

УДК 621.983

Калюжний О. В.
Соколовська С. С.**КОМБІНОВАНЕ ВИТЯГУВАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ З ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК ІЗ СТАЛІ AISI-316L В ТРАДИЦІЙНІЙ ОДНОКОНУСНІЙ МАТРИЦІ ТА В 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 в радіальній матриці, рекомендації по визначенню параметрів для проектування технології, які викладені в джерелах [1–3] та базуються в основному на результатах експериментальних робіт і виробничому досвіді, потребують суттєвого удосконалення в напрямку скорочення кількості переходів штампування та підвищення точності форми і розмірів виробів. Використання комбінованого витягування в одноконусній і двохконусній матрицях дозволяє збільшити ступінь деформації за один перехід та підвищити точність виробів завдяки потоншенню стінки при формоутворенні виробів [4]. В роботі [5] 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 деформуючими поверхнями, що утворені перетином торів [6, 7]. В такій матриці зменшується площа контакту між заготовкою і матрицею та знижується вплив сил тертя на зусилля деформування при формоутворенні порожнистих виробів. В роботі [8] приведений порівняльний аналіз комбінованого витягування в традиційній двохконусній матриці і в двохконусній матриці спеціального профілю та показана ефективність використання останньої матриці. Переваги використання двохконусної матриці спеціального профілю також наведені в джерелі [9]. В теперішній час актуальними залишаються задачі розширення марок матеріалів та встановлення граничного потоншення стінки при формоутворенні вісесиметричних порожнистих виробів в традиційній одноконусній матриці та одноконусній матриці спеціального профілю.

Метою роботи є встановлення параметрів граничного формоутворення вісесиметричних порожнистих виробів із сталі AISI-316L COLD при комбінованому витягуванні в традиційній одноконусній матриці та в одноконусній матриці спеціального профілю.

Схеми комбінованого витягування порожнистих виробів в одноконусній традиційній матриці [5] та в матриці спеціального профілю [7] показані на рис. 1. На рис. 1а наведена схема витягування листової заготовки 1, яка встановлена в традиційній матриці 2 та деформується за допомогою пуансона 3. Деформуюча поверхня такої матриці утворена конусом з кутом α та відповідними радіусами заокруглення r_1 та r_2 в місцях переходу між конусною і циліндричними поверхнями. Комбіноване витягування в матриці спеціального профілю зображене на рис. 1б. Вихідна заготовка 1 підлягає формоутворенню в матриці 2 за допомогою пуансона 3. Деформуюча поверхня цієї матриці утворена перетином торів діаметром d , центри яких розташовані під кутом α з постійним кроком t .

Визначення параметрів граничного формоутворення в процесах комбінованого витягування в традиційній одноконусній матриці (ТМ) та матриці спеціального профілю (МСП) було проведене шляхом математичного моделювання за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) в програмному середовищі DEFORM. Деформуванню підлягали вихідні листові заготовки діаметром $D_z=150$ мм і товщиною $S_0=3,0$ мм із вищенаведеної сталі з умовною межею текучості $\sigma_{0,2}=300$ МПа. Розміри ТМ були вибрані згідно рекомендацій роботи [4]: $\alpha=15^\circ$, $r_1=8$ мм, $r_2=30$ мм, $h=5$ мм. Розміри МСП були такі: $d=16$ мм, $t=8$ мм, $r_1=8$ мм, $r_2=30$ мм, $\alpha=15^\circ$, $h=5$ мм. При цьому наведені розміри d і t забезпечували формоутворення без викривлення zdeформованої заготовки. Діаметр отвору матриць $D_d=62$ мм, що визначав зовнішній діаметр виробів, був однаковий для всіх варіантів витягування. Величини

діаметрів пуансонів D_p вибиралася в залежності від значення одностороннього зазору z між пуансоном та матрицею. Радіус заокруглення пуансона $r_p=15$ мм. Коефіцієнт витягування в обох матрицях складав $m = D_d / D_z = 0,41$. Граничне формоутворення при витягуванні визначали шляхом встановлення значення найменшого одностороннього зазору z між пуансоном та матрицею, який забезпечує деформування заготовки без руйнування.

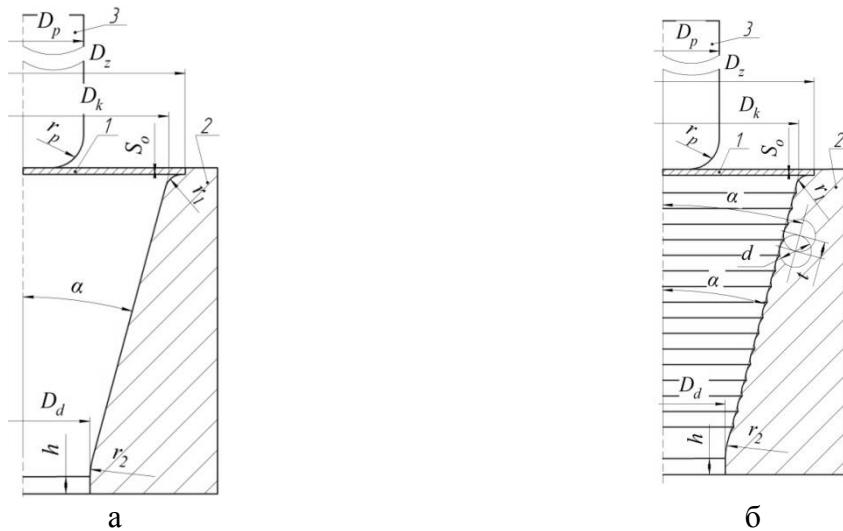


Рис. 1. Схема комбінованого витягування в одноконусній матриці:
а – в традиційній матриці, б – в матриці спеціального профілю

На рис. 2 показані результати розрахунків комбінованого витягування в ТМ з одностороннім зазором $z=2,5$ мм при якому відбувається руйнування здеформованої заготовки. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності ψ на певній стадії витягування приведений на рис. 2а. Тут і в подальшому тонкими лініями зображені пуансон і частина матриці. У зовнішніх шарах стінки здеформованої заготовки на радіусі заокруглення пуансону ресурс пластичності досягає значення $\psi=1$. При такому значенні ψ починається руйнування металу. Подальше деформування приводить до суттєвого потоншення стінки у цьому місці (рис. 2б) та відриву донньої частини. Загальний вигляд здеформованої заготовки в розрізі в момент відриву донньої частини зображений на рис. 2в.

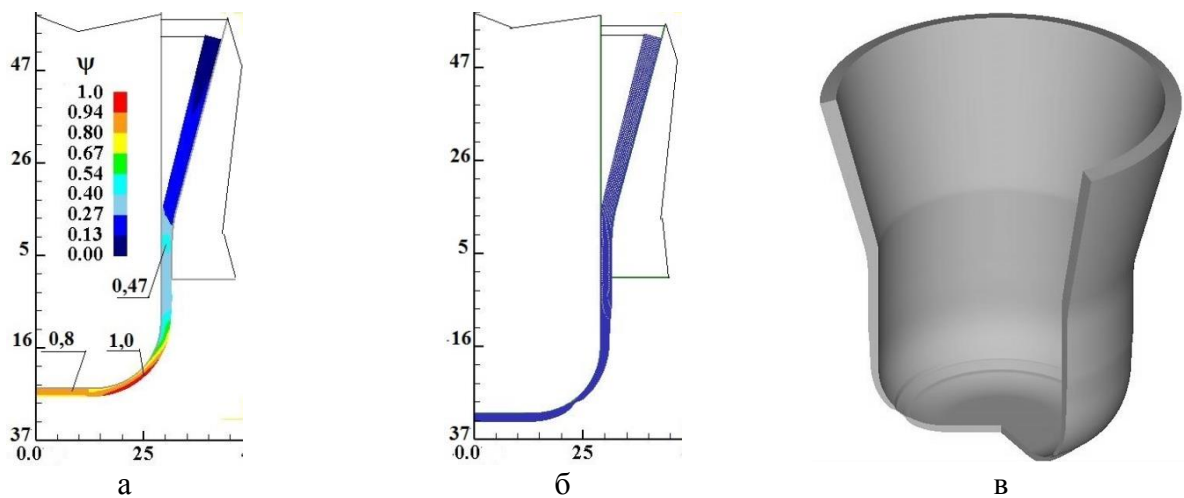


Рис. 2. Результати розрахунків витягування в ТМ з одностороннім зазором $z=2,5$ мм, при якому відбувається руйнування здеформованої заготовки:

а – розподіл ресурсу пластичності ψ ; б – суттєве потоншення стінки на радіусі заокруглення пуансона; в – загальний вигляд в розрізі здеформованої заготовки в момент руйнування. Розміри по всіх координат в міліметрах

Моделюванням було встановлено, що найменші зазори, які забезпечують формоутворення виробів без руйнування в ТМ і МСП, відповідно склали $z=3,0$ мм і $z=2,5$ мм. На рис. 3 показані залежності зусилля витягування від переміщення пуансонів при різних величинах зазору z між пуансоном та матрицею. Зі зменшенням величини зазору зусилля витягування зростає по причині збільшення ступеня деформації при потоншенні стінки. Такі залежності для витягування в ТМ приведені на рис. 3а. При витягуванні із $z=3,3$ мм графік має три максимуми. Перший максимум (62 кН) має місце по завершенні згинання заготовки на радіусі r_1 матриці при переміщенні пуансона 32 мм. Далі зусилля дещо зменшується до переміщення пуансона 42 мм. Другий максимум (330 кН) спостерігається при переміщенні пуансона 165 мм, при якому радіус заокруглення пуансона зі здеформованою заготовкою виходить із калібруючого пояса матриці, що має висоту h . Після цього зусилля знову не набагато зменшується до переміщення пуансона 180 мм. Третій максимум (372 кН) виникає на стадії завершення деформування торця заготовки по конусній поверхні матриці і досягнення торцем початку радіуса заокруглення матриці r_2 . При цьому товщина торця збільшується до 4,5 мм, а переміщення пуансона складає 213 мм. Після цього зусилля витягування починає інтенсивно знижуватися. Зменшення зазору до величини $z=3,0$ мм приводить до збільшення зусилля витягування на етапі заходження торця здеформованої заготовки в зазор між пуансоном та матрицею. Графік має тільки два максимуми. Зусилля досягає найбільшої величини 412 кН також в момент досягнення торцем здеформованої заготовки початку радіуса заокруглення матриці r_2 .

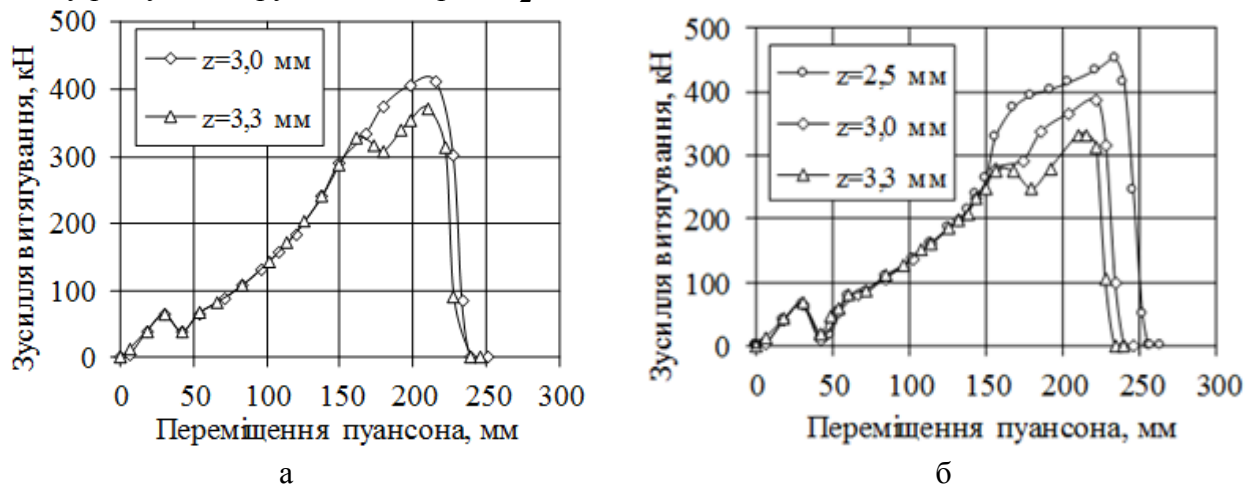


Рис. 3. Залежності зусилля витягування від переміщення пуансонів для деформування заготовок при різних односторонніх зазорах z між пуансоном та матрицею: а – для витягування в ТМ; б – для витягування в МСП

Залежності зусилля витягування від переміщення пуансонів для витягування в МСП зображені на рис. 3б. Графіки мають аналогічні вигляди з витягуванням в ТМ із однаковими зазорами. При формоутворенні в МСП із $z=3,3$ мм перший максимум зусилля також спостерігається по завершенні згинання заготовки на радіусі r_1 матриці, а далі має місце часткове більш інтенсивне зменшення зусилля до переміщення пуансона 42 мм в порівнянні з витягуванням в ТМ. Другий максимум зусилля (270 кН) отриманий при переміщенні пуансона 165 мм, що на 60 кН менше в порівнянні з витягуванням в ТМ. Третій максимум зусилля деформування складає 332 кН на стадії витягування, коли потовщений торець здеформованої заготовки торкається бокової поверхні пуансона. Знову отримано зниження зусилля з відповідним графіком для ТМ на 40 кН. Таким чином, використання МСП приводить до зменшення зусилля деформування в порівнянні з ТМ при витягуванні з однаковими величинами зазорів. Чим більша величина зазору, тим інтенсивніше зменшується зусилля витягування. При формоутворенні із зазором $z=3,0$ мм найбільша величина зусилля деформування

в МСП менша на 6,5 % в порівнянні з витягуванням в ТМ. Зменшення зусилля на 12 % отримано при витягуванні з $z=3,3$ мм. Зниження зусилля дало можливість виконати витягування в МСП із одностороннім зазором $z=2,5$ мм.

Розрахунковим шляхом визначені кінцеві форми і розміри виробів. На рис. 4 зображені форми та розміри в міліметрах здеформованих заготовок, які отримані витягуванням в МСП із різним одностороннім зазором z між пуансоном та матрицею. Для розглянутих випадків витягування має місце потоншення стінок здеформованих заготовок на радіусі заокруглення пуансона та на плоскій частині пуансону. Чим менший зазор z , тим більша висота здеформованої заготовки. Після витягування з $z=2,5$ мм висота виробу складає 112 мм. При цьому отримані товщини стінок на радіусі заокруглення пуансона та донній частині відповідно 2,2 та 2,3 мм. Формоутворення із зазором $z=3,0$ мм приводить до зменшення висоти виробу до 95 мм та невеликого збільшення товщини стінок на радіусі заокруглення пуансона (2,4 мм) та у донній частині (2,5 мм). Циліндрична частина заготовки по всій висоті має товщину 3 мм. Після витягування із зазором $z=3,3$ мм отримана висота виробу 90 мм та товщини 2,5 і 2,6 мм у донній частині. Збільшення величини зазору приводить до зменшення потоншення донної частини заготовок, що пов'язано зі зниженням зусилля витягування.

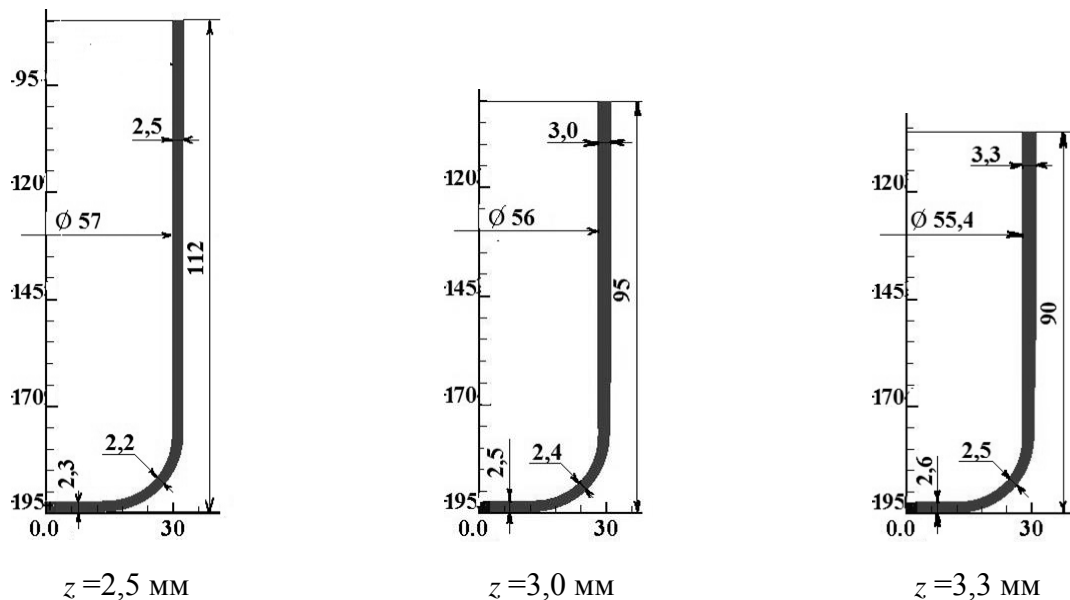


Рис. 4. Форма та розміри в міліметрах здеформованих заготовок, які отримані витягуванням в МСП із різним одностороннім зазором z

Зменшення зусилля деформування при використанні МСП приводить до зміни напруженого стану у здеформованій заготовці. Розподіли осьових σ_z , радіальних σ_r та тангенціальних σ_θ напружень, що отримані у здеформованих заготовках при найбільших значеннях зусилля деформування для витягування в ТМ і МСП із одностороннім зазором $z=3,0$ мм, приведені на рис. 5. Види розподілів для відповідних напружень практично однакові, але величини напружень суттєво відрізняються. Найбільший інтерес мають розподіли осьових напружень σ_z , які в основному являються причиною виникнення потоншення стінки на радіусі заокруглення пуансона та відриву донної частини заготовки (див. рис. 2). При витягуванні в ТМ у стінці циліндричної частини здеформованої заготовки виникають розтягувальні осьові напруження в межах $\sigma_z=460\div580$ МПа (рис. 5а), а при витягуванні в МСП у вказаному місці заготовки осьові напруження досягають значень $\sigma_z=430\div510$ МПа (рис. 5г). Середня величина цих напружень зменшується з 540 МПа до 480 МПа. У стінці на радіусі заокруглення пуансона також має місце зменшення осьових розтягувальних напружень з $\sigma_z=300$ МПа при витягуванні в ТМ до $\sigma_z=250$ МПа при формоутворенні в МСП.

Для обох випадків витягування у циліндричних та донних частинах здеформованих заготовок виникають розтягувальні радіальні напруження σ_r . При витягуванні в ТМ середні значення напружень σ_r у вказаних місцях складають відповідно $\sigma_r=50$ МПа і $\sigma_r=600$ МПа (рис. 5б). При формоутворенні в МСП отримано у цих місцях дещо менші величини – $\sigma_r=24$ МПа і $\sigma_r=500$ МПа (рис. 5д). В осередку деформації заготовок, який знаходиться в зоні торця здеформованої заготовки, виникають стискаючі радіальні напруження величиною $\sigma_r=-1100$ МПа при витягуванні в ТМ та $\sigma_r=-1000$ МПа при витягуванні в МСП. Аналогічні значення в осередку деформації мають стискаючі тангенціальні напруження σ_θ для двох варіантів витягування (рис. 5в і рис. 5е). Зменшення по абсолютній величині цих напружень при витягуванні приводить до зниження вірогідності гофрування на здеформованій заготовці. У циліндричних та донних частинах здеформованих заготовок при витягуванні в обох матрицях виникають розтягувальні напруження σ_θ , при цьому величини напружень σ_θ при формоутворенні в МСП зменшуються в середньому на 100 МПа.

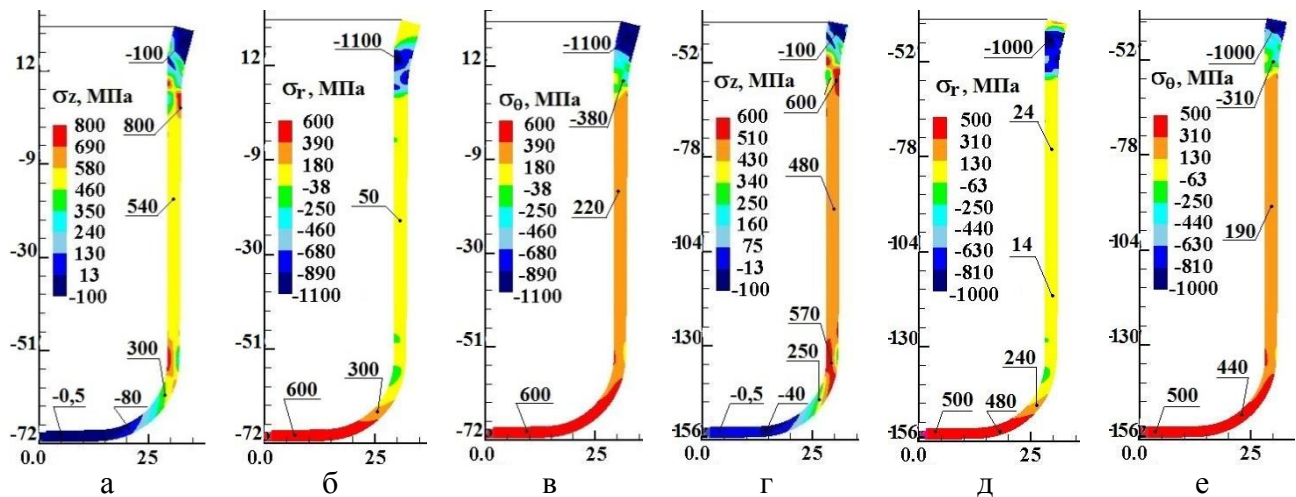


Рис. 5. Розподіли осьових σ_z , радіальних σ_r та тангенціальних σ_θ напружень в здеформованих заготовках при максимальному зусиллі витягування із одностороннім зазором $z=3,0$ мм:

а, б і в – для витягування в ТМ; г, д і е – для витягуванні в МСП. Розміри по вісях координат в міліметрах

Скінченно-елементний аналіз холодного формоутворення виробів у середовищі DEFORM дозволяє визначити температуру, яка виникає у здеформованому металі. Стосовно процесів комбінованого витягування встановлення температури дозволить уточнити вимоги до змащення, яке використовується для зменшення тертя на контактуючих поверхнях. Моделюванням встановлено, що максимальні температури у області торців здеформованих заготовці виникають на стадії досягнення найбільшого значення зусилля витягування з подальшим зменшенням температури до осередку деформації між пуансоном і матрицею. На рис. 6 показані розподіли температури у здеформованих заготовках при комбінованому витягуванні в МСП із різною величиною зазору z в момент виникнення найбільших температур. Для витягуванні із зазором $z=2,5$ мм максимальна температура 148° виникає при переміщенні пуансона 210 мм і зусиллі деформування 400 кН. Збільшення величини зазору до $z=3,0$ мм приводить до отримання найбільшого значення температури 156° при переміщенні пуансона 196 мм. Для витягування із $z=3,3$ мм переміщення пуансона складає 202 мм і температура 160° .

Пропрацювання структури металу пластичною деформацією у здеформованих заготовках після комбінованого витягування можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ε_i . Розподіли ε_i після формоутворення в МСП із різною величиною зазору z наведені на рис. 7.

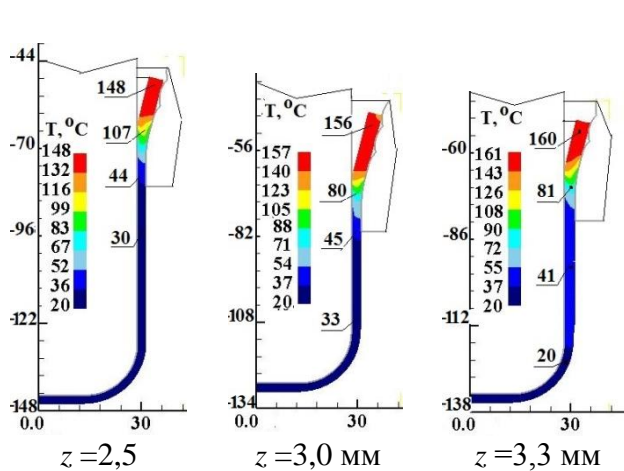


Рис. 6. Розподіли температури, в здеформованих заготовках, які отримані витягуванням в МСП із різним одностороннім зазором z

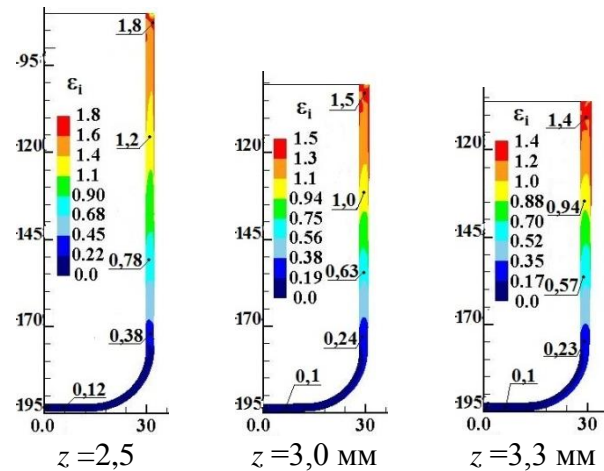


Рис. 7. Розподіли інтенсивності деформацій ε_i в здеформованих заготовках, які отримані витягуванням в МСП із різним одностороннім зазором z

Для розглянутих зазорів в донних частинах здеформованих заготовок від вісі симетрії до місця переходу в циліндричну частину заготовки величини вказаних деформацій знаходяться в межах від $\varepsilon_i=0,1\dots0,2$. до $\varepsilon_i=0,35$. В стінках циліндричних частин здеформованих заготовок величини ε_i зростають від місця переходу циліндричних частин в донну до торців заготовок. При цьому збільшення величини зазору приводить до зменшення досягнутих значень інтенсивностей деформацій ε_i . Після витягування із зазором $z = 2,5$ мм в місці переходу циліндричної частини в донну отримано $\varepsilon_i=0,38$ з подальшим збільшенням до $\varepsilon_i=1,8$ в зоні торця здеформованої заготовки. Формоутворення із зазором $z = 3,3$ мм приводить до виникнення інтенсивності деформацій у вказаних місцях величиною відповідно $\varepsilon_i=0,23$ та $\varepsilon_i=1,4$. Отримані величини інтенсивності деформацій дають можливість з використанням діаграми істинних напружень прогнозувати механічні властивості здеформованого металу.

ВИСНОВКИ

З використанням методу скінченних елементів проведено комп'ютерне моделювання комбінованого витягування листових заготовок із нержавіючої сталі AISI-316L COLD в традиційній одноконусній матриці та в одноконусній матриці спеціального профілю, який утворений перетином торів та зменшує площу контакту здеформованої заготовки з матрицею. Встановлені величини мінімальних односторонніх зазорів між матрицею і пуансоном, при яких комбіноване витягування у таких матрицях проходить без руйнування. Для витягування з різними зазорами виявлені залежності зусилля витягування від переміщення пуансонів. Використання матриці спеціального профілю приводить до зниження зусилля деформування, осевих розтягувальних напружень в небезпечному перерізі заготовки та зменшення величини одностороннього зазору, при якому витягування відбувається без руйнування. Розрахунком визначені кінцеві форми і розміри отриманих виробів та розподіли інтенсивності деформацій. Встановлені максимальні величини температур, що виникають у здеформованому металі при холодній формозміні комбінованим витягуванням, що дозволить уточнити вимоги до змащення для витягування.

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. *Технология холодной штамповки / Ю.А. Аверкиев., А.Ю. Аверкиев. - М: Машиностроение, 1989. – 304 с.*
4. Валиев С.А. *Комбинированная глубокая вытяжка листовых заготовок / С.А. Валиев. – М: Машиностроение, 1973. – 176 с.*
5. Калюжний В.Л. *Визначення оптимального кута входного конусу двоконусної матриці для комбінованого витягування вісесиметричних виробів / В.Л. Калюжний, А.С. Запорожченко // Збірник наукових праць. Серія галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: НТУ, 2013. – №2(37). – С. 99–105.*
6. Калюжний О.В. *Зменшення кількості переходів витягування вісесиметричних виробів з використанням матриці спеціального профілю / О.В. Калюжний // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорськ: ДГМА, 2013. – №4(37). – С. 93–97.*
7. 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: НТУ «ХПІ», 2013. – № 42. – С. 126–131.*
8. Калюжний О.В. *Порівняльний аналіз ефективності процесу комбінованого витягування в двоконусній матриці та матриці спеціального профілю / О.В. Калюжний // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорськ: ДГМА, 2014. – № 1(38). – С. 32–37.*
9. Калюжний О.В. *Інтенсифікація формоутворюючих процесів холодного листового штампування / О.В. Калюжний, В.Л. Калюжний. – К.: ТОВ «Сік Груп Україна». – 292 с.*

REFERENCES

1. Romanovskij V. P. *Spravochnik po holodnoj shtampovke. 6-e izd., pererab. i dop.* / V. P. Romanovskij. – Leningr. otd-nie: Mashinostroenie. 1979. – 520 s.
2. *Kovka i shtampovka: Spravochnik: V 4 t. T. 4. Listovaja shtampovka / Pod red. A.D. Matveeva; Red. sovet: E.I. Semenov (pred.) i dr. – M.: Mashinostroenie, 1985–1987. – 544 s.*
3. Averkiev Ju.A. *Tehnologija holodnoj shtampovki / Ju.A. Averkiev., A.Ju. Averkiev. - M: Mashinostroenie, 1989. – 304 s.*
4. Valiev S.A. *Kombinirovannaja glubokaja vytjazhka listovyh zagotovok / S.A. Valiev. – M: Mashinostroenie, 1973. – 176 s.*
5. Kaljuzhnij V.L. *Vznachennja optimal'nogo kuta vhidnogo konusu dvokonusnoj matrici dlja kombinovanogo vitjaguvannja visesimetrichnih virobiv / V.L. Kaljuzhnij, A.S. Zaporozhchenko // Zbirnik naukovih prac'. Serija galuzeve mashinobuduвання, budivnictvo. – Poltava: NTU, 2013. – №2(37). – S. 99–105.*
6. Kaljuzhnij O.V. *Zmshennja kil'kosti perehodiv vitjaguvannja visesimetrichnih virobiv z vikoristannjam matrici special'nogo profilju / O.V. Kaljuzhnij // Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. trudov. – Kramators'k: DGMA, 2013. – №4(37). – S. 93–97.*
7. Kaljuzhnij O.V. *Zmshennja zusillja ta pidvishhennja produktivnosti formoutvorennja pri kombinovanomu vitjaguvanni visesimetrichnih virobiv / O.V. Kaljuzhnij // Visnik NTU «HPI». Serija «Novi rishennja v su-chasnih tehnologijah». – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – № 42. – S. 126–131.*
8. Kaljuzhnij O.V. *Porivnjal'nij analiz effektivnosti procesu kombinovanogo vitjaguvannja v dvokonusnij matrici ta matrici special'nogo profilju / O.V. Kaljuzhnij // Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. trudov. – Kramators'k: DGMA, 2014. – № 1(38). – S. 32–37.*
9. Kaljuzhnij O.V. *Intensifikacija formoutvorjujuchih procesiv holodnogo listovogo shtampuvannja / O.V. Kaljuzhnij, V.L. Kaljuzhnij. – K.: TOV «Sik Grup Ukraina». – 292 s.*

Калюжний О. В. – канд. техн. наук, доц. каф. ДіММтаОМ НТУУ «КПІ»

Соколовська С. С. – аспірант каф. МПМтаРП НТУУ «КПІ»

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

E-mail: Av-k@ukr.net

Стаття надійшла до редакції 21.03.2016 р.