

В. В. Савуляк, канд. техн. наук; В. О. Ницимайло, студ.

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІНІМАЛЬНИХ РАДІУСІВ ЗГИНУ

Розглянуто вплив фізико-механічних і геометричних параметрів металічного покриття та основи на інтенсивність деформацій та величину зони розтягу, яка виникає в процесі згинання листової заготовки. Запропоновано підхід та математичну модель до розрахунку радіусу кривизни нейтральної поверхні. Для зменшення допустимих радіусів згину запропоновано підбирати матеріали покриття з найменшою відносною швидкістю зміцнення та найвищим відносним коефіцієнтом кривої течії.

Актуальність проблеми та постановка задачі

Операції гнуття дуже поширені в процесах виготовлення тонкостінних виробів складної форми. Такі елементи конструкцій достатньо легкі, але в багатьох випадках потребують додаткового захисту, декорування, зміцнення тощо. Для цього використовують різноманітні покриття (в т. ч. металічні), які наносять, в більшості випадків, на готові вироби. Проте, такі способи нанесення покриттів є технологічно складнішими і мають нижчу продуктивність в порівнянні з нанесенням на плоску листову заготовку. Основною проблемою, яка постає перед розробниками технологічних процесів і покриттів є підбір такого співвідношення параметрів основи і покриття, яке б забезпечувало якісний і стабільний процес виготовлення виробів методами обробки металів тиском та не призводило б до утворення значної кількості мікротріщин у покритті.

Для забезпечення стабільної якості виробів необхідно визначити вплив фізико-механічних та геометричних параметрів металічних основи і покриття на інтенсивність деформацій, як одну з характеристик використання ресурсу пластичності.

Основна частина

Одним з основних показників якості процесу обробки металу тиском є відсутність в заготовці мікро- і макротріщин, що може бути охарактеризовано безрозмірним показником — використаним ресурсом пластичності ψ [1]. Цей показник визначається на основі діаграм граничних деформацій та параметрів напружено-деформованого стану виробів [1]. В загальному випадку напружено-деформований стан деталей визначається за рівняннями рівноваги, фізичними рівняннями, суцільності середовища та краєвими умовами деформування [2, 3]. Дослідження процесу гнуття листового матеріалу виконано у працях [4, 5], де відзначено, що визначальними факторами у використанні ресурсу пластичності є схема напруженого стану і величина граничних деформацій. Якщо схема напруженого стану залежить від швидкості прикладання, локалізації та виду навантаження, то на величину граничних деформацій основний вплив чинить структура матеріалу, його хімічний склад і термічна обробка, тобто ті самі фактори, що визначають вид і форму кривої течії. Для процесу гнуття широкого листа в [2] обґрунтовано застосування схеми плоского напруженого стану. Тоді, згідно з [1]

$$\psi = \int_0^{e_u^*} n \frac{e_u^{n-1}}{(e_p(\eta))^n} de_u, \quad (1)$$

де $e_u = \int_0^t \dot{\epsilon}_u d\tau$ — ступінь деформації; $\dot{\epsilon}_u$ — інтенсивність швидкостей деформацій;

$e_p(\eta)$ — крива граничних деформацій; $e_p = \int_0^{t_p} \dot{\epsilon}_u d\tau$ — ступінь деформації у разі руйнування;

t_p – час деформування до руйнування; $n = 1 + 0,2 \arctg \frac{d\eta}{de_u}$; $\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u}$ – показник напруженого стану; $\sigma = \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{ij}$ – середнє (гідростатичне) напруження; σ_u – інтенсивність напружень.

Якщо знехтувати зміною довжини нейтральної лінії і пов'язаною з цим немонотонністю, то

$$e_u = \ln \frac{\rho}{\rho_H}, \tag{2}$$

де ρ_H – радіус кривизни нейтральної поверхні; ρ – радіальна координата точки.

В роботі Ренне [6] радіус кривизни нейтральної поверхні для випадку плоского напруженого стану під час згинання у запропоновано знаходити так:

$$\rho_H = \sqrt{R \cdot r} = \sqrt{r(r+s)} \tag{3}$$

або за допомогою емпіричних коефіцієнтів [7]

$$\rho_H = r + K \cdot s, \tag{4}$$

де r – радіус кривизни внутрішньої поверхні листа; $K = t/s$ – константа (визначається експериментально), яка залежить від властивостей кривої течії, радіусу кривизни внутрішньої поверхні листа та способу гнуття; t – відстань від внутрішньої поверхні заготовки до нейтральної поверхні ($t = \rho_H - r$); s – товщина листа.

В [7] зазначено, що зі збільшенням міцності матеріалу або радіусу r K -фактор збільшується і змінюється в межах від 0,33 до 0,5. Таким чином, визначення радіусу кривизни нейтрального шару, напружено-деформованого стану і використаного ресурсу пластичності для листової заготовки під час згинання є складовими однієї задачі. Проте, вирази (3) і (4) можуть бути застосовані лише для матеріалу з постійними по товщині листа фізико-механічними властивостями. Застосовуючи матеріали з покриттями, в процесі розрахунку напружено-деформованого стану заготовки постає питання визначення радіусу кривизни нейтральної поверхні. Автором запропоновано визначати її на основі виразу (3) з врахуванням того, що

$$s = s_1 + s_{пп}, \tag{5}$$

де s_1 – товщина листа основи; $s_{пп}$ – зведена товщина покриття.

Під зведеною товщиною покриття матимемо на увазі таку товщину $s_{пп}$, з якою інтеграл інтенсивності напружень в покритті товщиною s_2 з параметрами кривої течії A_2 і n_2 дорівнює інтегралу інтенсивності напружень в покритті з параметрами кривої течії A_1 і n_1 . Відповідно до цього запишемо

$$\int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \sigma_{u2} d\rho = \int_{r+s_1}^{r+s_{пп}} \sigma_{u1} d\rho \tag{6}$$

або

$$A_2 \int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \left(\ln \left(\frac{\rho}{\rho_H} \right) \right)^{n_2} d\rho = A_1 \int_{r+s_1}^{r+s_{пп}} \left(\ln \left(\frac{\rho}{\rho_H} \right) \right)^{n_1} d\rho, \tag{7}$$

де $\sigma_u = Ae_u^n$; A_1 і n_1 – параметри кривої течії матеріалу основи; A_2 і n_2 – параметри кривої течії матеріалу покриття; s_2 – вихідна товщина покриття.

Числовий розв'язок (7) і його подальша апроксимація дозволили отримати математичну модель впливу на зведену товщину покриття $s_{пп}$ співвідношення геометричних і фізико-механічних параметрів покриття і основи

$$s_{пп} = s_2 \cdot 10^{-6} \left(k_1 + k_2 \lg(s_1) - \frac{k_3 \lg(s_1)}{s_1} \right) \cdot \left(\frac{s_1}{r} \right)^{m_1 s_1 - m_2} \cdot f_A \cdot f_n, \tag{8}$$

$$\text{де } k_1 = 92,5 \frac{s_2}{s_1} + 814; \quad k_2 = -6,9 \frac{s_2}{s_1} + 21; \quad k_3 = \frac{-6(s_2/s_1)}{(0,115 + (s_2/s_1))}; \quad m_1 = 0,0079(1 + (s_2/s_1))^{-0,949};$$

$$m_2 = 0,20065 + 0,0011 \frac{s_2}{s_1} + 0,00003 \frac{\lg(s_2/s_1)}{(s_2/s_1)^2}; \quad f_n = e^{-0,0122 + 1,35n_1} (-0,228 + 1,232e^{-n_1})^{n_2/n_1};$$

$$f_A = -0,167(A_2/A_1)^4 + 8,39(A_2/A_1)^3 - 134(A_2/A_1)^2 + 1120(A_2/A_1) + 52.$$

З (8), для конкретних геометричних і фізико-механічних параметрів покриття і основи можна легко визначити зведену товщину покриття і на основі (5) та (3) розрахувати радіус кривизни нейтральної поверхні. Керуючи розташуванням ρ_H , за рахунок вибору відповідних параметрів A_2 і n_2 , можна змінювати деформації розтягу і стиску, напруженнями в матеріалі та управляти величиною використаного ресурсу пластичності основи і покриття, що дозволить сформулювати виріб з необхідною кривизною [8].

На основі (8) побудовані залежності розташування нейтрального шару відносно зовнішньої поверхні листа Δ (рис. 1–3) ($\Delta = r + s_1 + s_2 - \rho_H$).

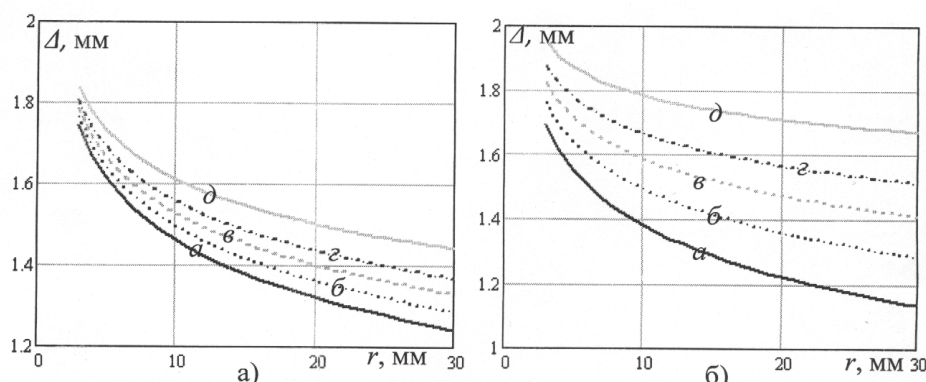


Рис. 1. Вплив співвідношення швидкості зміцнення покриття і основи на відстань від зовнішньої поверхні до нейтрального шару для $s_1 = 2$ мм, $s_2 = 1$ мм, $A_2/A_1 = 1$: а) $n_1 = 0,1$; б) $n_1 = 0,3$; криві: а – $n_2/n_1 = 0,5$; б – $n_2/n_1 = 1$; в – $n_2/n_1 = 1,5$; г – $n_2/n_1 = 2$; д – $n_2/n_1 = 3$

З рис. 1 випливає, що зменшення величини n_1 і n_2/n_1 зумовлює до переміщення нейтрального шару в бік зовнішньої поверхні, що дозволяє зменшити ширину зони розтягу. Аналіз рисунків 2 і 3 показує, що з цією ж метою потрібно збільшувати співвідношення A_2/A_1 та зменшувати відносну товщину покриття.

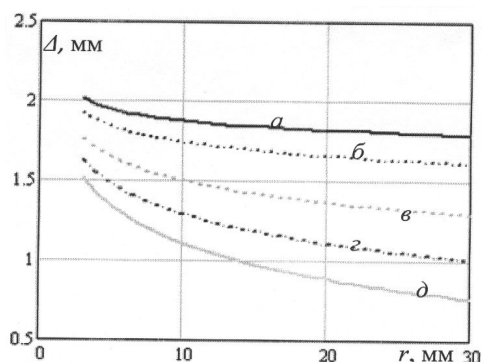


Рис. 2. Вплив співвідношення коефіцієнтів A_2 і A_1 на відстань від зовнішньої поверхні до нейтрального шару для $s_1 = 2$ мм, $s_2 = 1$ мм, $n_2/n_1 = 1$; криві: а – $A_2/A_1 = 0,25$; б – $A_2/A_1 = 0,5$; в – $A_2/A_1 = 1$; г – $A_2/A_1 = 1,5$; д – $A_2/A_1 = 2$

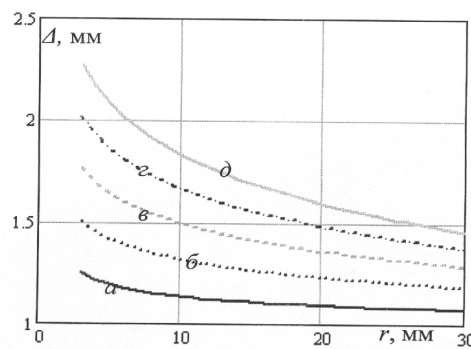


Рис. 3. Вплив співвідношення товщини s_2 і s_1 основи і покриття на відстань від зовнішньої поверхні до нейтрального шару для $s_1 = 2$ мм, $A_2/A_1 = 1$, $n_2/n_1 = 1$; криві: а – $s_2/s_1 = 0,1$; б – $s_2/s_1 = 0,3$; в – $s_2/s_1 = 0,5$; г – $s_2/s_1 = 0,7$; д – $s_2/s_1 = 0,9$

Маючи відомості про історію деформування та криву граничних деформацій, з'являється можливість управління використанням ресурсу пластичності та величиною допустимого радіусу згину заготовки з покриттям.

Для оцінки ефективності застосування різних параметрів оцінимо їх вплив за величиною інтенсивності деформацій, як одним з показників, що впливає на величину використаного ресурсу пластичності [1]. Відповідно до (2) і (8) отримані залежності інтенсивності деформацій в точці на зовнішній поверхні покриття (рис. 4, 5).

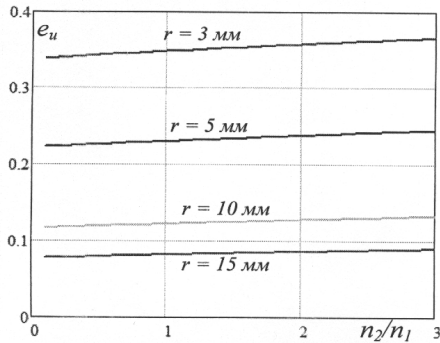


Рис. 4. Вплив співвідношення швидкостей зміцнення покриття і основи на інтенсивність деформацій $e_u (\rho = r + s_1 + s_2)$ для різних радіусів згину r

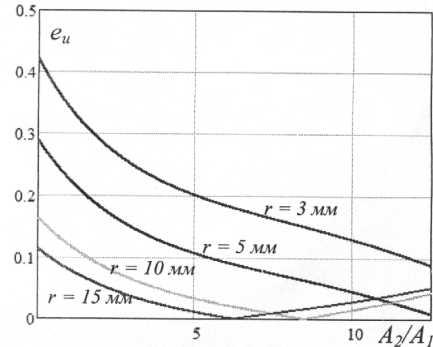


Рис. 5. Вплив співвідношення коефіцієнтів кривої течії A_2 і A_1 покриття і основи на інтенсивність деформацій $e_u (\rho = r + s_1 + s_2)$ для різних радіусів згину r

Висновки

Таким чином, для зменшення ширини зони розтягу необхідно наносити відносно тонкі металічні покриття з відносно великим співвідношенням A_2/A_1 і низькою відносною швидкістю зміцнення.

Найбільший вплив на інтенсивність деформацій мають покриття з товщиною до 0,1 від товщини основи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Лысов М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М. И. Лысов. — М. : Машиностроение, 1966. — 236 с.
3. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. — М. : Машиностроение, 1977. — 278 с.
4. Savuliak V. Modeling 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.
5. Савуляк В. В. Вплив тертя на процес штампування регулярних профілів з листових матеріалів [Електронний ресурс] / В. В. Савуляк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. — 2011. — № 3. — Режим доступу : http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_3/2011-3.files/uk/11vvstsm_ua.pdf.
6. Ренне И. П. Пластический изгиб листовой заготовки / И. П. Ренне // Труды Тульского механического института. — вып. 4. — М. : Оборонгиз, 1950. — С. 23—28.
7. Pahole I. Bending of sheet metal of complicated shapes (for 90o angle and more) in combined tools / I. Pahole, S. Bonifarti, M. Ficko, V. Vaupotic, S. Kovacic, J. Balic // Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering. — Vol. 16, Issue 1—2, 2006. — P. 88—93.
8. Савуляк В. В. Пластичне деформування тонколистового матеріалу в умовах значних локалізацій деформацій та напружень : моногр. / В. В. Савуляк, І. О. Сивак, В. І. Савуляк // Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. — 150 с.

Рекомендована кафедрою технології та автоматизації машинобудування

Стаття надійшла до редакції 17.05.12

Рекомендована до друку 19.06.12

Савуляк Віктор Валерійович — доцент кафедри технології та автоматизації машинобудування;
Ницимайло Вячеслав Олегович — студент Інституту машинобудування та транспорту.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця