

УДК 621.983:669.017

Тітов В. А.
Борис Р. С.**РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ВИТЯГУВАННІ
З ПОТОНШЕННЯМ ДВОШАРОВОГО МЕТАЛУ**

В роботах [1–6] запропонований спосіб та реалізація процесу виготовлення біметалевих трубчастих елементів (БТЕ) витягуванням з листових різнорідних металів, шляхом з'єднання шарів різних металів при витягуванні з потоншенням на завершальному етапі формоутворення. В даних роботах запропонована схема технологічного процесу виготовлення, сформована класифікація напрямів розвитку виробництва БТЕ витягуванням з потоншенням, даються рекомендації щодо реалізації запропонованого способу.

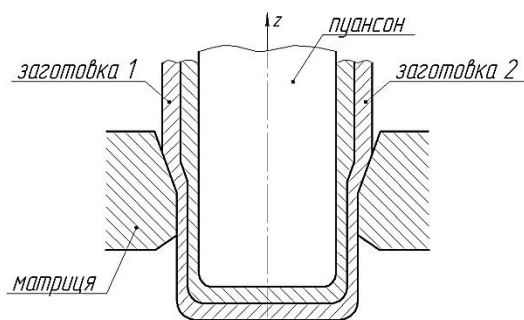


Рис. 1. Схема перерізу заготовки

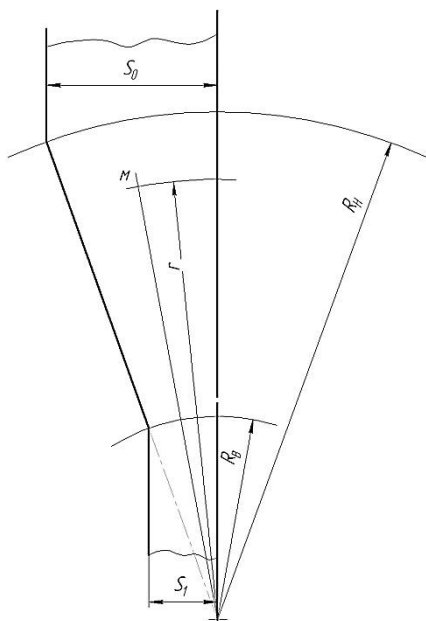


Рис. 2. Розрахункова схема осередку деформації при витягуванні з потоншенням монометалу

Згідно цієї схеми процесу внутрішній діаметр циліндричного стаканчика (заготовки) залишається незмінним в процесі витягування з потоншенням. Його величина визначається діаметром пуансону, по якому виконується попереднє витягування двохшарового циліндричного стаканчика з різнорідних металів (рис. 1).

Теоретичні основи витягування з потоншенням розглянуті в роботах [7, 8]. Деякі питання сумісного витягування з потоншенням різнорідних металів розглянуті в роботах [9, 10]. В цих роботах дається чисельне моделювання та аналіз процесу витягування, характер розподілу геометричних параметрів та механічних властивостей матеріалів в осередку деформації.

В даній роботі розглядаються деякі теоретичні аспекти процесу витягування трубчастих елементів з двохшарової заготовки з різнорідних металів, зміна товщини шарів матеріалів, напружено-деформований стан на граничній поверхні двох матеріалів, зміна швидкості переміщення шарів в осередку деформації. Тому теоретичний аналіз напружено-деформованого стану витягування з потоншенням, який визначає наведені параметри, є актуальною науково-технічною задачею для обґрунтування способів, що зазначені в роботах [1–3].

Метою даної роботи є теоретичний аналіз та розрахунок напружено-деформованого стану витягування з потоншенням БТЕ циліндричної форми з ідеальнопластичного двохшарового металу.

При витягуванні з потоншенням стінки величина зазору між пуансоном і матрицею менше ніж сумарна товщина шарів заготовки. В цьому випадку виникає (дільниця) осередок деформації, в якому заготовка деформується між боковими поверхнями пуансону та матриці.

Потоншення заготовки між пуансоном та матрицею може бути реалізовано за декілька переходів. В дослідженні прийнято технологічну схему процесу, при якій потоншення досягається за один перехід.

Теоретичний аналіз процесу витягування з потоншенням багат шарових металів базується на процесі витягування монометалу, а також сумісного деформування різнорідних шарів металу в осередку деформацій. Тому на першому етапі виконуємо аналіз напружено-деформованого стану монометалу.

Розрахункова схема осередку деформацій при витягуванні з потоншенням заготовки з монометалу приведена на рис. 2. Теоретичний аналіз осередку деформації при витягуванні з потоншенням монометалу виконуємо в полярній системі координат (r, θ, z) . При аналізі приймаємо наступні припущення відносно деформівного стану:

– переміщення матеріальних часток у напрямку координати z утруднено, тому швидкості деформацій в цьому напрямку дорівнюють нулю. Тому вважаємо, що деформування реалізується по схемі, яка близька до схеми плоскої деформації;

– при плоскій деформації вважаємо, що в осередку деформацій переміщення матеріальних часток залежить від радіальної координати r та не залежить від координати θ .

Тоді в загальному вигляді поле швидкостей характеризується такими рівняннями:

$$V_r = V_r(r); \quad V_\theta = 0; \quad V_z = 0 \quad (1)$$

Рівняння (1) повинні відповідати умові сумісності деформацій:

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0 \quad (2)$$

Радіальну складову поля швидкостей (1) отримаємо інтегруванням (2):

$$V_r = \frac{C}{r} \quad (3)$$

Константу інтегрування C визначаємо з урахуванням граничної умови, що при $r = R_B$ складові швидкостей деформації $V_r = V_0$, де V_0 – швидкість переміщення матеріальних часток, яка дорівнює швидкості руху пуансона.

Тоді поле швидкостей (1) з врахуванням (4) має вигляд:

$$V_r = \frac{V_0 R_B}{r}; \quad V_\theta = 0; \quad V_z = 0 \quad (4)$$

Швидкості деформацій визначимо диференціюванням швидкостей переміщень по відносним координатам [11]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= -\frac{V_0 R_B}{r^2}; \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{V_0 R_B}{r^2}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\theta z} = \varepsilon_{zr} = \varepsilon_{r\theta} = 0.$$

Інтенсивність швидкостей деформацій дорівнює:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_0 R_B}{r^2} \quad (6)$$

Вважаємо, що метал заготовки є ідеальнопластичним тому, що процес виконуємо в умовах гарячої (ізотермічної) пластичної деформації:

$$\sigma_i = \sigma_s \quad (7)$$

Коефіцієнт жорсткості [11]:

$$\mu_i = \frac{1}{3} \frac{\sigma_s}{\varepsilon_i} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sigma_s \frac{r^2}{V_0 R_B} \quad (8)$$

Для визначення компонент тензора напружень використовуємо рівняння зв'язку напружень та швидкостей деформацій [11]:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \sigma + 2\mu_i \varepsilon_{rr}; & \tau_{r\theta} &= \mu_i \varepsilon_{r\theta}; \\ \sigma_{\theta\theta} &= \sigma + 2\mu_i \varepsilon_{\theta\theta}; & \tau_{\theta z} &= \mu_i \varepsilon_{\theta z}; \\ \sigma_{zz} &= \sigma + 2\mu_i \varepsilon_{zz}; & \tau_{zr} &= \mu_i \varepsilon_{zr}.\end{aligned}\quad (9)$$

Середнє напруження σ , що входить до залежностей (9) визначаємо з використанням універсальних рівнянь [11], які в даному випадку мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma}{\partial r} &= \mu_i \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r} \right) + 2 \frac{\partial \mu_i}{\partial r} \frac{\partial V_r}{\partial r}; \\ \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma}{\partial z} &= 0.\end{aligned}\quad (10)$$

Тоді після підстановки (4) та (8) в (10) отримаємо:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial r} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_s}{r}.\quad (11)$$

Загальне вирішення даного рівняння:

$$\sigma = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \ln r + C.\quad (12)$$

Радіальна складова напружень σ_{rr} в (13) з урахуванням (12) в загальному вигляді має вид:

$$\sigma_{rr} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \ln r + C + \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}.\quad (13)$$

Для визначення довільної постійної використовуємо граничну умову, що на вході в матрицю радіальні напруження відсутні:

$$r = R_H, \quad \sigma_{rr} = 0.\quad (14)$$

З урахуванням граничної умови (14) компоненти тензора напружень (9) описуються наступними виразами:

$$\sigma_{rr} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \ln \frac{R_H}{r}; \quad \sigma_{\theta\theta} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_H}{r} \right); \quad \sigma_{zz} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \ln \frac{R_H}{r} - \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}.\quad (15)$$

Отриманий розподіл напружень відповідає залежностям, які отримані Є. О. Поповим для витягування з потоншенням монометалу в роботі [7]. Це підтверджує прийняті гіпотези та припущення. Використовуючи їх для витягування двошарового металу приймемо додатково наступні припущення:

– при зменшенні загальної товщини двошарової (составної) стінки заготовки, в залежності від механічної неоднорідності властивостей її шарів, виникає нерівномірне зменшення товщини кожного шару;

– подовження окремих шарів поздовж напрямку руху пуансону будуть не однакові. Це приводить до взаємного переміщення матеріальних часток граничної поверхні шарів один відносно іншого;

– для створення дифузійного з'єднання необхідно щоб в кінці зони стиску осередку деформацій при $r = R_B$ швидкості взаємного переміщення матеріальних часток на граничній поверхні вирівнювались.

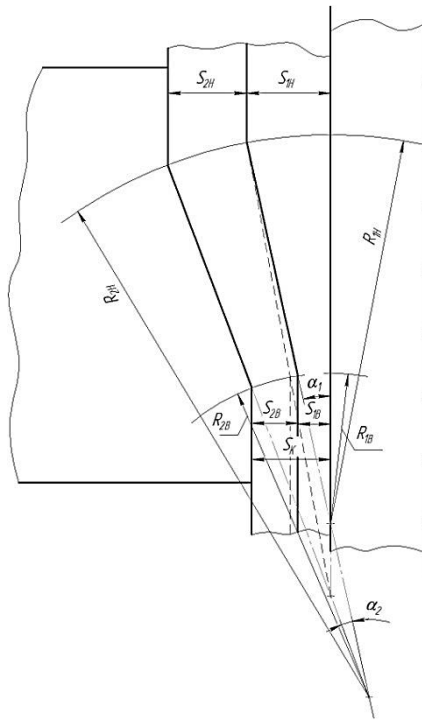


Рис. 4. Схема деформування двошарового металу в осередку деформацій

Кінематичною особливістю деформування двошарового металу є те, що на виході з осередку деформацій при $r = R_B$ за рахунок різних механічних властивостей шарів змінюється співвідношення товщин металу. Це приводить до того, що гранична поверхня в осередку деформацій розвертається на деякий кут відносно радіального напрямку (рис. 4). Внаслідок цього змінюються розрахункові радіуси для першого та другого шарів.

Фізичною умовою сумісного деформування шарів в осередку деформацій є рівність нормальних до граничної поверхні тангенційних напружень:

$$\sigma_{\theta\theta I} = \sigma_{\theta\theta II}.$$

Для першого шару:

$$\sigma_{\theta\theta I} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S1} \left(1 - \ln \frac{R_{1H}}{r} \right). \quad (16)$$

Для другого шару:

$$\sigma_{\theta\theta II} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S2} \left(1 - \ln \frac{R_{2H}}{r} \right). \quad (17)$$

Рішення знаходимо для рівності тангенційних напружень для вихідного перерізу матриці при $r = R_{iB}$:

$$\sigma_{S1} \left(1 - \ln \frac{R_{1H}}{R_{1B}} \right) = \sigma_{S2} \left(1 - \ln \frac{R_{2H}}{R_{2B}} \right). \quad (18)$$

Для подальшого аналізу зручно перейти від радіусів, що описують вхідні та вихідні перерізи до товщин шарів металу на вході S_{iH} та на виході S_{iB} , які невідомі.

Враховуючи те, що товщини шарів і всього металу визначаються вхідним та вихідним перерізами осередку деформацій, вважаємо, що для малих кутів осередку деформацій величина цих перерізів дорівнює довжині дуги, яка опирається на цей переріз.

З геометричних співвідношень для довільного перерізу з кутом α_i однорідного шару металу маємо наступні співвідношення:

$$\begin{cases} S_{iH} = \alpha_i R_{iH}; \\ S_{iB} = \alpha_i R_{iB}, \end{cases} \quad (19)$$

де i – індекс шару металу.

З рівняння (19) можна записати, що:

$$\alpha_i = \frac{S_{iH}}{R_{iH}} = \frac{S_{iB}}{R_{iB}}. \quad (20)$$

Залежність (20) дозволяє записати для двошарового металу незалежно від положення центру кривизни для кожного з його шарів співвідношення:

$$\begin{cases} \frac{R_{1H}}{R_{1B}} = \frac{S_{1H}}{S_{1B}}; \\ \frac{R_{2H}}{R_{2B}} = \frac{S_{2H}}{S_{2B}}. \end{cases} \quad (21)$$

Отримані співвідношення дозволяють записати рівняння (18) через товщини шарів:

$$\sigma_{S_1} \left(1 - \ln \frac{S_{1H}}{S_{1B}} \right) = \sigma_{S_2} \left(1 - \ln \frac{S_{2H}}{S_{2B}} \right). \quad (22)$$

Після потенціювання рівняння (22) може бути записано у вигляді:

$$e^{1-A} = \left(\frac{S_{1H}}{S_{1B}} \right)^A \left(\frac{S_{2B}}{S_{2H}} \right), \quad (23)$$

де $A = \frac{\sigma_{S_1}}{\sigma_{S_2}}$ – коефіцієнт механічної неоднорідності двошарового металу.

Рівняння (23) має два невідомих – це товщини окремих шарів S_{1B} та S_{2B} на виході з осередку деформацій. Враховуючи, що вони зв'язані з зазором матриці на виході, який визначає товщину стінки заготовки після витягування, рівняння (23) можна привести до однієї невідомої з підстановкою:

$$S_{2B} = S_K - S_{1B}. \quad (24)$$

Після підстановки (24) та деяких перетворень рівняння (23) має вид:

$$\left(\frac{S_{2H}}{S_{1H}^A} \right) \cdot S_{1B}^A + (e^{1-A}) \cdot S_{1B} - (e^{1-A}) \cdot S_K = 0. \quad (25)$$

Отримане рівняння відносно S_{1B} не може бути вирішено аналітичними методами. Вирішення його здійснюємо методом ітерацій [12], для чого рівняння представляємо у наступному вигляді:

$$S_{1B} = S_K - e^{A-1} S_{2H} \left(\frac{S_{1B}}{S_{1H}} \right)^A. \quad (26)$$

На рис. 5 показана залежність зміни товщини шарів при витягуванні з потоншенням від співвідношення механічних властивостей матеріалів шарів.

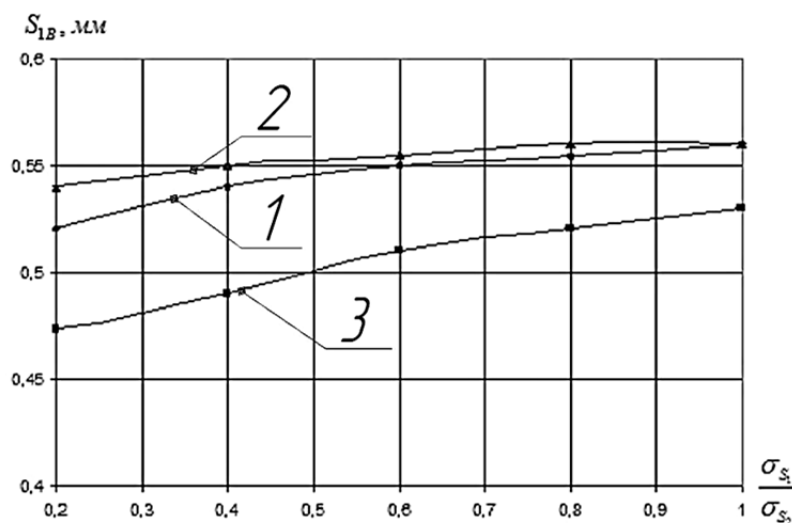


Рис. 5. Залежність зміни товщини шарів при витягуванні з потоншенням заготовки з початковими товщинами шарів ($S_{0H} = 2,8$ мм, S_{1H} та $S_{2H} = 1,4$ мм) та кінцевою товщиною $S_K = 1,12$ мм:

1 – аналітичний розрахунок; 2 – експеримент; 3 – чисельний розрахунок

Аналіз графічних залежностей показує, що:

– якщо механічні властивості шарів металу не відрізняються ($\sigma_{S1} = \sigma_{S2}$), двошаровий метал поводить себе, як одношаровий. При цьому $\frac{S_{1B}}{S_{2B}} = \frac{S_{1H}}{S_{2H}} = k$;

– якщо механічні властивості шарів відрізняються то змінюється співвідношення товщин двошарового металу після витягування. Так при зменшенні співвідношення $\frac{\sigma_{S1}}{\sigma_{S2}}$ зме-

ншується на виході товщина першого шару S_{1B} , який має менші механічні властивості;

– співвідношення товщини металу після витягування залежить також від початкового співвідношення товщин металу;

– похибка розрахунку сягає від 6–10 %. Величина похибки розрахунку пояснюється не врахуванням механічного зміцнення, сил тертя, статистичним розкидом механічних властивостей матеріалу в натурному експерименті.

Визначимо розрахункові радіуси осередку деформації для кожного шару з використанням залежностей (26):

$$R_{iH} = \frac{hS_{iH}}{S_{iH} - S_{iB}}; \quad (27)$$

$$R_{iB} = \frac{hS_{iB}}{S_{iH} - S_{iB}}.$$

де h – висота осередку деформації; i – індекс шару металу.

Визначимо висоту осередку деформації:

$$h = [(S_{1H} + S_{2H}) - S_k] \operatorname{ctg} \alpha. \quad (28)$$

Підставимо рівняння (27) в (28) отримаємо:

$$R_{iH} = \frac{S_{iH}}{S_{iH} - S_{iB}} (S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha; \quad (29)$$

$$R_{iB} = \frac{S_{iB}}{S_{iH} - S_{iB}} (S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha.$$

Розрахункові радіуси осередку деформацій для кожного шару дозволить розрахувати параметри НДС з використанням раніше отриманих залежностей. Тоді поля швидкостей для обох шарів:

$$V_{r_i} = \frac{V_0 \frac{S_{iB}}{S_{iH} - S_{iB}} (S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha}{r}; \quad V_{\theta} = 0; \quad V_z = 0. \quad (30)$$

де i – індекс шару металу.

Компоненти швидкостей деформацій в радіальному напрямку для першого та другого шару:

$$\varepsilon_{rr_i} = -\frac{V_0 \frac{S_{iB}}{S_{iH} - S_{iB}} (S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha}{r^2}; \quad \varepsilon_{\theta\theta_i} = \frac{V_0 \frac{S_{iB}}{S_{iH} - S_{iB}} (S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha}{r^2};$$

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\theta z} = \varepsilon_{zr} = \varepsilon_{r\theta} = 0. \quad (31)$$

Інтенсивність швидкостей деформацій:

$$\varepsilon_{i_i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_0 \frac{S_{iB}}{S_{iH} - S_{iB}} (S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha}{r^2}. \quad (32)$$

Компоненти тензора напружень:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr_i} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_i} \ln \frac{\frac{S_{iH}}{S_{iH} - S_{iB}} (S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha}{r}; \\ \sigma_{\theta\theta_i} &= -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_i} \left(1 - \ln \frac{\frac{S_{iH}}{S_{iH} - S_{iB}} (S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha}{r} \right); \\ \sigma_{zz_i} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_i} \ln \frac{\frac{S_{iH}}{S_{iH} - S_{iB}} (S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha}{r} - \frac{\sigma_{S_i}}{\sqrt{3}}. \end{aligned} \quad (33)$$

Кінематичні залежності (30) дають можливість побудувати розподіл різниці радіальних швидкостей переміщень ΔV_r (рис. 6) на границі розділу шарів.

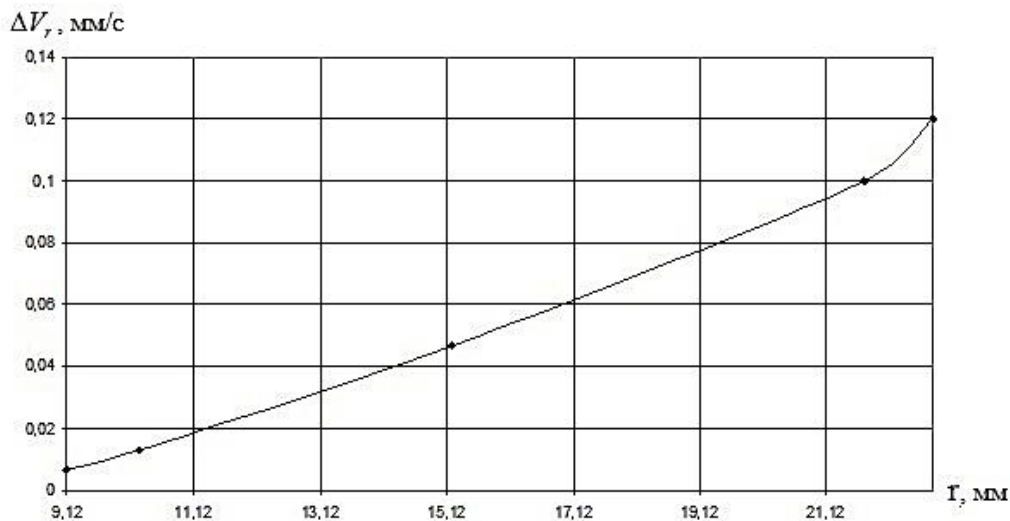


Рис. 6. Розподіл різниці радіальних швидкостей ΔV_r в залежності від зміни радіусу на граничній поверхні шарів при витягуванні з потоншенням

Аналіз цієї залежності показує, що:

- максимальна різниця на вході металів в осередок деформацій;
- на виході з осередку деформацій швидкості вирівнюються.

Такий розподіл швидкостей забезпечує виконання умов для дифузійного з'єднання шарів [6], в способах [1–5], запропонованих авторами.

В результаті автором також відмічено, що більш точне рішення можливо отримати при врахуванні сил тертя на контактній поверхні зміщення металів шарів.

ВИСНОВКИ

На основі прийнятих припущень створена теоретична модель процесу витягування з потоншенням двохшарового матеріалу. Виконано аналіз основних параметрів напружено-деформованого стану процесу витягування.

Теоретично для ідеальнопластичного металу отримане рівняння, яке враховує механічну неоднорідність двошарової заготовки. Вирішення цього рівняння методом ітерацій дозволило визначити кінцеві товщини після витягування. Показано, що похибка розрахунку в порівнянні з експериментальним та чисельним розрахунком не перевищує 10 %.

Отримана модель дозволила встановити розподіл компонент тензорів напружень та швидкості деформацій в осередку деформацій, а також різницю радіальних швидкостей переміщення шарів, припускаючи, що на виході заготовки з матриці взаємне переміщення шарів відсутнє, що забезпечує виконання умов з'єднання шарів.

Результати аналізу показують, що отримані теоретичні результати можливо використовувати для проектування процесів, які реалізують способи виготовлення біметалевих трубчастих елементів, що запропоновані авторами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тітов В. А. Розробка структури машинобудівної технології виготовлення біметалевих елементів та теоретичні підстави для її реалізації / В. А. Тітов, Р. С. Борис // *Вестник Национального технического университета Украины «КПИ»*. – Киев, 2006. – № 49. – (Серия «Машиностроение»).
2. Тітов В. А. Обґрунтування підстав для створення машинобудівної технології виготовлення біметалевих трубчастих елементів витягуванням / В. А. Тітов, Т. М. Лабур, Р. С. Борис // *Технологические системы*. – 2007. – №1. – С. 33–39.
3. Тітов В. А. Напрямки розвитку способів виготовлення біметалевих трубчастих елементів з різнорідних матеріалів витягуванням / В. А. Тітов, Р. С. Борис, М. С. Тривайло // *Вестник Национального технического университета Украины «КПИ»*. – Киев, 2009. – № 56. – С. 154–159. – (Серия «Машиностроение»).
4. Тітов В. А. Дослідження процесу виготовлення біметалевих трубчастих елементів витягуванням / В. А. Тітов, Р. С. Борис // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Крамторск : ДГМА, 2009. – № 2 (21). – С. 173–178.*
5. Тітов В. А. Обґрунтування та реалізація дослідного процесу виготовлення біметалевих трубчастих елементів / В. А. Тітов, Р. С. Борис, П. С. Вишневський, О. О. Лук'яненко // *Вісник Національного технічного університету України «КПИ»*. – Київ, 2010. – № 59. – С. 13–18. – (Серия «Машиностроение»).
6. Тітов В. А. Влияние особенностей конструкции рабочей поверхности матрицы оснастки на параметры процесса вытяжки с утонением биметаллических трубчатых элементов / В. А. Титов, Р. С. Борис, Е. И. Богодист // *Вісник національного технічного університету «ХПИ»*. – Харків, 2011. – № 45. – С. 34–42.
7. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1968. – 283 с.
8. Валиев С. А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов / С. А. Валиев. – М. : Машиностроение, 1973. – 176 с.
9. Сатонин А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при осесимметричной вытяжке многослойных полиметаллических заготовок с утонением стенки / А. В. Сатонин, Т. А. Кулик, А. А. Сатонин // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2007. – № 8. – С. 34–39.
10. Сатонин А. В. Численное математическое моделирование процессов пластической деформации относительно тонкого листового металлопроката на основе силового и энергетического подходов / А. В. Сатонин, В. В. Смолякова, А. А. Иванов // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Крамторск : ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 92–98.*
11. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов / Ю. Н. Алексеев. – Харьков, изд-во ХГУ, 1958. – 188 с.
12. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ : практическое руководство : пер. с англ. / Т. Шуп. – М. : Мир, 1982. – 238 с.

Тітов В. А. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. НТУУ «КПІ»;

Борис Р. С. – асистент НТУУ «КПІ».

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

E-mail: v.a.titov@list.ru

Стаття надійшла до редакції 13.02.2012 р.