

УДК УДК 621.983:669.017

Борис Р. С.
Тітов В. А.
Вишневецький П. С.

ОСОБЛИВОСТІ ВРАХУВАННЯ СИЛ ТЕРТЯ ПРИ ВИТЯГУВАННІ З ПОТОНШЕННЯМ ДВОШАРОВИХ ЗАГОТОВОК

В роботах [1–5] представлений спосіб реалізації технологічного процесу виготовлення біметалевих трубчастих елементів (БТЕ) циліндричної форми. В цих роботах авторами наведено реалізацію машинобудівної технології виготовлення БТЕ, теоретичні та практичні підстави для її реалізації, напрями розвитку способів виготовлення БТЕ з різнорідних металів витягуванням, вплив геометрії робочого інструменту та наведено рекомендації щодо реалізації процесу сумісного витягування з потоншенням, з різнорідних листових матеріалів.

Теоретичні основи та аналіз енергосилових параметрів процесу та граничних умов ступенів деформацій при витягуванні з потоншенням циліндричних виробів присвячені роботи [6–8]. У вказаних вище роботах представлені теоретичні дослідження, які виконані шляхом вирішення сумісних рівнянь рівноваги та умов пластичності.

В попередніх роботах [9] авторів статті були розглянуті кінематичні та деформаційні особливості деформування двошарової заготовки металів з ідеальнопластичними властивостями для умов гарячої деформації без врахування сил тертя на контактних поверхнях. Показано, що врахування сил тертя може забезпечити точність розрахунку параметрів напружено-деформованого стану.

В даній роботі авторами розглядається теоретичний розрахунок процесу сумісного витягування з потоншенням двошарової заготовки з врахуванням тертя на граничних поверхнях між шарами обох матеріалів та інструментом, зміна товщини шарів металів, напружено-деформований стан на граничній поверхні двох матеріалів та зміна швидкості в осередку деформацій. Тому теоретичний аналіз розрахунку витягування з потоншенням двошарової заготовки циліндричної форми з врахуванням сил тертя є актуальною науково технічною задачею.

Метою даної роботи є теоретичний аналіз процесу сумісного витягування з потоншенням двошарової заготовки з врахуванням тертя на контактних поверхнях методом балансу потужностей.

Сили тертя в осередку деформації, де заготовка стискується між пуансоном та матрицею, мають різні напрямки. Оскільки заготовка переміщується відносно матриці у напрямку руху пуансона, сили тертя, що діють на зовнішній поверхні заготовки, мають напрям, який є зворотнім до напрямку руху пуансона. Подовження заготовки при потоншенні приводить до того, що в осередку деформації вона переміщується по пуансону у зворотному напрямку, а сили тертя на внутрішній поверхні заготовки діють у напрямку руху пуансона. Сили тертя на зовнішній поверхні заготовки викликають збільшення напружень розтягу, що діють у стінках протягнутої частини заготовки. Сили тертя на внутрішній поверхні заготовки розвантажують небезпечний переріз, зменшуючи напруження розтягу у стінках протягнутої частини заготовки [6].

Відмічені особливості витягування з потоншенням стінки є основною причиною можливості досягнення відносно великих допустимих деформацій по товщині заготовки, які характеризуються значними по величині радіальними напруженнями.

Розглянемо аналіз енергосилових параметрів витягування з потоншенням, з урахуванням сил тертя на контактних поверхнях використавши для цього метод балансу потужностей. Аналіз напружено-деформованого стану виконаємо на основі кінематичної моделі деформування двошарової заготовки при витягуванні з потоншенням, що наведена в роботі авторів [9]. Приймаємо також основні припущення щодо процесу та позначення осередку деформацій, які прийняті в роботі [9].

Складемо рівняння балансу потужностей для осередку деформацій першого шару, який обмежений радіусами R_{IH} і R_{IB} :

$$N_{\sigma_{z1}} = N_{mp_n} + N_{mp}^{mc} + N_{\sigma_{r1}} + N_{\sigma_{\theta1}} + N_{\tau_{r\theta1}} + N_{R_{1H}}^{zc} + N_{R_{1B}}^{zc}, \quad (1)$$

де N_{mp_n} – потужність, яка витрачається на тертя між заготовкою і пуансоном;

N_{mp}^{mc} – потужність, яка витрачається на тертя між шарами біметалічної заготовки;

$N_{\sigma_{r1}}$ – потужність, яка створюється напруженнями σ_{r1} ;

$N_{\sigma_{\theta1}}$ – потужність, яка створюється напруженнями $\sigma_{\theta1}$;

$N_{\tau_{r\theta1}}$ – потужність, яка створюється напруженнями $\tau_{r\theta1}$;

$N_{R_{1H}}^{zc}$ – потужність, яка витрачається на зсув по радіусу R_{1H} ;

$N_{R_{1B}}^{zc}$ – потужність, яка витрачається на зсув по радіусу R_{1B} ;

R_{1H} – зовнішній радіус осередку деформацій i -го шару;

R_{1B} – внутрішній радіус осередку деформацій i -го шару.

Виходячи з рівняння балансу потужностей можна знайти потужність N_{∂_1} , яка витрачається на подолання опору деформування в першому шарі:

$$N_{\partial_1} = N_{\sigma_{r1}} + N_{\sigma_{\theta1}} + N_{\tau_{r\theta1}}. \quad (2)$$

Вираз для визначення N_{∂_1} має вигляд:

$$N_{\partial_1} = \iiint_V \sigma_{S1} \varepsilon_i dV, \quad (3)$$

де σ_{S1} – границя течії металу першого шару;

dV – елементарний об'єм осередку пластичної деформації.

ε_i – інтенсивність швидкостей деформацій.

Інтенсивність швидкостей деформацій дорівнює [9]:

$$\varepsilon_{i1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_0 R_{1B}}{r^2}, \quad (4)$$

де V_0 – швидкість руху пуансона.

Тоді рівняння (3) прийме вид:

$$N_{\partial_1} = \int_{R_{1B}}^{R_{1H}} \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S1} \frac{V_0 R_{1B}}{r^2} \alpha_1 dr, \quad (5)$$

де α_1 – кут нахилу осередку деформацій i -го шару.

Проінтегрувавши (5), отримаємо значення потужності N_{∂_1} :

$$N_{\partial_1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S1} \frac{V_0 R_{1B}}{r^2} \alpha_1 \ln \frac{R_{1H}}{R_{1B}}. \quad (6)$$

Знайдемо потужність, яка витрачається на подолання сил тертя по пуансону згідно виразу:

$$N_{mp_n} = \tau_k V_{r_1} F, \quad (7)$$

де τ_k – дотичне напруження на контактній поверхні;

$F = R_{1H} - R_{1B}$ – площа контактної поверхні.

Напруження τ_k беремо по закону Кулона: $\tau_k = \mu_1 \cdot \sigma_{S_1}$, μ_1 – коефіцієнт тертя між заготовкою і пуансоном:

$$N_{mp_n} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \mu_1 \sigma_{S_1} \left(1 - \ln \frac{R_{1H}}{r} \right) \frac{V_0 R_{1B}}{r^2} (R_{1H} - R_{1B}). \quad (8)$$

Знайдемо потужність, яка витрачається на подолання сил тертя по зовнішній та внутрішній границі осередку деформацій:

$$N_{\tau_1}^{3c} = \tau_{3c} \cdot V_{3c} \cdot F_{3c}, \quad (9)$$

де $\tau_{3c} = \frac{\sigma_{S_1}}{2}$ – дотичне напруження на поверхні зсуву;

V_{3c} – швидкість металу на поверхні зсуву;

F_{3c} – площа зсуву.

$$N_{R_{1B}}^{3c} = \frac{\sigma_{S_1}}{2} \frac{V_0 R_{1B}}{r^2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} R_{1B} \alpha_1; \quad (10)$$

$$N_{R_{1H}}^{3c} = \frac{\sigma_{S_1}}{2} \frac{V_0 R_{1B}}{r^2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} R_{1H} \alpha_1. \quad (11)$$

Знайдемо аналогічним чином потужність, яка витрачається на тертя між шарами двох різномірних матеріалів N_{mp}^{mc} :

$$N_{mp}^{mc} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \mu_2 \sigma_{S_1} \left(1 - \ln \frac{R_{1H}}{r} \right) \frac{V_0 R_{1B}}{r^2} (R_{1H} - R_{1B}), \quad (12)$$

де μ_2 – коефіцієнт тертя між шарами.

Визначимо напруження σ_{z_1} та розрахуємо потужність $N_{\sigma_{z_1}}$, яка створюється напруженням σ_{z_1} в стінці першого шару:

$$N_{\sigma_{z_1}} = \sigma_{z_1} R_{1B} \alpha_1 V_{r_1}. \quad (13)$$

Для знаходження напруження σ_{z_1} запишемо всі складові рівняння балансу потужностей:

$$N_{\sigma_{z_1}} = N_{mp_n} + N_{mp}^{mc} + N_{\sigma_1} + N_{R_{1H}}^{3c} + N_{R_{1B}}^{3c}. \quad (14)$$

Після підстановки (6), (8), (10), (11), (12), в (14) та зробивши деякі перетворення отримаємо значення осьового напруження σ_{z_1} :

$$\sigma_{z_1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_1} \alpha_1 V_0 \left[\mu_2 \left(1 - \ln \frac{R_{1H}}{r} \right) \frac{(R_{1H} - R_{1B})}{R_{1B} \alpha_1} - \mu_1 \left(1 - \ln \frac{R_{1H}}{r} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{(R_{1H} - R_{1B})}{R_{1B} \alpha_1} + 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} + \ln \frac{R_{1H}}{R_{1B}} \right]. \quad (15)$$

Підставимо знайдене напруження в (13) отримаємо значення потужності $N_{\sigma_{z_1}}$ та підставимо замість r радіус R_{1B} тоді отримаємо:

$$N_{\sigma_{z_1}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_1} \alpha_1 V_0 \left[\mu_2 \left(1 - \ln \frac{R_{1H}}{R_{1B}} \right) \frac{(R_{1H} - R_{1B})}{R_{1B} \alpha_1} - \mu_1 \left(1 - \ln \frac{R_{1H}}{R_{1B}} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{(R_{1H} - R_{1B})}{R_{1B} \alpha_1} + 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} + \ln \frac{R_{1H}}{R_{1B}} \right]. \quad (16)$$

Визначимо потужність активних сил при витягуванні другого шару. Для цього, як і в розрахунку першого шару виділимо осередок деформацій, який обмежений радіусами R_{2H} і R_{2B} :

$$N_{z_2} = N_{mp_m} + N_{mp}^{mc} + N_{\sigma_{r_2}} + N_{\sigma_{\theta_2}} + N_{\tau_{r\theta_2}} + N_{R_{2H}}^{3c} + N_{R_{2B}}^{3c}. \quad (17)$$

де N_{mp_m} – потужність, яка витрачається на тертя між заготовкою і матрицею;

N_{mp}^{mc} – потужність, яка витрачається на тертя між шарами біметалічної заготовки;

$N_{\sigma_{r_2}}$ – потужність, яка створюється напруженнями σ_{r_2} ;

$N_{\sigma_{\theta_2}}$ – потужність, яка створюється напруженнями σ_{θ_2} ;

$N_{\tau_{r\theta_2}}$ – потужність, яка створюється напруженнями $\tau_{r\theta_2}$;

$N_{R_{2H}}^{3c}$ – потужність, яка витрачається на зсув по радіусу R_{2H} ;

$N_{R_{2B}}^{3c}$ – потужність, яка витрачається на зсув по радіусу R_{2B} .

Як і в першому випадку, при розрахунку першого шару виходячи з рівняння балансу потужності можемо знайти потужність N_{∂_2} , яка витрачається на подолання опору деформування в другому шарі

Вона дорівнює:

$$N_{\partial_2} = N_{\sigma_{r_2}} + N_{\sigma_{\theta_2}} + N_{\tau_{r\theta_2}}. \quad (18)$$

Вираз для знаходження N_{∂_2} має вигляд:

$$N_{\partial_2} = \iiint_V \sigma_{S_2} \varepsilon_{i_2} dV, \quad (19)$$

де σ_{S_2} – границя течії металу другого шару.

Інтенсивність швидкостей деформацій для другого шару дорівнює [9]:

$$\varepsilon_{i_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_0 R_{2B}}{r^2}, \quad (20)$$

Тоді рівняння (19) набуде вигляду:

$$N_{\partial_2} = \int_{R_{2B}}^{R_{2H}} \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_2} \frac{V_0 R_{2B}}{r^2} \alpha_2 dr. \quad (21)$$

Проінтегрувавши вираз (21), отримаємо:

$$N_{\partial_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_2} \frac{V_0 R_{2B}}{r^2} \alpha_2 \ln \frac{R_{2H}}{R_{2B}}. \quad (22)$$

Знайдемо потужність, яка витрачається на подолання сил тертя по матриці N_{mp_m} при умові, що довжина контактної ділянки дорівнює $R_{2H} - R_{2B}$:

$$N_{mp_m} = \tau_k V_{r_2} F, \quad (23)$$

де τ_k – дотичне напруження на контактній поверхні;

$F = R_{2H} - R_{2B}$ – площа контактної поверхні.

Напруження τ_k беремо по закону Кулона: $\tau_k = \mu_3 \cdot \sigma_{\theta_2}$, μ_3 – коефіцієнт тертя між заготовкою і матрицею.

$$N_{mp_m} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \mu_3 \sigma_{S_2} \left(1 - \ln \frac{R_{2H}}{r}\right) \frac{V_0 R_{2B}}{r} (R_{2H} - R_{2B}). \quad (24)$$

Знайдемо потужності, які витрачаються на зсув по аналогії з першим шаром для другого шару:

$$N_{\tau_2}^{3c} = \tau_{3c} \cdot V_{3c} \cdot F_{3c}, \quad (25)$$

де $\tau_{3c} = \frac{\sigma_{S_2}}{2}$ – дотичне напруження на поверхні зсуву.

$$N_{R_{2B}}^{3c} = \frac{\sigma_{S_2}}{2} V_{r_2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2} R_{2B} \alpha_2; \quad (26)$$

$$N_{R_{2H}}^{3c} = \frac{\sigma_{S_2}}{2} V_{r_2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2} R_{2H} \alpha_2. \quad (27)$$

Знайдемо потужність, яка витрачається на тертя між шарами двох різномірних матеріалів:

$$N_{mp}^{mc} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \mu_2 \sigma_{S_2} \left(1 - \ln \frac{R_{2H}}{r}\right) \frac{V_0 R_{2B}}{r} (R_{2H} - R_{2B}), \quad (28)$$

де μ_2 – коефіцієнт тертя між шарами.

Потужність, яка створюється напруженням σ_{z_2} в стінці другого шару:

$$N_{\sigma_{z_2}} = \sigma_{z_2} R_{2B} \alpha_2 V_{r_2}. \quad (29)$$

Для знаходження напруження σ_{z_2} запишемо всі складові рівняння балансу потужностей:

$$N_{\sigma_{z_2}} = N_{mp_n} + N_{mp}^{mc} + N_{d_2} + N_{R_{2H}}^{3c} + N_{R_{2B}}^{3c}. \quad (30)$$

Зробивши деякі перетворення, отримаємо значення осевого напруження σ_{z_2} :

$$\sigma_{z_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_S \alpha_2 V_0 \left[\mu_3 \left(1 - \ln \frac{R_{2H}}{r} \right) \frac{(R_{2H} - R_{2B})}{R_{2B} \alpha_2} - \mu_2 \left(1 - \ln \frac{R_{2H}}{r} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{(R_{2H} - R_{2B})}{R_{2B} \alpha_2} + 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2} + \ln \frac{R_{2H}}{R_{2B}} \right]. \quad (31)$$

Підставимо знайдене напруження в (31), отримаємо значення потужності $N_{\sigma_{z_2}}$ та підставимо замість r радіус R_{2B} , тоді отримаємо:

$$N_{\sigma_{z_2}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_2} \alpha_2 V_0 \left[\mu_3 \left(1 - \ln \frac{R_{2H}}{R_{2B}} \right) \frac{(R_{2H} - R_{2B})}{R_{2B} \alpha_2} - \mu_2 \left(1 - \ln \frac{R_{2H}}{R_{2B}} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{(R_{2H} - R_{2B})}{R_{2B} \alpha_2} + 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2} + \ln \frac{R_{2H}}{R_{2B}} \right]. \quad (32)$$

Знайшовши потужності $N_{\sigma_{z_1}}$ та $N_{\sigma_{z_2}}$, знайдемо загальну потужність для першого та другого шару N_{σ_z} :

$$N_{\sigma_z} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_1} \alpha_1 V_0 \left[\mu_2 \left(1 - \ln \frac{R_{1H}}{R_{1B}} \right) \frac{R_{1H} - R_{1B}}{R_{1B} \alpha_1} - \mu_1 \left(1 - \ln \frac{R_{1H}}{R_{1B}} \right) \frac{R_{1H} - R_{1B}}{R_{1B} \alpha_1} + \right. \\ \left. + 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} + \ln \frac{R_{1H}}{R_{1B}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_2} \alpha_2 V_0 \left[\mu_3 \left(1 - \ln \frac{R_{2H}}{R_{2B}} \right) \frac{R_{2H} - R_{2B}}{R_{2B} \alpha_2} - \mu_2 \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \ln \frac{R_{2H}}{R_{2B}} \right) \frac{R_{2H} - R_{2B}}{R_{2B} \alpha_2} + 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2} + \ln \frac{R_{2H}}{R_{2B}} \right]. \quad (33)$$

Для зручності аналізу процесу зробимо заміну радіусів осередку деформацій на початкові S_{iH} та вихідні S_{iB} товщини шарів, виходячи з геометричних співвідношень:

– висота осередку деформації:

$$h = (S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{tg} \alpha;$$

– кут осередку деформацій:

$$\alpha_i = \frac{S_{iB}}{S_{iH}};$$

– співвідношення між шарами на виході:

$$S_{2B} = S_k - S_{1B}.$$

З урахуванням всіх заміन отримуємо:

$$\begin{aligned}
N_{\sigma_z} = & \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_1} \alpha_1 V_0 \left[\mu_2 \left(1 - \ln \frac{S_{1H}}{S_{1B}} \right) \frac{(S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha}{S_{1B}} - \mu_1 \left(1 - \ln \frac{S_{1H}}{S_{1B}} \right) \frac{(S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha}{S_{1B}} + \right. \\
& \left. + \frac{S_{1B}}{S_{1H}} + \ln \frac{S_{1H}}{S_{1B}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S_2} \alpha_2 V_0 \left[\mu_3 \left(1 - \ln \frac{S_{2H}}{S_k - S_{1B}} \right) \frac{(S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha}{S_k - S_{1B}} - \mu_2 \times \right. \\
& \left. \times \left(1 - \ln \frac{S_{2H}}{S_k - S_{1B}} \right) \frac{(S_{0H} - S_{0k}) \operatorname{ctg} \alpha}{S_k - S_{1B}} + \frac{S_{1B}}{S_{1H}} + \ln \frac{S_{2H}}{S_k - S_{1B}} \right].
\end{aligned} \quad (34)$$

Рівняння (34) має одну невідому – S_{1B} . Для визначення її виконуємо мінімізацію потужності процесу:

$$\frac{\partial N_{\sigma_z}}{\partial S_{1B}} = 0. \quad (35)$$

Отримане рівняння (35) вирішено чисельним методом простих ітерацій. Результати розрахунку були порівняні з результатами розрахунку без урахування сил тертя та представлені на рис. 1.

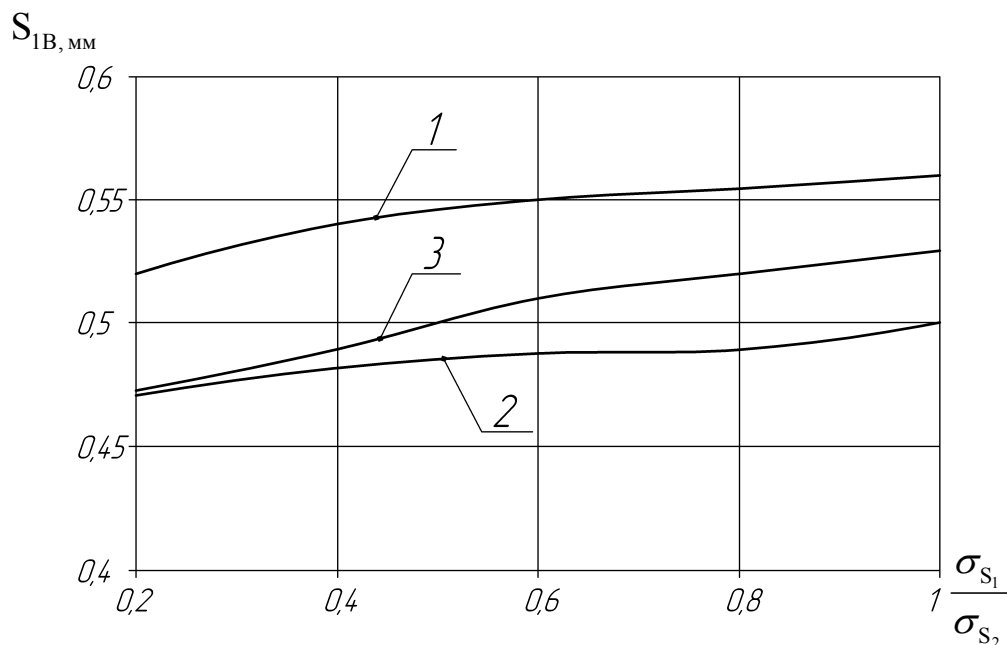


Рис. 1. Порівняння результатів розрахунку:

1 – ідеальнопластичний матеріал без врахування сил тертя; 2 – матеріал з врахуванням сил тертя; 3 – чисельний розрахунок

Порівняння результатів розрахунку ідеальнопластичного матеріалу без врахування сил тертя, який отримано в роботі [9], та розрахунку з врахуванням сил тертя за даною роботою показує, що при врахуванні сил тертя для процесу витягування з потоншенням на виході з матриці розрахункове потоншення шару матеріалу з меншими міцнісними властивостями ($\sigma_{S_1} < \sigma_{S_2}$) проявляється в більшому ступені. В результаті цього утворюється похибка при порівнянні даних розрахунку, яка не перевищує 10–11 %. Ця тенденція підтверджується також чисельним розрахунком. Взаємна чисельних результатів з результатами, що отримані в даній роботі, не перевищує 5–6 %.

Використання методики, що описана в роботі [9], дозволяє також провести аналіз напружено-деформованого стану металу в осередку деформацій. Таким чином показано, що результати отримані в роботі можливо використовувати при проектуванні процесів витягування з потоншенням двохшарових виробів.

ВИСНОВКИ

На основі теоретичного аналізу напружено-деформованого стану в осередку деформації з використанням поля швидкостей переміщень матеріальних часток та методу балансу потужностей отримана модель процесу витягування, що дозволяє розраховувати неоднорідність деформацій на виході заготовки. Запропонована модель враховує основні фактори, що впливають на процес деформування, такі як геометричні параметри шарів матеріалу та оснащення, механічні властивості шарів металу заготовки, сили контактного тертя та інші.

Теоретично методом балансу потужностей отримане рівняння, за допомогою якого, використовуючи метод простих ітерацій, розрахована величина товщини матеріалу, яка отримується на виході з матриці. Показано, що похибка результатів розрахунку для ідеальнопластичного матеріалу без врахування сил тертя та розрахунку з врахуванням сил тертя для процесу витягування з потоншенням не перевищує 10–11 %, а похибка з результатами чисельного розрахунку не перевищує 5–6 %.

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 // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – Київ : НТУУ «КПІ», 2006. – № 49. – (Серія «Машинобудування»).
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 // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – Київ : НТУУ «КПІ», 2009. – № 56. – С. 154–159. – (Серія «Машинобудування»).
4. 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 «Київський політехнічний інститут». – Київ : НТУУ «КПІ», 2010. – № 59. – С. 13–18. – (Серія «Машинобудування»).
5. 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 «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 45. – С. 34–42.
6. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1968. – 283 с.
7. Валиев С. А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов / С. А. Валиев. – М. : Машиностроение, 1973. – 176 с.
8. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов / Ю. Н. Алексеев. – Харьков : изд-во ХГУ, 1958. – 188 с.
9. Тітов В. А. Розрахунок напружено-деформованого стану при витягуванні з потоншенням двошарового металу / А. В. Тітов, Р. С. Борис // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 45–52.

Борис Р. С. – асистент НТУУ «КПІ»;

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

Вишневський П. С. – ст. викладач НТУУ «КПІ».

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

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

Стаття надійшла до редакції 02.03.2012 р.