

УДК 621. 983

Калюжний О. В.

ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОГО ЗУСИЛЛЯ ДЕФОРМУВАННЯ ТА ПОТОВЩЕННЯ ФЛАНЦЯ ПРИ ВИТЯГУВАННІ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ РАДІАЛЬНИМ ПІДПОРОМ ФЛАНЦЯ ЗАГОТОВКИ

Одним із методів інтенсифікації процесів холодного витягування виробів з листових заготовок є витягування з радіальним підпором фланця заготовки рідиною, яка знаходиться під високим тиском. Це дозволяє зменшити величини розтягуючих радіальних напружень в небезпечному перерізі заготовки, що приводить до суттєвого збільшення висоти виробу, яку можна отримати за один перехід. Однак існуючі конструкції штампового оснащення і пристроїв для витягування з постійним радіальним підпором фланця складні конструктивно [1–3], а також неможливо забезпечити витягування виробів з заготовок великого діаметру. Тиск рідини постійної величини в них створюється за допомогою додаткових приводів і пристроїв, що збільшує енергоємність витягування та собівартість виробів. Тому витягування з постійним радіальним підпором фланця не знайшло широкого розповсюдження на виробництві. В роботі [4] запропоновані конструкції установок для витягування з диференційованим підпором фланця. Конструктивно вони простіші від попередніх, однак використовувати їх для глибокого витягування виробів з заготовок великого діаметру також практично неможливо. Також у вказаній роботі наведений теоретичний аналіз витягування з використанням диференційних рівнянь рівноваги з наближеною умовою пластичності. Однак, отримані аналітичні залежності не враховують зміцнення металу, що деформується, і потовщення фланця при витягуванні.

На кафедрах НТУУ «КПІ» при участі автора проводяться роботи по розробці конструкцій штампового оснащення і дослідженню процесів листового штампування вісесиметричних деталей в умовах прикладання диференційованого тиску рідини на заготовку. Зокрема, розроблені нові способи обтиску з дією тиску на внутрішню поверхню заготовки та витягування з радіальним підпором фланця [5–7]. Величина тиску рідини, який створюється без додаткових приводів і пристроїв за рахунок зусилля деформування, змінюється пропорційно вказаному зусиллю.

В літературних джерелах [1–4] недостатньо даних по впливу величини радіального підпору на максимальне зусилля витягування та на величини розтягувальних напружень в стінці виробу і у фланці заготовки при витягуванні з урахуванням зміцнення здеформованого металу та потовщення фланця.

Метою роботи є розроблення інженерним методом математичної моделі процесу витягування з диференційованим радіальним підпором фланця заготовки і отримання аналітичних залежностей для визначення напружено-деформованого стану фланця і максимального зусилля витягування.

Розрахункова схема витягування для аналізу інженерним методом наведена на рис. 1. В силу симетрії представлена половина заготовки 6 на проміжній стадії витягування пуансоном 1 через матрицю 4 з притискачем 2. При витягуванні від зусилля P_0 в порожнині, що утворена матрицею 4 обоймою 3 і контейнером 4 в робочій рідині виникає тиск q , який діє на фланець заготовки 6. Під дією пуансону 1 у стінці витягнутої частини заготовки створюються розтягувальні напруження σ_z , а у фланці виникають розтягувальні напруження σ_r і стискаючі σ_θ . Одночасно на торець фланця діє диференційований радіальний підпір величиною q .

Вважаємо, що величина q несуттєво впливає на напружений стан фланця заготовки, тому схема напружень плоска.

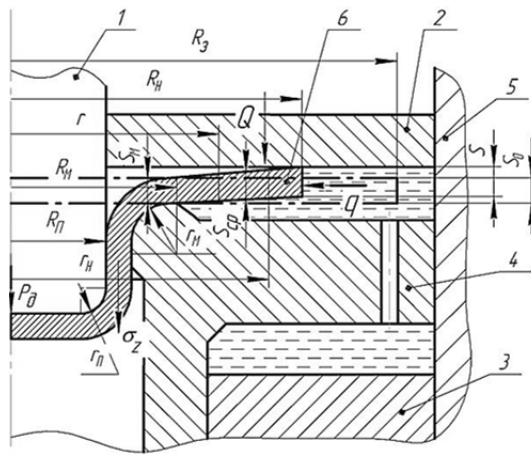


Рис. 1. Розрахункова схема витягування з підпором фланця заготовки для аналізу інженерним методом:

1 – пуансон; 2 – притискач; 3 – опора; 4 – матриця; 5 – контейнер; 6 – матриця

Допущення, які прийняті при рішенні: метал заготовки жорстко-пластичний; товщина стінки S мала в порівнянні з діаметром, і зміною напружень по товщині нехтуємо, тертя має місце на поверхні матриці і потовщеною частиною фланця та притискачем.

Якщо записати суму проєкцій сил, які виникають від діючих напружень у фланці заготовки в елементарному об'ємі з урахуванням зміни товщини, на вісь r та після нехтування величинами другого порядку малості і проведення перетворень можна отримати наступне рівняння рівноваги [8]:

$$\frac{d(s\sigma_r)}{dr} = -\frac{s}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta). \quad (1)$$

Умову пластичності можна записати у вигляді [8]:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \beta\sigma_s, \quad (2)$$

де $\beta = 1,1$ коефіцієнт, який забезпечує кращу відповідність умовам пластичності Мізеса і Треска.

Тоді з (1), якщо вважати зміну товщини фланцю незначною (s – постійна величина) і з урахуванням (2), отримуємо:

$$d\sigma_r = -\beta\sigma_s \frac{dr}{r}. \quad (3)$$

Після інтегрування (3) і знаходження довільної постійної з граничної умови, що при $r = R_H$ на торці фланця заготовки діє стискаюче напруження q маємо:

$$\sigma_r = \beta\sigma_s \left(\ln \frac{R_H}{r} - \frac{q}{\beta\sigma_s} \right). \quad (4)$$

З умови пластичності (2) можна знайти напруження σ_θ :

$$\sigma_\theta = \beta\sigma_s \left(\ln \frac{R_H}{r} - \frac{q}{\beta\sigma_s} - 1 \right). \quad (5)$$

Для визначення потовщення фланця при витягуванні запишемо для жорстко-пластичного стану металу співвідношення Леві-Мізеса між приростами деформацій в напрямі товщини фланця ds і тангенційними $d\varepsilon_\theta$ та напруженнями в відповідних напрямках [8]:

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta} = \frac{ds/s}{dr/r} = \frac{\sigma_z - \sigma_{cp}}{\sigma_\theta - \sigma_{cp}}, \quad (6)$$

де $\sigma_{cp} = (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) / 3$ – гідростатичний тиск.

Вважаємо, що напруження σ_z суттєво мале в порівнянні з σ_r і σ_θ і дорівнює нулю. Тоді вираз (6) має вигляд:

$$\frac{ds/s}{dr/r} = -\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2\sigma_\theta - \sigma_r}. \quad (7)$$

Тоді (7) з урахуванням формули для напруження σ_r (4) має вигляд:

$$\frac{ds}{s} = -\left(2 + \frac{3}{\ln \frac{R_H}{r} - \frac{q}{\beta\sigma_s} - 2}\right) \frac{dr}{r}. \quad (8)$$

Після інтегрування (8) і визначення довільної постійної з граничної умови, що при $r = R_{II}$ товщина фланця $s = s_0$ знаходимо:

$$\ln \frac{s}{s_0} = 2 \ln \frac{R_{II}}{r} + 3 \ln \frac{\ln \frac{R_H}{r} - \frac{q}{\beta\sigma_s} - 2}{\ln \frac{R_H}{R_{II}} - \frac{q}{\beta\sigma_s} - 2}. \quad (9)$$

Для спрощення можна замінити в формулі (9) логарифми першими членами, які отримані розкладенням в ряд (типу $\ln x = x - 1$):

$$s = s_0 \left[\frac{2R_{II}}{r} - 1 + \frac{3 \left(\frac{R_{II}}{r} - 1 \right)}{\frac{R_H}{R_{II}} - \frac{q}{\beta\sigma_s} - 3} \right]. \quad (10)$$

Тепер вирішимо цю задачу з урахуванням зміцнення здеформованого металу.

Згідно рекомендації Є. О. Попова [9] для витягування у відомій ступеневій апроксимації діаграми істинних напружень другого роду, що має вигляд:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_\sigma}{1 - \psi_{ш}} \left(\frac{\psi}{\psi_{ш}} \right)^{1 - \psi_{ш}}, \quad (11)$$

приймаємо у якості деформації, яка визначає істинне напруження – тангенційну деформацію стиску ε_θ .

Де σ_σ – межа міцності; ψ – відносне потоншення; $\psi_{ш}$ – відносне потоншення, яке відповідає моменту утворення шийки на зразку при випробуванні на розтяг. В якості деформації ψ , беремо деформацію ε_θ із (11).

Для встановлення впливу зміцнення на напруження σ_r у фланці заготовки встановимо залежність деформації ε_θ від координати r . Оскільки зусилля витягування P_θ з диференційованим підпором фланця, а значить і напруження σ_r , досягають максимального значення

на початку витягування, то для наближеної оцінки впливу зміцнення на істинне напруження використовуємо підхід Є. О. Попова [9] для аналізу витягування і визначимо значення деформації ε_θ на краю заготовки:

$$\varepsilon_\theta = \frac{R_3 - R_H}{R_3} = \frac{\Delta R}{R_3} = x. \quad (12)$$

Врахуємо в рішенні також тертя, яке виникає між фланцем заготовки і притискачем (див. рис. 1). Сила притискання Q , яка виникає від дії тиску рідини q , дорівнює:

$$Q = \pi (R_H^2 - R_M^2) q. \quad (13)$$

Тоді частину напруження в радіальному напрямку σ_r^T , яка виникає від сили тертя по притискачу, з урахуванням, що фланець потовщується і контактує торцем товщиною s з притискачем, можна знайти по формулі:

$$\sigma_r^T = \frac{\mu Q}{2\pi R_H s} = \frac{\mu (R_H^2 - R_M^2) q}{2R_H s}, \quad (14)$$

де μ – коефіцієнт тертя.

Після підстановки значення x в (12), а (12) в (3) отримуємо:

$$d\sigma_r = -\beta \frac{\sigma_\theta}{1 - \psi_{\text{ш}}} \left(\frac{x}{\psi_{\text{ш}}} \right)^{\frac{\psi}{1 - \psi_{\text{ш}}}} \frac{dr}{r}. \quad (15)$$

Після інтегрування, визначення довільної постійної з граничної умови, що на торці фланця заготовки (при $r = R_H$) напруження $\sigma_\rho = \sigma_r^T - p$ та проведення перетворень, знаходимо:

$$\sigma_r = \beta \frac{\sigma_\theta}{1 - \psi_{\text{ш}}} \left(\frac{x}{\psi_{\text{ш}}} \right)^{\frac{\psi}{1 - \psi_{\text{ш}}}} \ln \frac{R_H}{r} + \sigma_r^T - p. \quad (16)$$

Максимальне значення розтягувального напруження σ_r у фланці по формулі (16) виникає при $r = R_M$:

$$\sigma_r = \beta \frac{\sigma_\theta}{1 - \psi_{\text{ш}}} \left(\frac{x}{\psi_{\text{ш}}} \right)^{\frac{\psi}{1 - \psi_{\text{ш}}}} \ln \frac{R_H}{R_M} + \sigma_r^T - p. \quad (17)$$

В джерелі [9] показано, що можна зробити заміну:

$$\ln \frac{R_H}{R_M} = \ln \frac{R_3}{R_M} - x. \quad (18)$$

Тоді формула (17) має вигляд:

$$\sigma_r = \beta \frac{\sigma_\theta}{1 - \psi_{\text{ш}}} \left(\frac{x}{\psi_{\text{ш}}} \right)^{\frac{\psi}{1 - \psi_{\text{ш}}}} \left(\ln \frac{R_3}{R_M} - x \right) + \sigma_r^T - p. \quad (19)$$

Знайдемо значення x , яке забезпечує максимальне значення напруженню σ_r в рівнянні (19). Для цього знаходимо похідну $\frac{\partial \sigma_r}{\partial x} = 0$ та знаходимо:

$$x = \psi_{\text{ш}} \ln \frac{R_3}{R_M}. \quad (20)$$

Значення x , яке визначається по формулі (21) забезпечує максимальну величину напруження σ_r^{max} у фланці заготовки при витягуванні з диференційованим підпором фланця, що в свою чергу приводить до виникнення максимального значення зусилля витягування. Підставляємо значення x з (19) в (20) та з урахуванням виразу (14) отримуємо вираз для знаходження σ_r^{max} :

$$\sigma_r^{\text{max}} = \beta \sigma_{\text{в}} \left(\ln \frac{R_3}{R_M} \right)^{\frac{1}{1-\psi_{\text{ш}}}} + \frac{\mu (R_H^2 - R_M^2) q}{2R_H s} - q. \quad (21)$$

Крім того, з використанням формул (11) і (20) можна знайти величину радіусу R_H , при якому має місце максимальне зусилля витягування:

$$R_H = R_3 \left(1 - \psi_{\text{ш}} \ln \frac{R_3}{R_M} \right). \quad (22)$$

Якщо відоме напруження σ_r^{max} і товщина фланця s_M на радіусі R_M , то можна визначити максимальне розтягувальне напруження σ_z^{max} в стінці виробу при витягуванні, а також максимальне значення зусилля витягування P_0^{max} по наступному рівнянню:

$$P_0^{\text{max}} = 2\pi R_{\text{II}} s_o \sigma_z^{\text{max}} = 2\pi R_M s_M \sigma_r^{\text{max}}. \quad (23)$$

Звідки максимальне напруження σ_z в стінці виробу дорівнює:

$$\sigma_z^{\text{max}} = \frac{R_M s_M}{R_{\text{II}} s_o} \sigma_r^{\text{max}}. \quad (24)$$

При визначенні напруження σ_z^{max} в стінці виробу по (24) не враховане тертя на радіусі заокруглення матриці та згин і випрямлення заготовки на матриці при витягуванні. Згин та випрямлення по Попову Є. О. [9] можна врахувати додатковою складовою $\Delta\sigma$, яка збільшує напруження σ_z^{max} :

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{\text{в}} s_o}{2r_M + s_o}. \quad (25)$$

Тертя на радіусі заокруглення матриці по Попову Є. О. [9] враховується множником $(1+1,6\mu)$. Тоді напруження σ_r^{max} дорівнює:

$$\sigma_z^{\text{max}} = \left(\frac{R_M s_M}{R_{\text{II}} s_o} \sigma_r^{\text{max}} + \Delta\sigma \right) (1+1,6\mu) = \left(\frac{R_M s_M}{R_{\text{II}} s_o} \sigma_r^{\text{max}} + \frac{\sigma_{\text{в}} s_o}{2r_M + s_o} \right) (1+1,6\mu). \quad (26)$$

Тоді максимальне значення зусилля витягування з диференційованим підпором фланця можна визначити по формулі (23) з урахуванням виразу (26):

$$P_{\partial}^{\max} = 6,28\sigma_{\epsilon} \left\{ R_M s_M \left[\beta \left(\ln \frac{R_3}{R_M} \right)^{1-\psi_{\text{ш}}} + \frac{\mu(R_H^2 - R_M^2)q}{2R_H s \sigma_{\epsilon}} - \frac{q}{\sigma_{\epsilon}} \right] + \frac{R_{II} s_0^2}{2r_M + s_0} \right\} (1+1,6\mu)$$

Товщину фланця s_M можна визначити по формулі (10), якщо замість радіусу r підставити R_M , а замість R_H підставити значення R_H із виразу (22). Аналогічно визначаємо товщину фланця s на радіусі R_H по формулі (11), якщо замість радіусів r і R_H підставити величину R_H із виразу (22):

$$s_M = s_0 \left[\frac{2R_{II}}{R_M} - 1 + \frac{3 \left(\frac{R_{II}}{R_M} - 1 \right)}{\frac{R_3}{R_{II}} \left(1 - \psi_{\text{ш}} \ln \frac{R_3}{R_M} \right) - \frac{q}{\beta \sigma_s} - 3} \right]. \quad (27)$$

$$s = s_0 \left[\frac{2R_{II}}{R_3 \left(1 - \psi_{\text{ш}} \ln \frac{R_3}{R_M} \right)} - 1 + \frac{\frac{3R_{II}}{R_3 \left(1 - \psi_{\text{ш}} \ln \frac{R_3}{R_M} \right)} - 3}{\frac{R_3}{R_{II}} \left(1 - \psi_{\text{ш}} \ln \frac{R_3}{R_M} \right) - \frac{q}{\beta \sigma_s} - 3} \right]. \quad (28)$$

Для перевірки адекватності рішення інженерним методом (ІМ) був проведений чисельний експеримент методом скінчених елементів (МСЕ) з використанням програми Deform. Витягуванню з диференційованим підпором 50 МПа при максимальному зусиллі деформування підлягала заготовка діаметром 95 міліметрів (мм) і товщиною 2 мм із маловуглецевої сталі. Діаметр пуансону 46 мм, зазор між матрицею і притискачем та односторонній зазор між пуансоном і матрицею 2,5 мм. Радіуси заокруглення пуансону і матриці відповідно 8 і 12 мм. На рис. 2 зображені zdeформовані заготовки в розрізі при максимальному зусиллі витягування і в кінці витягування. Залежність зусилля витягування від переміщення пуансону, яка отримана МСЕ приведена на рис. 3. Максимальне значення зусилля складає 100 кН. Тут також приведене значення, яке отримано по формулі для P_{∂}^{\max} (110 кН). На рис. 4 показані розміри zdeформованої заготовки, які отримані МСЕ при максимальному значенні зусилля витягування. Радіус $R_H = 39,88$ мм, товщина $s = 2,16$ мм. Величини R_H і s , що розраховані по виразах (22) і (28) відповідно склали – 39,79 і 2,14 мм.



Рис. 2. Здеформовані заготовки в розрізі при максимальному зусиллі витягування (а) та в кінці витягування (б)

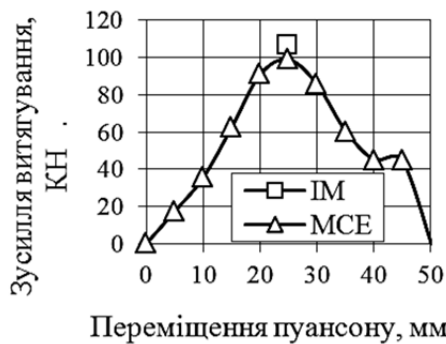


Рис. 3. Залежність зусилля витягування від переміщення пуансону

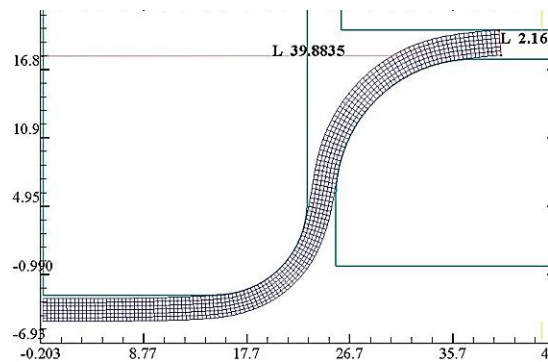


Рис. 4. Розміри здеформованої заготовки при максимальному зусиллі витягування, які отримані МСЕ (значення по осям координат в міліметрах)

ВИСНОВКИ

Інженерним методом проведений теоретичний аналіз процесу витягування вісесиметричних виробів з круглої заготовки в умовах прикладання диференційованого радіального підпору на фланець. Враховані вплив тертя, зміцнення при формоутворенні. Отримані аналітичні залежності для визначення радіальних розтягувальних напружень і стискаючих тангенціальних напружень у фланці заготовки, розтягувальних напружень у стінці виробу. Отримані вирази для розрахунків потовщення фланця при витягуванні та максимального зусилля витягування. Для перевірки адекватності рішення методом скінченних елементів проведений чисельний експеримент по витягуванню з підпором фланця вісесиметричних виробів з мало вуглецевої сталі. Порівняння результатів розрахунків показало можливість використання отриманих залежностей для проектування технології витягування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Антонов Е. А. Экспериментальное определение усилия на пуансоне при гидростатической вытяжке полых изделий из листа / Е. А. Антонов // Исследования в области оборудования и технологии штамповочного производства : Межвузовский сборник научных трудов. – Ярославль, 1977. – С. 70–77.
2. Сизов Е. С. Глубокая вытяжка деталей с жидким подпором / Е. С. Сизов, Е. А. Антонов, С. А. Петров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 4. – С. 23–25.
3. Влияние гидростатического давления на механические свойства и структуру изделий, полученных вытяжкой из листа / Е. А. Антонов, В. А. Новиков, А. С. Матвеев, Б. А. Панченко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1976. – № 10. – С. 13–17.
4. Береснев Б. И. Высокие давления в современных технологиях обработки материалов / Б. И. Береснев, К. И. Езерский, Е. В. Трушин [и др.]. – М. : Наука, 1988. – 245 с.
5. Патент України на корисну модель №59190. МПК (2009) B21B26/02. Спосіб обтиску горловини типу балон / Калюжний В. Л., Калюжний О. В., Піманов В. В., Паляничко Є. М. – № u201011607; заявл. 23.09.2010; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9/2010.
6. Патент України на корисну модель № 64784. МПК (2011) B21B21/10. Спосіб витягування з підпором фланця / Калюжний В. Л., Калюжний О. В., Піманов В. В., Савчук І. М. – № u201101217 від 13.02.2011, опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22/2011.
7. Патент України на корисну модель № 665339. МПК (2011) B21B21/10. Спосіб витягування біметалевих виробів / Калюжний В. Л., Калюжний О. В., Савчук І. М. – № u201101215 від 27.01.2011, опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23/2011.
8. Джонсон У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Б. Меллор; пер. с англ. А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1979. – 567 с.
9. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки : учеб. пособ. для вузов / Е. А. Попов. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с.

Калюжний О. В. – канд. техн. наук, ст. викл. НТУУ «КП».

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

E-mail: av-k@ukr.net

Стаття надійшла до редакції 16.02.2012 р.