

**В. В. Савуляк, к. т. н.; І. Ю. Мальований**

## **РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ОТРИМАННЯ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ З ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ПОКРИТТЯМ**

*У статті проаналізовано вплив параметрів покриття на напружено-деформований стан листової заготовки під час згинання. Для зменшення критичного радіусу згину на зовнішню поверхню основи запропоновано наносити покриття з меншою міцністю, ніж у матеріала основи. Виявлено оптимальні співвідношення міцностей основи й покриття для досягнення мінімальних радіусів згину.*

**Ключові слова:** напруження, деформації, листовий матеріал, згинання, плоский напружений стан, покриття.

### **Постановка завдання**

Листове штампування розглядають як один із перспективних методів виготовлення легких та міцних виробів складної конфігурації. Це дозволяє застосовувати конструкції, виготовлені на основі листових заготовок, для розв'язання надзвичайно широкого кола конструкторських завдань [1]. Але, слід зазначити, що в більшості випадків застосовують листові матеріали з покриттями, які дозволяють підвищити корозійну стійкість, мають кращі антифрикційні властивості й зовнішній вигляд, вищу температуростійкість тощо. На сьогодні існує велика кількість способів нанесення покриття на різноманітні поверхні, при чому найпродуктивнішим і найдешевшим є нанесення на плоскі й циліндричні поверхні. Водночас, деформування листових матеріалів із покриттям недостатньо розповсюджене через відсутність методики підбору фізико-механічних властивостей покриття для забезпечення мінімальних радіусів кривизни елементів виробу.

Оцінка можливої граничної деформації матеріалу в сучасній обробці тиском відбувається з використанням безрозмірних критеріїв, які ґрунтуються на діаграмах граничних деформацій та параметрах напружено-деформованого стану виробів [2]. В загальному випадку напружено-деформований стан деталей визначають за рівняннями рівноваги, зв'язку, суцільності середовища та граничними умовами деформування [3, 4].

Основними фізико-механічними параметрами металу, які визначають напружено-деформований стан і можливість подальшого деформування, є крива течкості та поверхня граничних деформацій. Ці основні характеристики залежні від структури матеріалу, хімічного складу, термічної обробки, швидкості прикладання й локалізації та виду навантаження. З усього вищезазначеного впливає, що, керуючи цими параметрами, можна збільшувати і зменшувати граничні радіуси згину листових заготовок для досягнення потрібного результату.

У цій роботі проведено аналіз впливу параметрів кривої течкості покриття на напружено-деформований стан підкладки під час формоутворення регулярних профілів із криволінійними ділянками.

### **Напружено-деформований стан листа з покриттям під час згинання**

Під час робочого ходу пуансона між поверхнями заготовки (основа + покриття) і пуансона та матриці виникають нормальні реакції та сили тертя, які для широкого листа в процесі згинання створюють плоский напружений стан [3, 5, 6], тобто деформація  $\varepsilon_z = 0$ .

Уважаємо товщину основи та покриття постійними й однаковими, та припускаючи, що заготовка відносно пуансона не переміщується [6], можна вважати напруження в зоні контакту пуансона й основи рівномірно розподіленими.

Математична модель процесу штампування ґрунтується на рівняннях рівноваги для плоского напруженого стану, рівняннях зв'язку та умові нерозривності, які доповнюються фізичними рівняннями рівноваги ділянки основи й покриття, що піддаються згинанню (рис. 1). Для випадку відсутності на зовнішній поверхні листа контактних напружень рівняння рівноваги ділянки заготовки матимуть вигляд

$$\begin{cases} \sigma'_{\rho 1} \cdot \sin \alpha \cdot r - \sigma''_{\rho 1} \cdot \sin \alpha \cdot (r + s_1) + 2 \int_r^{r+s_1} \sigma_{\theta 1} d\rho \cdot \sin \alpha = 0, \\ \sigma'_{\rho 2} \cdot \sin \alpha \cdot (r + s_1) + 2 \int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \sigma_{\theta 1} d\rho \cdot \sin \alpha = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\sigma_{\theta 1}, \sigma_{\theta 2}$  – тангенційні нормальні напруження в основі й покритті відповідно;  $\sigma_{\rho 1}, \sigma_{\rho 2}$  – радіальні нормальні напруження в основі й покритті відповідно;  $\sigma'_{\rho 1}$  – радіальне нормальне напруження в основі в зоні контакту основи й пуансону;  $\sigma''_{\rho 1}, \sigma'_{\rho 2}$  – радіальні нормальні напруження в зоні контакту основи й покриття відповідно;  $\alpha$  – кут згину, який має заготовка.

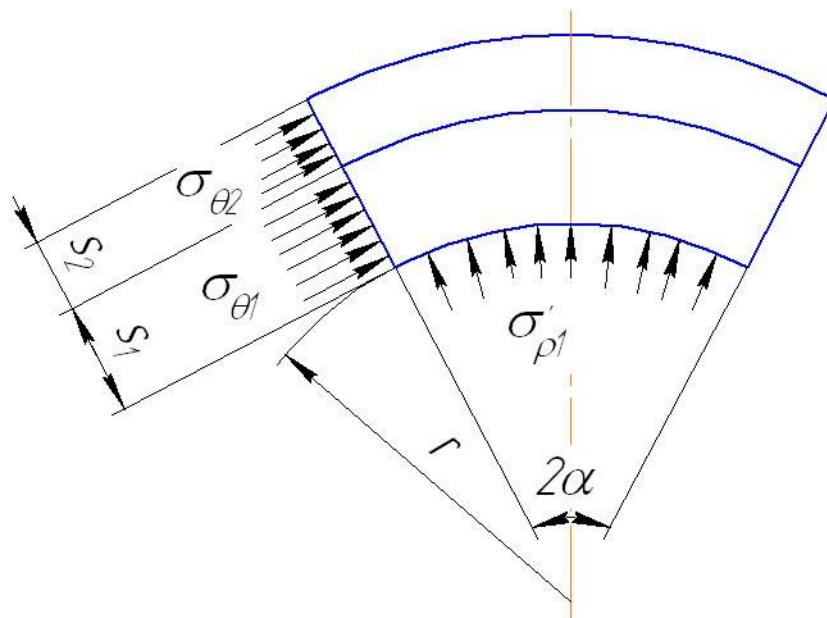


Рис. 1. Схематичне зображення елемента заготовки під час згинання

У процесі згинання в області, прилеглої до нейтральної поверхні з радіусом  $\rho_n$ , розташовується зона пружних деформацій. Відстань від нейтральної поверхні до краю зони  $\Delta_{np}$  пружних деформацій може бути розрахована [3]

$$\Delta_{np} = 2\rho_n \cdot \left(\frac{A}{E}\right)^{\frac{1}{1-n}}, \quad (2)$$

де  $A$  і  $n$  – параметри кривої зміцнення матеріалу;  $E$  – модуль пружності Юнга.

Для діапазону зміни параметрів кривої зміцнення  $A = 100 - 3000$  МПа і  $n = 0 - 0,5$ , які характерні для більшості конструкційних матеріалів, коефіцієнт  $\left(\frac{A}{E}\right)^{\frac{1}{1-n}}$  у рівнянні (2)

змінюється в межах від 0 до 0,015 (рис. 2). Для невеликих радіусів згину, співрозмірних із товщиною листа, зоною пружних деформацій, можна знехтувати. В [7] показано, що

радіальні і тангенційні нормальні напруження в зоні згину мало залежать від кута повороту перерізу, тому можна вважати, що тангенційні нормальні напруження мають лінійний розподіл по товщині (для листів товщиною до 3 мм) і можуть бути представлені у вигляді

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta 1} &= a_1(\rho - \rho_n), \\ \sigma_{\theta 2} &= a_2(\rho - \rho_n), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $a_1$  і  $a_2$  – константи.

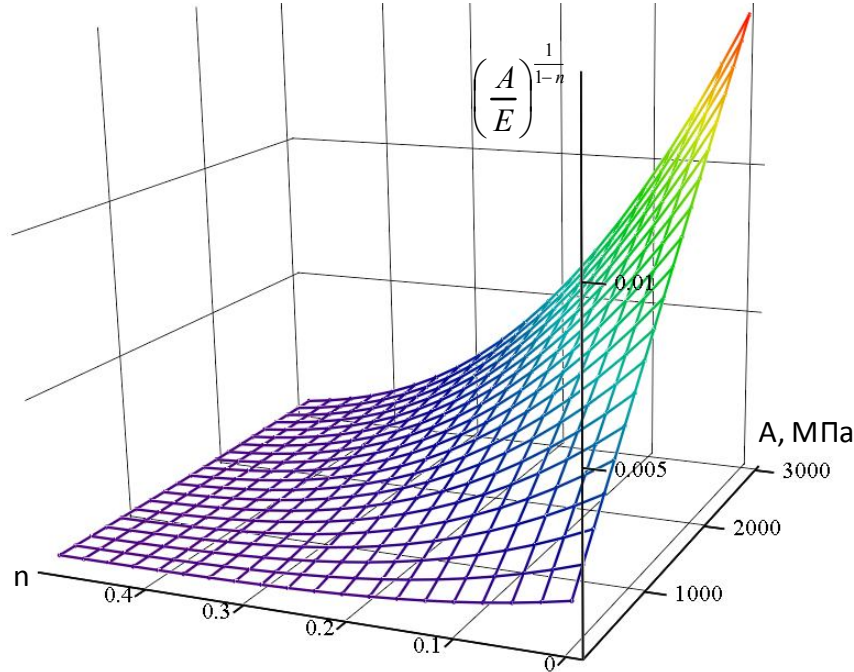


Рис. 2. Залежність відносної ширини зони пружної деформації сталевго листа від параметрів кривої зміцнення  $A$  і  $n$

За відсутності розривів на межі розділу покриття й основи  $\sigma''_{\rho 1} = \sigma'_{\rho 2}$ . Перетворюючи (1), отримаємо

$$\frac{\sigma'_{\rho 1} \cdot r}{s_1 \cdot s_2} + \frac{2}{s_2} \frac{\int_r^{r+s_1} \sigma_{\theta 1} d\rho}{s_1} + \frac{2}{s_1} \frac{\int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \sigma_{\theta 2} d\rho}{s_2} = 0, \quad (4)$$

де  $\frac{\int_r^{r+s_1} \sigma_{\theta 1} d\rho}{s_1}$  і  $\frac{\int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \sigma_{\theta 2} d\rho}{s_2}$  – середні тангенційні нормальні напруження.

Сила в площині перерізу, з якою пуансон діє на лист, може бути представлена

$$P = \int_0^\alpha r \cdot \sigma'_{\rho 1} \cdot \cos \theta d\theta - 2 \sin \alpha \int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \sigma_{\theta 2} d\rho - 2 \sin \alpha \int_r^{r+s_1} \sigma_{\theta 1} d\rho. \quad (5)$$

На основі припущення про рівномірний розподіл нормального радіального напруження в зоні контакту листа й пуансона та з (4)

$$\sigma'_{\rho 1} = \frac{P}{3r \cdot \sin \alpha}. \quad (6)$$

Підставляючи в (4) вирази (3) і (6) та перетворюючи їх, запишемо

$$a_2 = -\frac{\frac{P}{3 \sin \alpha} + 2a_1(0,5s_1^2 + r \cdot s_1 - \rho_n \cdot s_1)}{2(0,5s_2^2 + r \cdot s_2 + s_1 \cdot s_2 - \rho_n \cdot s_2)}. \quad (7)$$

Оскільки, як відзначалось раніше, напружений стан плоский і контакт листа й пуансона в усіх напрямках нерухомий, то на основі рівнянь зв'язку й сумісності деформацій у зоні контакту основи і пуансона отримаємо

$$\sigma' = \sigma'_z = \sigma'_{\rho_1} \cdot f, \quad (8)$$

$$\sigma'_{\rho_1} = -\sigma'_{\theta_1} + 2\sigma', \quad (9)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя між листом і пуансоном;  $\sigma'$  – гідростатичний тиск у зоні контакту пуансона і заготовки.

Із (8) і (9) слідує

$$a_1 = \frac{P \cdot (1 - 2f)}{3r \cdot \sin \alpha \cdot (r - \rho_n)}. \quad (10)$$

У рівнянні (10) невідомою величиною є лише радіус кривизни нейтральної поверхні. Для його визначення в роботі [8] використано вираз

$$\rho_n = r + K \cdot s, \quad (11)$$

де  $K = \frac{t}{s}$  – константа, яка залежить від властивостей кривої течії, радіуса кривизни внутрішньої поверхні листа та способу згинання;  $t$  – відстань від внутрішньої поверхні заготовки до нейтральної поверхні [8]. У [8] зазначено, що зі збільшенням міцності матеріалу або радіуса  $r$   $K$ -фактор збільшується і змінюється в межах від 0,33 до 0,5. Автори [9] для  $r < 2s$  рекомендують приймати коефіцієнт  $K = 0,33$ , а для  $r > 2s$  фактор  $K = 0,5$ . Однак у виразі (11) застосовано товщину  $s$  однорідного шару металу, тобто для її застосування необхідно визначити приведену товщину покриття  $s_{np}$ . Авторами запропоновано визначити  $s_{np}$  на основі однакової інтенсивності напружень для покриття і листа заміщення

$$\int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \sigma_{u2} d\rho = \int_{r+s_1}^{r+s_{np}} \sigma_{u1} d\rho, \quad (12)$$

або

$$A_2 \int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \left( \ln \left( \frac{\rho}{\rho_n} \right) \right)^{n_2} d\rho = A_1 \int_{r+s_1}^{r+s_{np}} \left( \ln \left( \frac{\rho}{\rho_n} \right) \right)^{n_1} d\rho, \quad (13)$$

де  $\sigma_u = Ae_u^n$  – інтенсивність напружень;  $e_u = \ln(\rho/\rho_n)$  – ступінь деформації;  $A_1$  і  $n_1$  – параметри кривої течії матеріалу основи;  $A_2$  і  $n_2$  – параметри кривої течії матеріалу покриття.

Розв'язком рівняння (13) можна скористатися для визначення  $\rho_n$  з (11) або за виразом  $\rho_n = \sqrt{r(r + s_1 + s_{np})}$  [4] ( $r$  – радіус кривизни внутрішньої поверхні;  $s_{np}$  – приведена товщина покриття;  $s_1$  – товщина основи).

Отже, на основі виразів (6), (7) та (10) і чисельного розв'язку рівняння (13) отримуємо граничні умови для визначення напружено-деформованого стану під час згинання. Аналіз (13) показує, що покриття міцніше за основу дозволяє змістити радіус кривизни до зовнішньої поверхні і за рахунок цього зменшити деформації розтягу, які сприяють найшвидшому використанню ресурсу пластичності.

Для плоского напруженого стану інтенсивність напружень може бути розрахована  
 Наукові праці ВНТУ, 2012, № 2

$$\sigma_{u1} = A_1 \cdot \left( \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^{n_1} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{\rho 1} - \sigma_{\theta 1})^2 + (\sigma_{\theta 1} - \sigma_{z 1})^2 + (\sigma_{z 1} - \sigma_{\rho 1})^2} + \frac{3}{2} \tau_{\rho \theta 1}. \quad (14)$$

Ураховуючи, що  $\sigma_{z 1} = \sigma_1 = \frac{\sigma_{\rho 1} + \sigma_{\theta 1}}{2}$  з (14), запишемо

$$\tau_{\rho \theta 1} = \sqrt{\frac{4}{3} A_1^2 \left( \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^{2n_1} - (\sigma_{\rho 1} - \sigma_{\theta 1})^2}. \quad (15)$$

Із рівнянь рівноваги для плоского напруженого стану після перетворень можна записати

$$\sigma_{\rho 1} = a_1 \left( \frac{\rho}{2} - \rho_n \right) - \int_0^{\theta} \left( \rho \cdot \frac{\partial \tau_{\rho \theta 1}}{\partial \rho} + 2\tau_{\rho \theta 1} \right) d\theta. \quad (16)$$

Із сукупності виразів (15), (16) і (3), підставляючи (7) і (10), за допомогою чисельних методів можна визначити напружено-деформований стан заготовки в процесі деформування та підібрати покриття з параметрами кривої зміцнення, що забезпечують можливість отримання мінімальних радіусів кривизни.

### Висновки

1. Представлена математична модель формування заготовок із листового матеріалу з покриттям дозволяє розрахувати напружено-деформований стан у зонах листа, які піддають згинанню.

2. Проведений аналіз показав, що підбір покриття з певними характеристиками кривої зміцнення дозволяє впливати на величину компонентів тензора напружень і, відповідно, на показник напруженого стану.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тришевский О. И. Снижение металлоёмкости гнутых профилей за счёт деформационного упрочнения / О. И. Тришевский, Е. Г. Полстянкин, Р. Ю. Дебердеев // Сталь. – 1988. – № 8. – С. 36 – 37.
2. Дель Г. Д. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением / Г. Д. Дель, В. А. Огородников, В. Г. Нахайчук // Изв. вузов. Машиностроение. – 1975. – № 4. – С. 135 – 140.
3. Лысов М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М. И. Лысов. – М.: Машиностроение, 1966. – 236 с.
4. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
5. Savuliak V. Modelling of the process of regular profiles stamping from sheet materials / V. Savuliak // Buletinul institutului politehnic din Iasi. – 2011. – Tomul LVII (LXI). Fasc.4. – P. 199 – 208.
6. Вплив тертя на процес штампування регулярних профілів з листових матеріалів заготовок [Електронний ресурс] / В. В. Савуляк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2011. – № 3. Режим доступу до журн.: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011\\_3/2011-3.files/uk/11vvstsm\\_ua.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_3/2011-3.files/uk/11vvstsm_ua.pdf).
7. Сивак І. О. Дослідження процесу виготовлення гофрованих / І. О. Сивак, В. В. Савуляк // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – 2005. – С. 287 – 290.
8. Pahole I. Bending of sheet metal of complicated shapes (for 90° angle and more) in combined tools / I. Pahole, S. Bonifarti, M. Ficko, B. Vaupotic, S. Kovacic, J. Balic // Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering. – Vol. 16, Issue 1 – 2, 2006. – P. 88 – 93.
9. Hakim S. Sultan Aljibori. Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process / Hakim S. Sultan Aljibori, Abdel Magid Hamouda // European Journal of Scientific Research.. – Vol.33, № 1. – 2009. – P. 57 – 69.

**Савуляк Віктор Валерійович** – к. т. н., доцент кафедри технології та автоматизації машинобудування.

**Мальований Ігор Юрійович** – студент.

Вінницький національний технічний університет.