіли радіальних σ_r , тангенціальних σ_θ та інтенсивності σ_i напружень при максимальній величині зусилля витягування для формоутворення виробів із $\mu=0,08$. У циліндричній частині здеформованої заготовки виникають стискаючі радіальні напруження σ_r (рис. 6, а). У стінці донної частини ці напруження стають розтягувальними. Тангенціальні напруження у циліндричній частині та донній частині здеформованої заготовки є розтягувальними, а в осередку деформації вони стискаючі (рис. 6, б). Максимальні значення інтенсивності напружень виникають в осередку деформації та у стінці на радіусі заокруглення пуансона та досягають значень відповідно $\sigma_i=660$ МПа і $\sigma_i=510$ МПа. У циліндричній частині здеформованої заготовки ці напруження знаходяться в межах $\sigma_i=450\dots560$ МПа. Встановлені величини інтенсивності напружень σ_i дозволяють прогнозувати межу текучості здеформованого металу у стінці здеформованої заготовки величиною $\sigma_s=500$ МПа.

Для визначення можливості подальшого потоншення стінки виробів, які отримані комбінованим витягуванням в одноконусній матриці з різним коефіцієнтом тертя, був визначений ступінь використання ресурсу пластичності Ψ здеформованого металу. На рис. 7 показані розподіли вичерпаного ресурсу пластичності Ψ . При значенні $\Psi=1$ відбувається руйнування здеформованого металу. Найбільші величини Ψ отримані в стінці на радіусі заокруглення пуансонів для розглянутих коефіцієнтів тертя. При витягуванні із $\mu=0,05$ у цьому місці отримано $\Psi=0,55$ (рис. 7, а). У циліндричній частині здеформованої заготовки ресурс пластичності вичерпується менше, чим на половину - $\Psi=0,4$. Формоутворення порожнистих виробів із $\mu=0,08$ приводить до величин $\Psi=0,55$ у стінці на радіусі заокруглення пуансона та до $\Psi=0,4$ у стінці циліндричної частини заготовки (рис. 7, б), а при витягуванні із $\mu=0,1$ у вказаних місцях отримано величини відповідно $\Psi=0,4$ та $\Psi=0,65$ (рис. 7, в). Таким чином можна виконувати потоншення стінок отриманих виробів шляхом використання наступного переходу витягування з потоншенням.

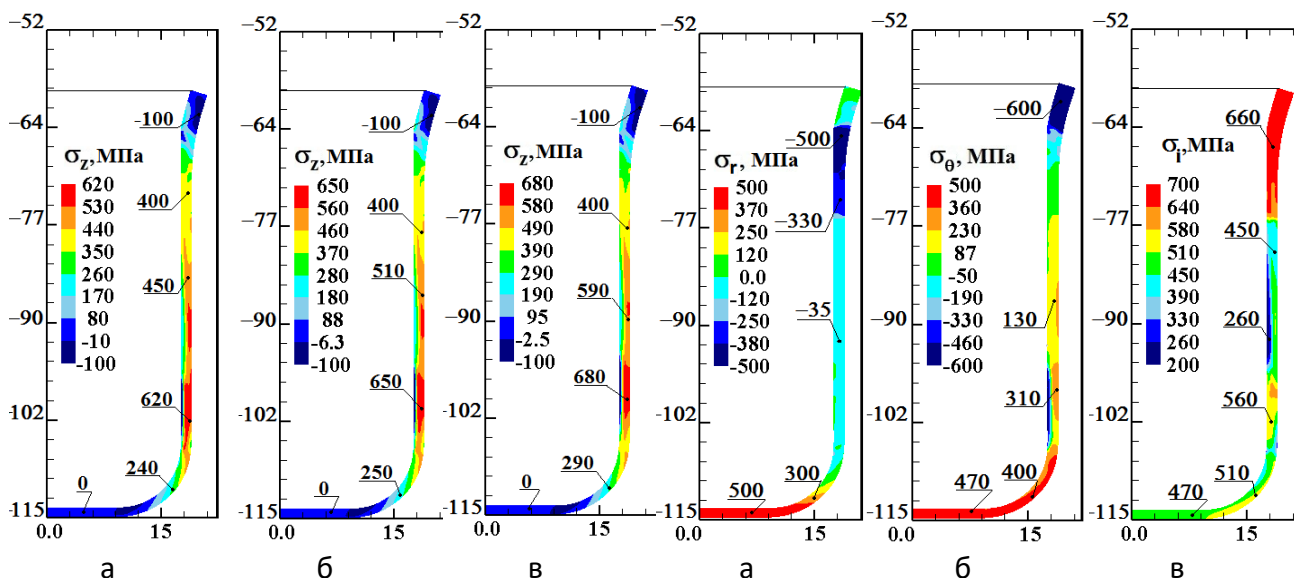


Рис. 5. Розподіл осевих напружень в здеформованих заготовках при максимальному зусиллі витягування: а – $\mu=0,05$, б – $\mu=0,08$, в – $\mu=0,1$

Рис. 6. Розподіли компонент напружень при максимальному зусиллі витягування для $\mu=0,08$: а – розподіл радіальних напружень σ_r , розподіл тангенціальних напружень σ_θ розподіл інтенсивності напружень σ_i ,

При холодному комбінованому витягуванні підвищується температура здеформованого металу. Найбільші величини температур и виникають при максимальному значенні зусилля витягування. На рис. 8 наведені розподіли температури у здеформованих заготовках. Чим більша величина коефіцієнта тертя, тим більша температура здеформованого металу в осередку деформації, яка досягає величини $35^{\circ}\text{--}39^{\circ}\text{C}$. Виявлені величини температур дозволяють уточнити вимоги до змащень для витягування.

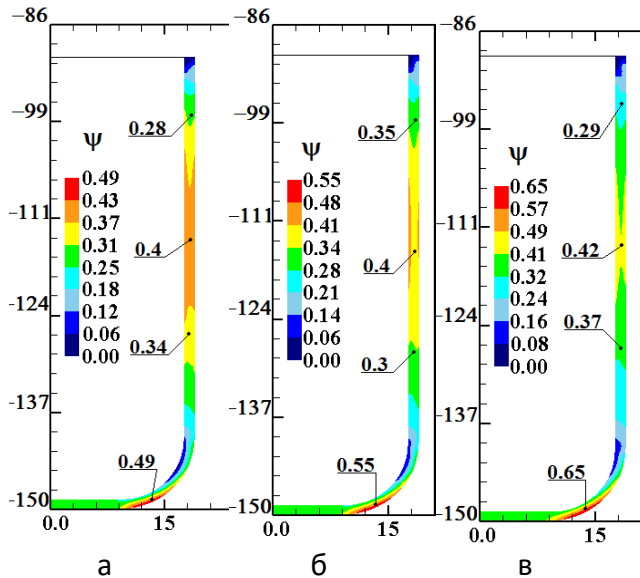


Рис. 7. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності здеформованого металу: а – $\mu = 0,05$, б – $\mu = 0,08$, в – $\mu = 0,1$

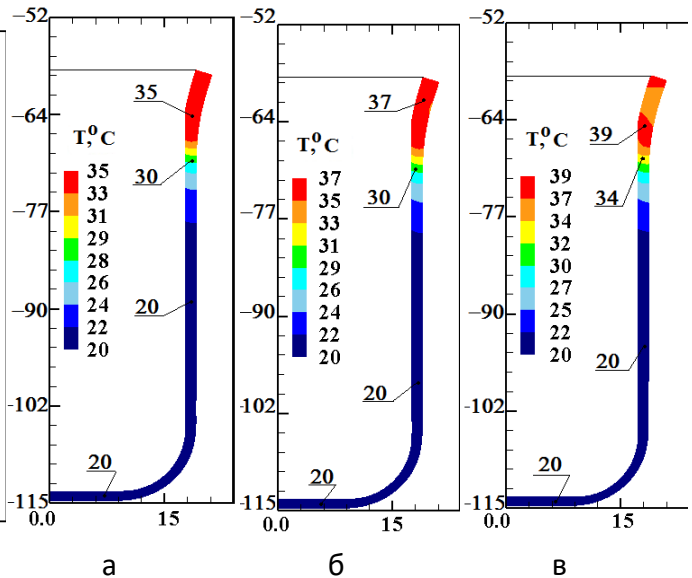


Рис. 8. Розподіл температури здеформованого металу при максимальному зусиллі витягування: а – $\mu = 0,05$, б – $\mu = 0,08$, в – $\mu = 0,1$

Пропрацювання металу холодною деформацією у здеформованих заготовках після витягування можна оцінити по розподілах інтенсивності деформацій ε_i . Моделюванням встановлено, що для розглянутих коефіцієнтів тертя суттєвої відмінності в розподілі інтенсивності деформацій немає. При цьому встановлені кінцеві форма і розміри виробів. Для прикладу, на рис. 9, показані розподіл інтенсивності деформацій ε_i та кінцеві форма і розміри виробів після витягування із $\mu = 0,08$. В донній частині здеформованої заготовки від вісі симетрії до місця переходу в радіус заокруглення метал практично не деформується. У стінці на радіусі заокруглення пуансона отримана інтенсивність деформацій у межах $\varepsilon_i = 0,2 \dots 0,4$ (рис. 9, а). У циліндричній частині здеформованої заготовки величина ε_i змінюється від $\varepsilon_i = 0,5$ в донній частині до $\varepsilon_i = 1,5$ в зоні торця. При витягуванні має місце потоншення стінки виробу в донній частині та на радіусі заокруглення пуансона (рис. 9, б). У вказаних місцях отримано відповідно 1,33 та 1,35 мм. стінка циліндричної частини має товщину 1,5 мм, що відповідає величині одностороннього зазору між пуансоном і матрицею.

Моделювання комбінованого витягування в одноконусній матриці із коефіцієнтом тертя $\mu = 0,15$ показало, що отримати виріб неможливо при даних розмірах заготовки. На стадії витягування, коли донна частина здеформованої заготовки заходить в матрицю, у стінці здеформованої заготовки на радіусі заокруглення пуансона виникають значні розтягувальні напруження, які приводять до швидкого вичерпання ресурсу пластичності здеформованого металу та відриву донної частини у цьому місці. На рис. 10 наведені розподіл ступеня використання ресурсу пластичності здеформованого металу та здеформована заготовка в момент відриву донної частини заготовки. У стінці на радіусі заокруглення пуансона величина $\psi = 1$, при якій наступає руйнування здеформованої заготовки (рис. 10, а) Відрив донної частини зображений на рис. 10, б.

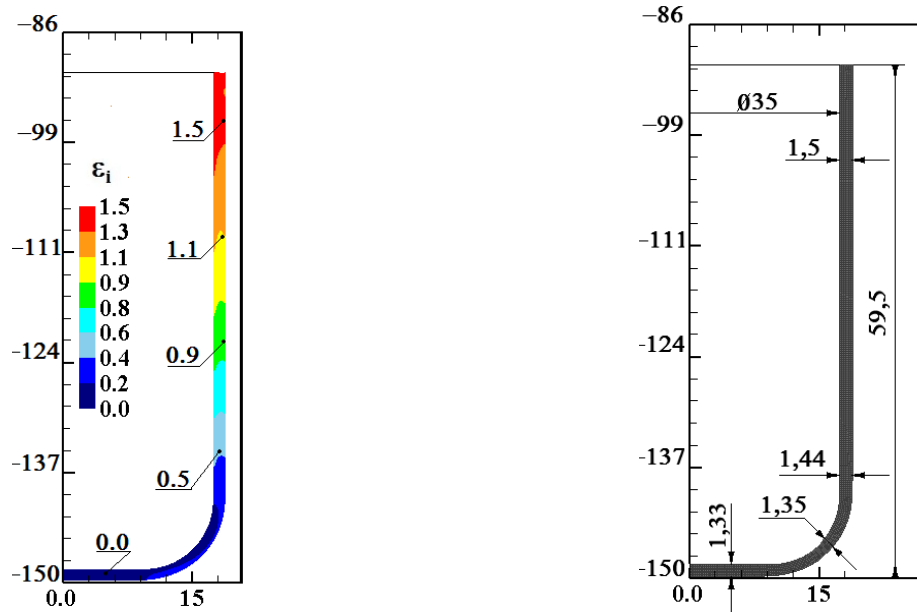


Рис. 9. Розподіл інтенсивності деформацій у здеформованому металі та кінцеві форма і розміри виробів після витягування із $\mu = 0,08$

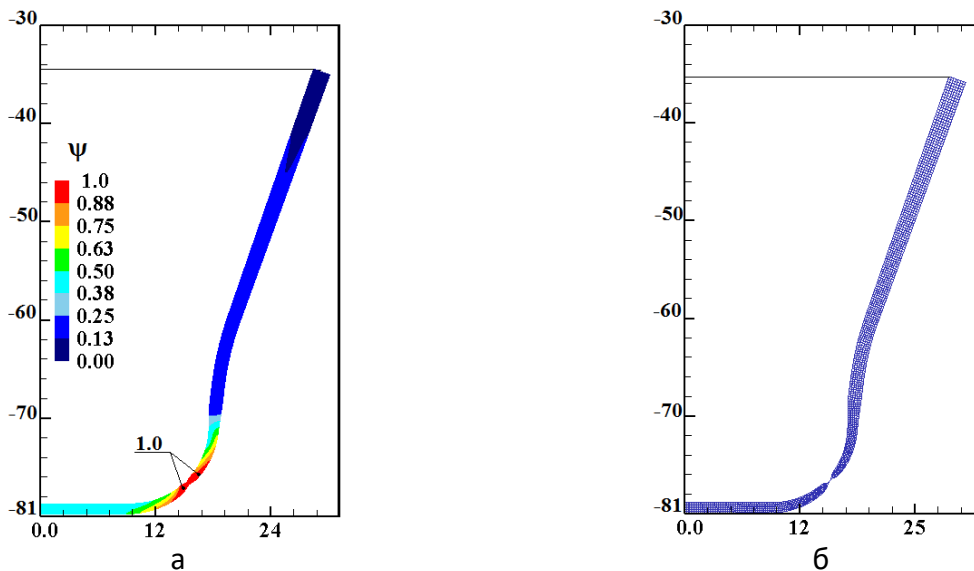


Рис. 10. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності здеформованого металу та здеформована заготовка в момент відриву донної частини заготовки:
а – розподіл ψ ; б – момент відриву донної частини

ВИСНОВКИ

З використанням методу скінченних елементів проведений аналіз комбінованого витягування листових заготовок із сталі 10 в одноконусній матриці. Для витягування з різними коефіцієнтами тертя були визначені залежності зусилля витягування та зусилля знімання від переміщення пуансона. Розрахунком визначені кінцеві форми і розміри виробів та їх напружено-деформований стан. Встановлені максимальні величини температур, що виникають у здеформованому металі при холодній формозміні комбінованим витягуванням. Встановлено, що збільшення коефіцієнта тертя приводить до росту зусилля витягування, зусилля знімання виробу і підвищення температури. При цьому також збільшуються розтягувальні напруження в стінці циліндричної частини здеформованої заготовки і в стінці на радіусі заокруглення пуансона.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ 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. 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. Запорожченко // *Збірник наукових праць. Серія галузеве машинобудування, будівництво.* – Полтава: Полт. НТУ, 2013. – Вип. 2(37). – С. 99–105.
7. Калюжний О.В. *Інтенсифікація формоутворюючих процесів холодного листового штампування* / О.В. Калюжний, В.Л. Калюжний. – К: ТОВ «Сік Груп Україна», 2015. – 292 с.
8. Калюжний О.В. *Комбіноване витягування вісесиметричних порожнистих виробів з листових заготовок із сталі AISI-316L в одноконусній матриці та матриці спеціального профілю* / О.В. Калюжний, С.С. Соколовська // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2016. – №1 (42). – С. 157–164.

REFERENCES

1. Romanovskiy V.P. *Spravochnyk po holodnoj shtampovke. 6-e yzd., pererab. y dop.* / V.P. Romanovskiy. – Lenyngr. otd-nye: Mashynostroenye, 1979. – 520 s.
2. *Kovka y shtampovka: Spravochnyk: V 4 t. T. 4. Lystovaja shtampovka* / Pod red. A.D. Matveeva; Red. sovet: E.Y. Semenov (pred.) [y dr.] – M.: Mashynostroenye, 1985–1987. – 544 s.
3. Averkjev Ju.A. *Holodnaja shtampovka* / Ju. A. Averkjev. – Yzdatel'stvo Rostovskogo unyversyteta, 1984. – 288 s.
4. Averkjev Ju.A. *Tehnologyja holodnoj shtampovky* / Ju.A. Averkjev, A.Ju. Averkjev. – M: Mashynostroenye, 1989. – 304 s.
5. Valyev S.A. *Kombynyrovannaja glubokaja vitjazhka lystovih zagotovok* / S.A.Valyev. – M: Mashynostroenye, 1973. – 176 s.
6. Kaljuzhnyj V.L. *Vyznachennja optymal'nogo kuta vhidnogo konusu dvokonusnoi' matryci dlja kombinovanogo vytjaguvannja visesymetrychnyh vyrobiv* / V.L. Kaljuzhnyj, A.S. Zaporozhchenko // *Zbirnyk naukovykh prac'. Serija galuzeve mashynobuduvannja, budivnyctvo.* – Poltava: Polt. NTU, 2013. – Vyp. 2(37). – S. 99–105.
7. Kaljuzhnyj O.V. *Intensyfikacija formoutvorjujuchyh procesiv holodnogo lystovogo shtampuvannja* / O.V. Kaljuzhnyj, V.L. Kaljuzhnyj. – K: TOV «Sik Grup Ukrai'na», 2015. – 292 s.
8. Kaljuzhnyj O.V. *Kombinovane vytjaguvannja visesymetrychnyh porozhnystyh vyrobiv z lystovyh zagoto-vok iz stali AISI-316L v odnokonusnij matryci ta matryci special'nogo profilju* / O.V. Kaljuzhnyj, S.S. Sokolov'ska // *Obrabotka materyalov davlenyem : sbornyk nauchnih trudov.* – Kramatorsk : DGMA, 2016. – №1 (42). – S. 157–164.

Калюжний В. Л. – д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПІ»

Соколовська С. С. – аспірант НТУУ «КПІ»

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

E-mail: kwl_2011@ukr.net, sss711@i.ua

Стаття надійшла до редакції 06.03.2017 г.