

УДК 681.727

Л.Данильченко, І.Гевко, А.Драган

Тернопільський державний технічний університет імені І.Пулюя

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ В ПРОЦЕСІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ГНУТИХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ГВИНТОВИХ ПРОФІЛІВ

У [1] на основі досліджень зони пластичної деформації наведено наближений метод розрахунку поперечного пластичного згину в процесі навивання вузьких стрічок на оправу. Аналогічні дослідження згинання як вузьких, так і широких стрічок підтвердили загальні закономірності процесу пластичного деформування для поперечного згину та дозволили використати багато висновків роботи [1] стосовно навивання широких стрічок на оправу.

Так, у результаті досліджень процесу однокутового симетричного згину (рисунок 1, а), було встановлено [2], що в початковий момент навивання утворюється одна зона пластичної деформації, по осі симетрії якої радіальні  $\sigma_r$  і тангенційні  $\sigma_\theta$  напруження будуть головними. Збільшення кута згину розподіляє зону пластичної деформації на дві симетричні вузькі ділянки, всередині яких знаходиться ділянка напруженого металу, що практично не піддається подальшому деформуванню. Положення цих ділянок зони пластичної деформації визначається кутом  $\alpha_1$ , який відповідає напрямку рівнодійної  $Q$  нормальних контактних напружень  $\sigma_k$  від дії оправу на цій ділянці. Кут  $\alpha_1$  менший кута згину стрічки  $\alpha$  на величину  $\Delta\alpha$  пружного згину. Внаслідок обмеженості текучості металу зоною пластичної деформації у тих же межах локалізується й розподіл контактних дотичних напружень  $\tau_k$ . Як і у випадку навивання вузької стрічки на оправу, вони напрямлені до вільного кінця стрічки (внаслідок скорочення внутрішнього ребра стрічки). Аналіз викривлення координатної сітки показує, що кут  $\varphi$ , який визначає межу зони пластичної деформації зі сторони осі симетрії згину відносно напрямку сили

$Q$  практично у всіх випадках не перевищує  $2-4^\circ$ . За таких умов

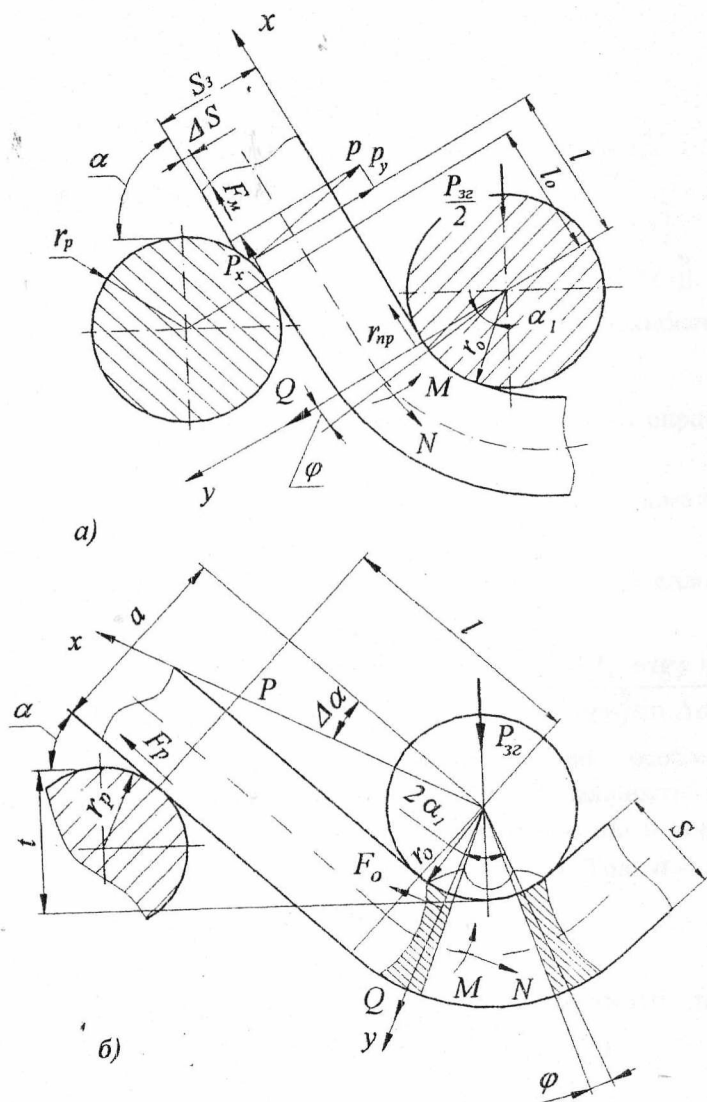


Рисунок 1 — Схема розрахунку однокутового (а) та двокуютового (б) згину

у вказаному перерізі контактні дотичні напруження на оправі  $\tau_k$  та дотичні напруження  $\tau_{\rho\theta}$  по перерізу близькі до нуля, тобто напруження  $\sigma_\theta$  і  $\sigma_\rho$  є головними.

Відмінною особливістю двокутового згину (рисунок 1, б) є те, що ділянки зони пластичної деформації вже на початку процесу навивання розділені шириною оправі, а розподіл зони пластичної деформації на окремі ділянки згину відбувається лише за наявності притискання. Аналіз викривлення координатної сітки показує, що у випадку двокутового згину зменшення дотичних напружень у зоні пластичної деформації проходить на невеликій ділянці, а кут  $\varphi$ , що визначає межу поширення зони пластичної деформації відносно напрямку рівнодійної  $Q$ , не перевищує  $3-6^\circ$ . Для двокутового згину (аналогічно однокутовому) в граничному перерізі з координатою  $\theta = \alpha - \varphi$  тангенційні  $\sigma_\theta$  і радіальні  $\sigma_\rho$  напруження є головними. Тоді напружений стан у граничному перерізі визначається згинальним моментом  $M_k$  і розтягувальною поздовжньою силою  $N$ . Для визначення їх зв'язку з поперечною силою  $P$  складемо рівняння рівноваги в системі  $xOy$ :

$$\left. \begin{aligned} \sum X &= F_p \cos \Delta \alpha + P_x \cos \Delta \alpha - P \sin \Delta \alpha + F_o - N \cos \varphi = 0; \\ \sum Y &= -P \cos \Delta \alpha - F_p \sin \Delta \alpha - P_x \sin \Delta \alpha + Q - N \sin \varphi = 0; \\ \sum m_o &= M_k + N(r_o + s/2) - Pl - P_x a - F_p a - F_o r_o = 0, \end{aligned} \right\} (1)$$

де  $F_o$  і  $F_p$  - сили тертя від взаємодії стрічки товщиною  $s$  відповідно з оправою радіусом  $r_o$  й обтискним роликком радіусом  $r_p$ ;

$P_x$  - поздовжня складова зусилля згинання;

$l$  і  $a$  - відповідно плечі поперечної сили згинання  $P$  та її поздовжніх складових  $P_x$  і  $F_p$ , які залежать від геометричних параметрів  $l$  і  $z$ .

Момент  $M_k$  зв'язаний з моментом  $M_\sigma$ , створеним тангенційним напруженням  $\sigma_\theta$  в граничному перерізі співвідношенням:

$$M_k + N(r + s/2) = T_\sigma. \quad (2)$$

У результаті розв'язку системи рівнянь (1) відносно  $N$  і  $M_\sigma$ , отримуємо залежності:

$$N = k_n P [(f_o + f_p + tg\gamma) \cos \Delta\alpha - (1 - f_o f_p - f_o tg\gamma) \sin \Delta\alpha]; \quad (3)$$

$$M_\sigma = k_m P \{ l + (f_o + tg\gamma) a + f_o r_o [\cos \Delta\alpha + \sin \Delta\alpha (f_p + tg\gamma)] \}, \quad (4)$$

де  $k_n$  і  $k_m$  - коефіцієнти, які залежать від кута  $\varphi$  з похибкою не більше 2-3%,  $k_n = k_m = 1$ ;

$f_o$  і  $f_p$  - коефіцієнти тертя стрічки відповідно на оправі та ролику;

$\gamma$  - кут, що визначає положення рівнодійної нормальних контактних напружень на обтискному ролику.

Приведений радіус  $r_{np}$  прикладання поздовжньої сили  $N$ , що створює згинальний момент сили, дорівнює:

$$r_{np} = \frac{M_\sigma}{N} = \frac{l + (f_p + tg\gamma) a + f_o r_o [\cos \Delta\alpha + \sin \Delta\alpha (f_p + tg\gamma)]}{(f_o + f_p + tg\gamma) \cos \Delta\alpha - (1 - f_o f_p - f_o tg\gamma) \sin \Delta\alpha}. \quad (5)$$

Проведені дослідження підтвердили, що особливості поперечного згину мають місце лише за наявності плеча прикладання згинальної сили  $P$  тієї ж величини, що й товщина стрічки. У цьому випадку приймаємо, що  $\Delta\alpha = 0$ . Тоді  $a = s + r_o$ , а плече прикладання сили згинання дорівнює:

$$l = l_o + 0,5l_{nl}, \quad (6)$$

де  $l_o$  - плече прикладання сили  $P$  за відсутності ділянки зминання,  $l_o = [(r_o + r_p + s)(1 - \sin \alpha) + k_s s] / \cos \alpha$  [1];

$l_{np}$  - довжина пластичного контакту стрічки з роликом,

$$l_{nl} = \sqrt{2\Delta s r_p};$$

$r_p$  - радіус ролика;

$k_s$  — коефіцієнт збільшення нормального зазору;

$\Delta s$  — величина змінання стрічки на ролик.

Залежність (5) у випадку  $\Delta\alpha = 0$  має вигляд:

$$r_{np} = \frac{M_\sigma}{N} = r_o + s + \frac{l - f_o s}{f_o + f_P + \text{tg}\gamma}. \quad (7)$$

Величина  $\text{tg}\gamma$  визначається величиною змінання стрічки на оправі:

$$\text{tg}\gamma = \sqrt{\frac{\Delta s}{2r_P}}.$$

Однозначна залежність поздовжньої сили  $N$  і моменту  $M_\sigma$  в граничному перерізі з величиною сили згинання  $P$  дозволяє питання знаходження силових параметрів для поперечного згину звести до розгляду напруженого стану в граничному перерізі, де напруження  $\sigma_\theta$  і  $\sigma_\rho$  — головні.

У випадку згинання широких стрічок напружений стан у граничному перерізі відповідає плоскодеформівному, для якого розподіл напружень  $\sigma_\theta$  і  $\sigma_\rho$  відомий. Величина поздовжньої розтягувальної сили  $N$  та моменту  $M_\sigma$  визначається як інтегральна сума відповідно елементарних сил і моментів від тангенційних напружень в перерізі заготовки:

$$N = \beta_\sigma B \ln \frac{(r+s)r}{\rho_n^2} \left( \sigma_{TO} + \Pi \ln \sqrt{\frac{(r+s)}{r}} \right); \quad (8)$$

$$M_\sigma = \beta_\sigma B \left\{ \sigma_{TO} \left( \frac{2[r(r+s) - \rho_n^2] + s^2}{4} + \frac{r^2}{2} \ln \frac{r(r+s)}{\rho_n^2} \right) + \frac{h}{2} \left[ \frac{2r(r+s) + s^2}{4} \ln \frac{(r+s)}{r} - \frac{s(2r+s)}{4} + \ln \frac{r(r+s)}{\rho_n^2} \left( \frac{s(2r+s)}{4} + \frac{r^2}{2} \ln \frac{(r+s)}{r} \right) \right] \right\}; \quad (9)$$

де  $\beta_\sigma$  – коефіцієнт, який залежить від співвідношення головних напружень;

$B$  – ширина стрічки, що навивається;

$s$  – товщина стрічки;

$r$  – внутрішній радіус згину,  $r = r_o$ ;

$\rho_n$  – радіус нейтральної поверхні напружень.

З урахуванням взаємозв'язку величин  $N$  і  $M_\sigma$  спільний розв'язок рівнянь (7), (8) і (9) дозволяє отримати значення радіуса нейтральної поверхні напружень  $\rho_n$  у граничному перерізі. Оскільки точний аналітичний розв'язок здійснити неможливо, то наближений розв'язок, який дозволяє одержати значення з будь-яким ступенем точності, здійснюється таким чином. Представимо значення радіуса нейтральної поверхні у вигляді:

$$\rho_n = k_n \sqrt{r(r+s)}, \quad (10)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт зміщення нейтральної поверхні напружень, визначений після  $n$ -го наближення.

З урахуванням того, що значення попереднього наближення коефіцієнта  $k_{n-1}$  близьке до значення  $k_n$ , то

$$\frac{\rho_n^2}{k_{n-1} r(r+s)} - 1 = \ln \frac{\rho_n^2}{k_{n-1} r(r+s)}. \quad (11)$$

Використовуючи (5), (9), (10) і (11), рекурентне співвідношення для приблизного визначення  $k_n$  з будь-яким ступенем точності має вигляд:

$$k_n = e^{\frac{\frac{1}{2} \sigma_{TO} [2r(r+s)+s^2 - 2rk_{n-1}(r+s)(1-2\ln k_{n-1})] + \frac{n}{2} [2r((r+s)+s^2) \ln \frac{(r+s)}{r} - s(2r+s)]}{\sigma_{TO} (4r_{np} - 2r^2 - 2rk_{n-1}^2(r+s)) + \frac{n}{2} [r(4r_{np} - r) \ln \frac{(r+s)}{r} - s(2r+s)]}}}. \quad (12)$$

Для чистого згину  $\rho_n = \sqrt{r(r+s)}$ , тоді вихідне значення  $k_n = 1$ .

Залежність коефіцієнта зміщення нейтральної поверхні напружень від приведенного радіуса  $r_{np}$  прикладання сили  $N$  представлена на рисунку 2. Аналіз залежності (12) доводить, що

для величин плеча прикладання згинальної сили  $l < (0,5 - 0,7)s$ , друге наближене обчислення коефіцієнта зміщення  $k_2$  дозволяє практично точно визначити  $\rho_n$ . У випадку  $l > (0,5 - 0,7)s$  перше наближене обчислення коефіцієнта зміщення нейтральної поверхні  $k_1$  дозволяє визначити  $\rho_n$  з необхідною для практичних цілей точністю:

$$\rho_n = \sqrt{r(r+s)} \cdot e^{\frac{\sigma_{TO}s^2 + 0,5\Pi \left[ (2r_o^2 + 2r_o s + s^2) \ln \left( 1 + \frac{s}{r_o} \right) - s(2r_o + s) \right]}{2 \sigma_{TO} (4r_o r_{np} - 4r_o^2 - 2s r_o) + 0,5\Pi \left[ (4r_{np} - r) r \ln \left( 1 + \frac{s}{r_o} \right) - s(2r_o + s) \right]}} \quad (13)$$

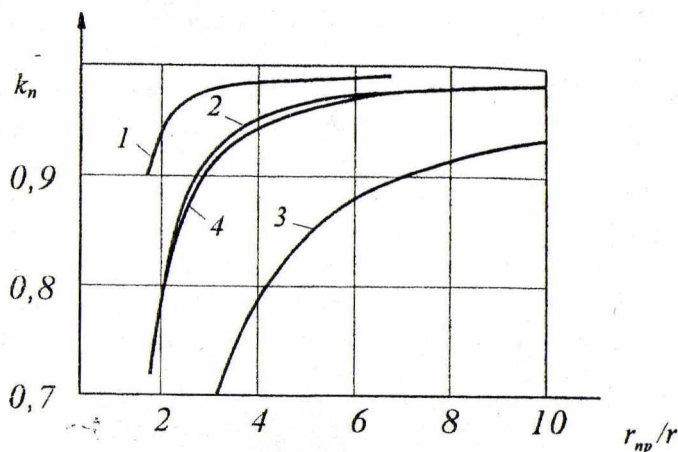


Рисунок 2 — Залежність зміщення нейтральної поверхні напружень від співвідношення  $r_{np}/r$

У випадку гарячого навивання ( $\Pi = 0$ ) радіус нейтральної поверхні напружень у першому наближенні визначається:

$$\rho_n = \sqrt{r(r+s)} e^{\frac{s^2}{4r_o(2r_{np} - 2r_o - s)}} \quad (14)$$

Для відомого радіуса  $\rho_n$  з врахуванням (2.65), (2.70) поперечна згинальна сила  $P$  дорівнює:

$$P = \frac{\beta_\sigma B \left[ \sigma_{TO} + \Pi \ln \sqrt{\frac{r_o + s}{r_o}} \right]}{f_o + f_P + tgy} r_o \ln \frac{1}{k_n^2}. \quad (15)$$

Порівняння величин  $\rho_n$ , розрахованих для гарячого й холодного навивання, тобто з врахуванням зміцнення й без нього, показує, що вони майже не відрізняються (рисунок 2). Тому залежність (15) з урахуванням (14) для випадку  $r_{np}$  набуває вигляду:

$$P = \frac{\beta_\sigma B s^2 \left[ \sigma_{TO} + \Pi \ln \sqrt{\frac{r_o + s}{r_o}} \right]}{4l \left[ 1 + (tgy - f_o + f_P) s / 2l \right]}. \quad (16)$$

Аналіз залежностей (15) і (16) доводить, що особливості поперечного згину проявляються лише за наявності плеча прикладання поперечної сили того ж порядку, що й товщина стрічки. Практично ця умова реалізується лише в процесі двокутового згину. Для практичних розрахунків однокутового згину, де  $l \gg s$ , із достатньою точністю можна використати відомі залежності для чистого згину.

Повне зусилля згинання у випадку двокутового згину визначається:

$$P_{z2} = 2\beta_\sigma B r_o \ln \frac{1}{k_n^2} \left[ \sigma_{TO} + \Pi \ln \sqrt{\frac{r_o + s}{r_o}} \right] \times \frac{\cos \alpha + (f_P + tgy) \sin \alpha}{f_o + f_P + tgy}. \quad (17)$$

Отже, під час двокутового згину повне зусилля згинання  $P_{z2}$  й поперечна згинальна сила залежать не тільки від матеріалу заготовки та її розмірів, але й від зусилля згинання, тобто від радіусів заокруглення оправки та ролика, величини зазору між ними, а також трибологічних характеристик спряжуваних поверхонь. Так, зміна радіуса оправки впливає на величину поперечної згинальної сили  $P$  практично лише для холодного навивання. Зменшення коефіцієнта тертя в спряженні стрічка-оправка призводить до зменшення як сили згинання  $P$ , так і повного

ролик і зменшення радіуса ролика зменшують поперечну складову згинальної сили  $P$ , але збільшують її поздовжню складову та повне зусилля згинання  $P_{z2}$ . Повне зусилля згинання досягає максимальних значень, коли кут  $\alpha$  знаходиться в межах  $45^\circ - 80^\circ$ .

Порівняння залежностей, виведених для розрахунку широких і вузьких стрічок на ребро, показує, що вплив зміцнення на процеси навивання, а саме на зусилля згинання, однаковий у двох випадках та характеризується одним і тим же розрахунковим значенням напруження текучості.

Однаковим буде й характер впливу конструктивних параметрів ролика й оправки, а також інших умов згину на процес навивання. І в тому, і в іншому випадку бажано застосувати мастила, які збільшують стійкість спорядження та зменшують зусилля згинання.

Порівняння результатів за отриманими залежностями з даними експериментальних досліджень підтверджують їх повну відповідність закономірностям пластичного згину.

1. Рене И.П. Пластический изгиб листовой заготовки // Труды Тульского механического института. – 1950. – Вып.4, С. 146-162.
2. Рогатынский Р.М., Данильченко Л.Н. Исследование поперечного изгиба полос в штампах // Ред. ж. Технология и организация производства. – К., 1990. – № 4.-16 с. Деп. в УНИИТИ 02.12.90 г., № 1160- Ук.