

УДК 621.919

О. В. Грушко, к. т. н., доц.

## ДІАГНОСТУВАННЯ ГРАНИЧНОГО ФОРМОЗМІНЮВАННЯ ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглянуто можливість діагностування стану граничного формозмінювання заготовок в операціях листового штампування, обумовленого втратою стійкості пластичного формоутворення щодо місцевих стоншень, гофрування та деформовності.

### Постановка задачі

Характерною рисою низки наукомістких операцій листового штампування (гнуття, витягування зі стоншенням стінки, відбортовка, гнуття труб тощо [1—4]), є обмеження можливостей процесів граничними деформаціями матеріалу заготовок. Діагностування механічно-технологічного стану матеріалу та формозмінюваної заготовки надає проектувальнику можливість призначати безпечні значення технологічних параметрів, розмірів деталі, технологічних режимів, обирати оптимальні параметри машин та устаткування. Обмеження зазвичай пов'язані з вичерпанням пластичності металу з подальшим порушенням суцільності заготовки у вигляді макротріщин, порушенням умов стійкості пластичного деформування, що приводять до локальних місцевих стоншень стінки (втрата стійкості 1-го роду), або гофрування чи відхилення від початкової форми (втрата стійкості 2-го роду). Зазначені явища є ознакою непридатності заготовок, і надалі ми будемо називати їх технологічними відмовами.

Задачею роботи є діагностування стану граничного формозмінювання, тобто аналіз і кількісна оцінка граничних деформацій матеріалу заготовок в операціях листового штампування за умовами стійкості пластичного деформування і деформовності.

Деформування листових заготовок у більшості випадків є близьким до монотонного і характеризується плоским напруженим станом, що підтверджується низкою досліджень, наприклад [2]. Тому розглянемо критерії деформовності і стійкості, що задовольняють цим умовам.

### Енергетичний критерій стійкості

На сьогодні отримала поширення інженерна теорія стійкості пластичного деформування. Короткий огляд критеріїв подано у [4]. Візьмемо за основу критерій додатності роботи додаткових навантажень, як найуніверсальніший. Відповідно до цього критерію, деформування оболонки буде стійким, якщо

$$\sum_i dP_i dl_i > 0, \quad (1)$$

де  $dP_i$  — узагальнені сили, що викликали узагальнені переміщення  $dl_i$ .

Розглядаємо загальний випадок. На рис. 1 показані напруження, що діють на елементарний об'єм металу елемента і які викликають відповідні деформації. [1, 2]. Схема складена для напружень розтягу — найнебезпечніший вид напруженого стану з погляду втрати стійкості (у тому числі і деформовності). Елемент має подвійну кривизну: у напрямку  $\alpha$  —  $1/r$ , у напрямку  $\theta$  —  $1/R$ . Матеріал заготовки вважаємо ізотропним, зі здатністю до анізотропного зміцнення за експоненціальним законом (наприклад,  $\sigma_i = Ae_i^n$ , де  $A$  та  $n$  — коефіцієнти апроксимації кривої течії).

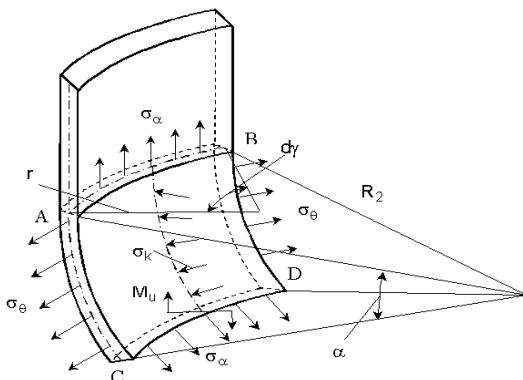


Рис. 1. Схема напруженого стану елемента

Критерій (1) набуде такого вигляду (впливом поперечних сил і згинальними моментами в окруж-

ному напрямку через їх малість у порівнянні з іншими зусиллями нехтуємо [2])

$$dP_\alpha d\alpha R_2 + dP_\theta d\theta r + dM_u d\alpha + dP_k R d\alpha > 0, \quad (2)$$

де  $dP_k R d\alpha$  — робота додаткових контактних навантажень і сили тертя, які направлені вздовж поверхні контакту;  $dM_u d\alpha$  — робота додаткових згинальних моментів у меридіональному перерізі.

Сили пов'язані з відповідними напруженнями співвідношеннями

$$P_\alpha = \sigma_\alpha \theta r s; \quad P_\theta = \sigma_\theta \alpha R s,$$

де  $\sigma_\alpha$  і  $\sigma_\theta$  — головні напруження в меридіональному й окружному перерізах заготовки відповідно;  $S$  — поточна товщина стінки заготовки.

У загальній постановці задачі у вигляді критерію (2) розв'язок поки ще не знайдений. Тому надалі знехтуємо роботою додаткових контактних навантажень  $dP_k R d\alpha$  і згинальних моментів  $dM_u d\alpha$  через те, що їхній внесок у вираз (2) у порівнянні з іншими членами незначний. Це впливає з аналізу основних способів листового штампування [2].

Нерівність (2) після відповідних перетворень, можна переписати у вигляді

$$d\sigma_\alpha de_\alpha \frac{R}{r} + d\sigma_\theta de_\theta \frac{r}{R} > \sigma_\alpha de_\alpha \frac{R}{r} \left( de_\alpha - \frac{dR}{R} \right) + \sigma_\theta de_\theta \frac{r}{R} \left( de_\theta - \frac{dr}{r} \right). \quad (3)$$

Якщо радіуси  $R, r$  постійні, то

$$d\sigma_\alpha de_\alpha \frac{R}{r} + d\sigma_\theta de_\theta \frac{r}{R} > \sigma_\alpha de_\alpha^2 \frac{R}{r} + \sigma_\theta de_\theta^2 \frac{r}{R}, \quad (4)$$

де  $e_\alpha, e_\theta$  — головні деформації в меридіональному й окружному перерізах.

Позначимо відносну кривизну оболонки  $\rho = \frac{R}{r}$ , тоді

$$d\sigma_\alpha de_\alpha \rho + \frac{d\sigma_\theta de_\theta}{\rho} > \sigma_\alpha de_\alpha^2 \rho + \frac{\sigma_\theta de_\theta^2}{\rho}. \quad (5)$$

Залежності між компонентами напружень і деформацій для плоского напруженого стану мають вигляд (з урахуванням  $k = \sigma_\alpha / \sigma_\theta$ ) [4]:

$$de_\theta = \frac{2-k}{2\sqrt{1-k+k^2}} de_i; \quad de_\alpha = \frac{2k-1}{2\sqrt{1-k+k^2}} de_i; \quad \sigma_i = \sigma_\theta \sqrt{1-k+k^2}, \quad (6)$$

де  $e_i$  — інтенсивність деформацій;  $\sigma_i$  — інтенсивність напружень.

Підставивши співвідношення (6) у нерівність (5), отримаємо умову стійкості у вигляді

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\sigma_i}{de_i} > \frac{k(2k-1)^2 \rho + \frac{(2-k)^2}{\rho}}{2\sqrt{1-k+k^2} \left( k(2k-1)\rho + \frac{(2-k)}{\rho} \right)} + (A+B-C) \frac{dk}{de_i}; \quad (7)$$

$$A = \frac{(2k^2-k)(2k-1)}{2(1-k+k^2)} \rho; \quad B = \frac{(2k-1)(2-k)}{1-k+k^2} \frac{1}{\rho}; \quad C = (2k-1)\rho,$$

де  $Z$  — піддотична до кривої течії матеріалу при деформації, яка дорівнює критичній ( $Z = e_{кр} / n$  при апроксимації кривої течії степеневу залежністю  $\sigma_i = A e_i^n$  [4]).

Для простого деформування  $\frac{dk}{de_i} = 0$  і критерій (7) отримає вигляд

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\sigma_i}{de_i} > \frac{k(2k-1)^2 \rho + (2-k)^2 \frac{1}{\rho}}{2\sqrt{1-k+k^2} \left( k(2k-1)\rho + (2-k)\frac{1}{\rho} \right)}. \quad (8)$$

Поставивши знак рівності в співвідношенні (8) і задавши необхідні значення аргументів, розрахують критичну деформацію, при якій виникне місцеве стоншення стінки заготовки.

Зазначимо, що у разі двохосового розтягу листа  $\rho = 1$ , і тоді критерій (8) набуває вигляду [4]

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\sigma_i}{de_i} > \frac{4 - 3k - 3k^2 + 4k^3}{4(1 - k + k^2)^{3/2}}. \quad (9)$$

З критерію (8) випливає, що з рівними відносними радіусами кривини  $\rho = \frac{R}{r} = 1$  критична деформація буде такою ж, як і за відсутності кривини. Наприклад, у літературі описані методики дослідів листових зразків на двохосове розтягання—видавлювання сферичним пуансоном ямки у випробуваному листовому матеріалі до перших ознак утрати стійкості або руйнування. У цьому випадку напружений стан — плоский з наявністю подвійної кривини однакового значення в осередку деформації. Таким чином, отримане значення критичної деформації відповідає двохосовому розтягання листа за відсутності кривини.

### Феноменологічний критерій деформовності

За основу побудови моделі скористаємося деформаційним критерієм, який ґрунтується на нелінійній теорії накопичення ушкоджень [2, 3]. Цей критерій можна використовувати для оцінки ресурсу пластичності матеріалу для процесів, де реалізуються умови складного або простого монотонного деформування. Точність розрахунку за цим критерієм залежить, головним чином, від точності розрахунку напружено-деформованого стану матеріалу і його змінювання в процесі. Критерій має вигляд

$$\Psi = \int_0^{e_i^*} (1 + 0,2f) \frac{e_i^{0,2f}}{[e_p(\eta(e_i))]^{1+0,2f}} de_i \leq 1, \quad (10)$$

де  $f = \arctg \frac{d\eta}{de_i}$ ;  $e_i$  — інтенсивність деформацій;  $e_i^*$  — значення накопиченої інтенсивності деформацій матеріалу в небезпечній області;  $e_p(\eta(e_i))$  — значення діаграми пластичності, що відповідає значенню  $e_i$  шляху деформування;  $\eta$  — показник напруженого стану.

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_i}, \quad (11)$$

де  $\sigma$  — середнє нормальне напруження.

Діаграма пластичності [1, 4] є технологічною функцією матеріалу, і може бути зображена в координатах: показник напруженого стану —  $\eta$ , гранична до руйнування деформація —  $e_p$ . Крива будується за результатами механічних випробувань зразків матеріалу з подальшою апроксимацією. У кожному випадку зразки доводяться до руйнування або до моменту появи перших тріщин. Кожна точка діаграми пластичності — гранична деформація при плоскому напруженому стані і простому навантаженні.

За аналогією з діаграмою пластичності можна побудувати діаграму граничних стійких пластичних деформацій, використовуючи критерій у вигляді (8) для розглянутого матеріалу з тими самими гіпотезами: кожна точка діаграми стійкості — гранична деформація при плоскому напруженому стані і простому навантаженні  $\frac{dk}{de_i} = 0$ .

Таким чином, дві діаграми, побудовані в тих самих координатах, будуть характеризувати область гранично допустимих деформацій. Координатна площина може бути обрана на осях  $\eta$  —  $e_p$

або  $k = e_p$ .

Параметри  $\eta$  і  $k$  зв'язані між собою співвідношенням (6) і (11)

$$\eta = \frac{\sigma_\alpha + \sigma_\theta}{\sigma_i} = \frac{1 + k}{\sqrt{1 - k + k^2}} \quad (12)$$

Однак існує взаємна неоднозначність між  $\eta$  і  $k$ , тому графіки потрібно будувати для різних співвідношень цих параметрів. Наприклад, для  $k < 1$  і  $k \geq 1$ .

### Енергетичний критерій гофроутворення

Схема напружень, які створюють небезпечний стан щодо утворення складок (гофр) відповідає двохосовому стиску в напрямках головних кривин елемента при плоскому напруженому стані [1, 2, 7]. На рис. 1 потрібно лише змінити напруження на напруження стиску.

Для розрахунків граничних стійких деформацій може бути застосований енергетичний метод, який полягає у тому, що з усіх можливих деформацій поперечного перерізу оболонки друга варіація повної енергії системи додатна  $\delta^2 \mathcal{E} \geq 0$ . Основне рівняння втрати стійкості оболонки має вигляд [7]

$$\iint \left[ W + 0,5s (\sigma_1 \omega_1^2 + \sigma_2 \omega_2^2 + 2 \tau_{12} \omega_1 \omega_2) \right] df = 0, \quad (13)$$

де  $s$  — товщина стінки;  $\omega_1, \omega_2$  — деформації в головних напрямках (1 і 2);  $\tau_{12} = \tau_{\alpha\theta} = 0$  — дотичне напруження;  $\sigma_1 = \sigma_\alpha, \sigma_2 = \sigma_\theta$  — нормальне напруження;  $W$  — потенціал моментів.

$$W = \delta M_1 \chi_1 + \delta M_2 \chi_2 + 2\delta M_{12} \chi_3, \quad (14)$$

де  $\delta M_1, \delta M_2, \delta M_{12}$  — варіації моментів;  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$  — варіації кривини і кручення серединної поверхні при випинанні.

Таким чином, для визначення критичного радіуса згинання, при якому можлива втрата стійкості в стиснутій стінці тонкостінної оболонки, необхідно кривини  $\chi_1, \chi_2$ , кручення  $\chi_3$  і деформації  $\omega_1$  й  $\omega_2$  представити як функцію прогинів стінки при випинанні і підставити отримані вирази в (13) і (14). Наступним кроком є інтегрування і розв'язання отриманого рівняння (13) відносно головних радіусів кривини  $r$  і  $R$ . Величини  $r$  і  $R$ , які перетворюють вираз (13) у нуль, будуть критичними радіусами вигину трубчастої заготовки, щодо гофроутворення.

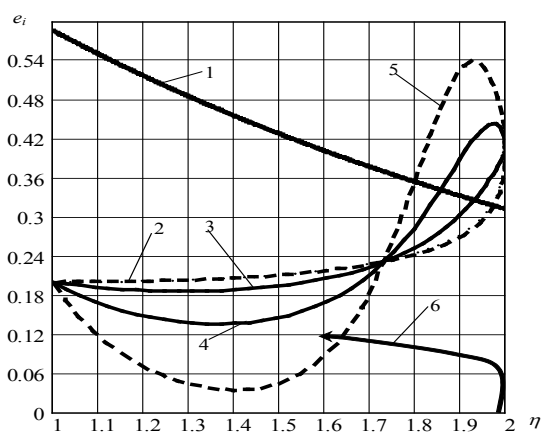


Рис. 2. Діаграми граничних деформацій:

1 — діаграма пластичності сталі 20; 2, 3, 4, 5 — критичні значення стійких деформацій при відносній кривині заготовки  $\rho = \infty$  ( $\rho \geq 2$ ); 1; 0,5; 0,3 відповідно (при  $k \geq 1$ , сталь 20); 6 — шлях деформування матеріалу в небезпечній зоні при формоутворенні коліна  $90^\circ 57 \times 4$  (сталь 20).

Зауважимо, що для розрахунку  $r$  і  $R$  необхідно мати закони розподілу напружень і деформацій, історію деформування в небезпечній зоні заготовки та задаватися можливою формою гофра.

### Діагностування граничного формоутворення крутозігнутих колін

Наведемо приклад на основі прогресивної наукомісткої технології холодного пластичного деформування крутозігнутих колін [3]. На рис. 2 побудовано шлях деформування деякої точки небезпечної зони для коліна  $90^\circ 57 \times 4$ , сталь 20 [5]. Зазначимо, що графік лежить у межах зміни показника напруженого стану від 1,6 до 2, при цьому основне накопичення пошкоджень відбувається з  $\eta = 2$ .

На рис. 2 показані також діаграма пластичності сталі 20 і граничні стійкі деформації з різними відносними радіусами кривини оболонки. Крива 2 відповідає геометрії досліджуваного типорозміру коліна. Без урахування впливу градієнтів деформацій можна попередньо сказати, що шлях деформування не перетинає граничні криві, отже, технологічних відмов не повин-

но спостерігатися, що підтверджується експериментально.

Розрахунок з урахуванням впливу градієнтів деформацій за критеріями (7) і (10) дає такі результати:

— використаний ресурс пластичності  $\Psi = 0,25$ ;

— гранична стійка деформація 0,346, накопичена — 0,117. Запас — 3,0.

Перевірка всіх досліджених типорозмірів з матеріалів сталь 20 і X18H9T показала достатній запас пластичності і стійкості.

### Висновки

1. Оцінюючи граничні технологічні параметри листового штампування, необхідно враховувати, що граничні деформації можуть бути обмежені як деформовністю — здатністю деформуватися без руйнування, так і стійкістю пластичних деформацій, що виявляється в місцевих стоншеннях стінки в зоні напружень розтягу. Обидва явища можна зобразити графічно на одній координатній площині у вигляді відповідних графіків. Обидва цих графіків буде феноменологічною кривою критичних деформацій.

2. Виведений критерій стійкості показує, що наявність подвійної кривини оболонки суттєво впливає на граничні стійкі деформації заготовки. При цьому має значення не абсолютне значення головних радіусів кривини, а саме їх відношення і зміна цього співвідношення в процесі деформування.

3. Для оцінки можливого гофроутворення необхідно знати закони розподілу напружень і деформацій, історію деформування в небезпечній зоні заготовки та ймовірну форму гофра. Отримання кінцевих залежностей в квадратурах стикається з певними математичними труднощами і вимагає застосування сучасних обчислювальних машин.

4. В основі наукомісткої технології холодного пластичного формоутворення крутозігнутих колін деформівна заготовка має подвійну кривину. Побудовані діаграми граничних деформацій і шляхи деформування показали достатній запас щодо технологічних відмов, досліджуваним у роботі. Експерименти підтверджують цей факт.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Теорияковки и штамповки: Учебное пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов // Е. П. Унксов и др.; Под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992,— 720 с.: ил.
2. Попов А. Е. Основы теории листовой штамповки. — М.: Машиностроение, 1968, — 283 с.
3. Розенберг О. А., Мельниченко В. В., Студенец С. Ф. Новая технология получения крутоизогнутых стальных отводов методом холодного пластического деформирования // Изв. АИИ Украины, спец. выпуск отделения «Тяжелого и транспортного машиностроения». — 1998. — С. 96—102.
4. Дель Г. Д. Технологическая механика. — М.: Машиностроение, 1978. — 174 с.
5. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. — К.: Выща шк., 1983. — 175 с.
6. Огородников В. А., Грушко А. В. Моделирование процесса формообразования крутоизогнутых отводов на основе теории деформируемости // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тем. зб. наук. пр. — Краматорськ. — 2000. — С. 5—10.
7. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов. — Харьков, 1968, — 188 с.
8. Огородников В. А., Грушко А. В. Волнообразование при формировании крутоизогнутых отводов методом одновременной протяжки с изгибом трубы // Вибрации в технике и технологиях. — 2000. — № 1(13). — С. 55—57.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів і прикладної механіки

Надійшла до редакції 20.12.07  
Рекомендована до друку 26.12.07

**Грушко Олександр Володимирович** — доцент.

Кафедра опору матеріалів та прикладної механіки, Вінницький національний технічний університет