

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ТА ХОЛОДНОГО НАВИВАННЯ ГВИНТОВИХ І КІЛЬЦЕВИХ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Розглянуто теоретичні передумови технологічних процесів формоутворення гвинтових і кільцевих заготовок методами холодного та гарячого навивання стрічок на оправу. Встановлено аналітичні залежності напружено-деформованого стану процесу згинання стрічки на ребро. Запропоновано залежності для практичних розрахунків силових параметрів процесів навивання.*

Аналіз теоретичних досліджень відомих технологічних процесів формоутворення гвинтових і кільцевих заготовок деталей машин показав, що розроблення наукових засад для проектування раціональних методів їх виготовлення методами навивання на основі теорії пластичності нашою виходить на значні труднощі, пов'язані з одночасним впливом багатьох факторів, які не дозволяють у більшості випадків отримати точні розрахунки напружень, зусиль і деформацій, що функціонально відображають реальний вплив основних чинників на процес формоутворення. У процесі вивчення методів одержання витих заготовок та розроблення методики врахування все більшого числа факторів в аналітичних розрахунках, вони стають точнішими й повніше відображають реальні умови формоутворення.

Основною проблемою досліджуваних технологій навивання є складність виготовлення гвинтових стрічок із відношенням висоти перерізу до товщини стрічки більше 5, у цьому випадку процес згинання нестабільний, стрічка втрачає стійкість, лягає на оправу, що спричиняє виникнення гофроутворень на внутрішньому ребрі [1].

У випадку згинання стрічки з питомою висотою більше 5 напружений стан у першому наближенні можна вважати плосконапруженим. В результаті згинання розміри стрічки у зоні деформування змінюються як в радіальному, так і в осьовому напрямках.

З врахуванням того, що максимальні радіальні напруження  $\sigma_\rho$  незначні порівняно з напруженням текучості  $\sigma_s$ , закон зміни ширини поперечного перерізу стрічки з використанням умови нестискуваності виражається залежністю [2,3]:

$$h_\rho = H \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}, \quad (1)$$

де  $h_\rho$  - товщина поперечного перерізу на відстані  $\rho$  від центра кривини;

$\rho_0$  – радіус кривини нейтрального шару;

$\rho$  - миттєвий радіус кривини.

Для широких стрічок ширина поперечного перерізу, що відповідає  $h_\rho$  для вузьких, в процесі згинання не змінюється та реалізується плоско-деформований напружений стан.

Зміна ширини поперечного перерізу для брусів, що згинаються, висота й ширина яких співрозмірні, апроксимується залежністю:

$$h_\rho = \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^\alpha, \quad (1a)$$

де  $\alpha$  - параметр моделі, для вузьких стрічок  $\alpha=0,5$ ; широких  $\alpha=0$ ; для брусів  $0 < \alpha < 0,5$ .

Для відношення ширини спіралі до початкової ширини заготовки, яке характеризує зсідання стрічки в процесі навивання  $\beta=B_1/B$ , радіус нейтрального шару деформації  $\rho_0$  визначається аналогічно до [4] з умови сталості об'єму елементарної ділянки до і після згинання:

$$\rho_o = \beta^2 \frac{2\rho_\sigma}{(\sqrt{r+s} + \sqrt{r})}, \quad (2)$$

де  $\rho_\sigma$  - радіус центра тяжіння перерізу у випадку зміни товщини спіралі;  
 $r$  - внутрішній радіус витка (радіус навивання);  
 $s$  - ширина витка.

Для плоского напруженого стану умова рівноваги з врахуванням (1) має вигляд [5]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\rho \partial \theta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} + \frac{\sigma_\rho \partial h_\rho}{h_\rho \partial \rho} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_\theta}{\rho \partial \theta} + \frac{2\tau_{\rho\theta}}{\rho} + \frac{\tau_{\rho\theta} \partial h_\rho}{h_\rho \partial \rho} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $\sigma_\rho$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\tau_{\rho\theta}$  - відповідно радіальне, тангенційне й дотичне напруження в полярних координатах.

Замкнутий розв'язок рівнянь (3) разом із рівняннями пластичності, зв'язку між напруженнями та умовою нестискуваності по всій зоні пластичної деформації отримати практично неможливо. Тому доцільно розглядати характер розподілу згинального моменту, поздовжніх і дотичних сил у зоні деформації для того, щоб визначити ділянку, де дотичні напруження зводяться до мінімуму. Якщо виділити зону пластичної деформації, то у полярних координатах  $\rho O \tau$  (рис.1), де вісь  $O\rho$  перпендикулярна до вектора подачі стрічки, пластична деформація по колу оправки розподіляється від  $O_1(r, \theta_1)$  до  $O_2(r, \theta_2)$ .

Рівняння рівноваги ділянки стрічки зліва від радіального перерізу з миттєвою координатою  $\theta$  аналогічно [5] має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \sum X &= -f_\rho P_\Sigma - f_o F \cos \theta_F + F \sin \theta_F + N \cos \theta + \Omega \sin \theta = 0; \\ \sum Y &= -P_\Sigma + f_o F \sin \theta_F + F \cos \theta_F - N \sin \theta + \Omega \cos \theta = 0; \\ \sum m &= P_\Sigma l + f_\rho s P_\Sigma (r+s) + f_o F r - M_\sigma = 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де  $P_\Sigma$  - сумарна вертикальна складова зусилля згинання  $P$  та зусилля формоутворення потовщеного профілю зовнішнього ребра,  $P_\Sigma = P + P_m$ , де  $P_m = (0,04-0,08)P$ , звідки  $P_\Sigma = (1,004-1,008)P$ ;

$$F - \text{рівнодійна нормальних контактних напружень, } F = \int_{\theta}^{\theta_2} \sigma_r h_r r d\theta,$$

$$\text{де } \theta_F - \text{кут прикладання рівнодійної } F; \cos \theta_F = \left( \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sigma_r h_r \cos \theta_r d\theta \right) / F;$$

$\sigma_r$  - контактне нормальне напруження на оправі;

$f_\rho$  - приведений коефіцієнт тертя у місці прикладання поперечної сили;

$f_o$  - коефіцієнт тертя стрічки по оправі;

$l$  - плече прикладання сили  $P_\Sigma$ ;

$N$ ,  $\Omega$  - відповідно поздовжні й поперечні зусилля;

$M_\sigma$  - момент від тангенційних напружень по висоті заготовки,  $M_\sigma = M_{z2} + N\rho_c$ ;

$M_{z2}$  - згинальний момент, який діє у перерізі.

Рівняння, яке зв'язує момент від тангенційних напружень із поздовжньою розтягувальною силою можна представити:

$$M_{\sigma} = \rho_{np} N, \quad (5)$$

де  $\rho_{np}$  - приведений радіус прикладання поздовжньої сили  $N$ ,

$$\rho_{np} = \frac{l + f_{\rho}(r + s) + f_o r}{f_{\rho} + f_o}.$$

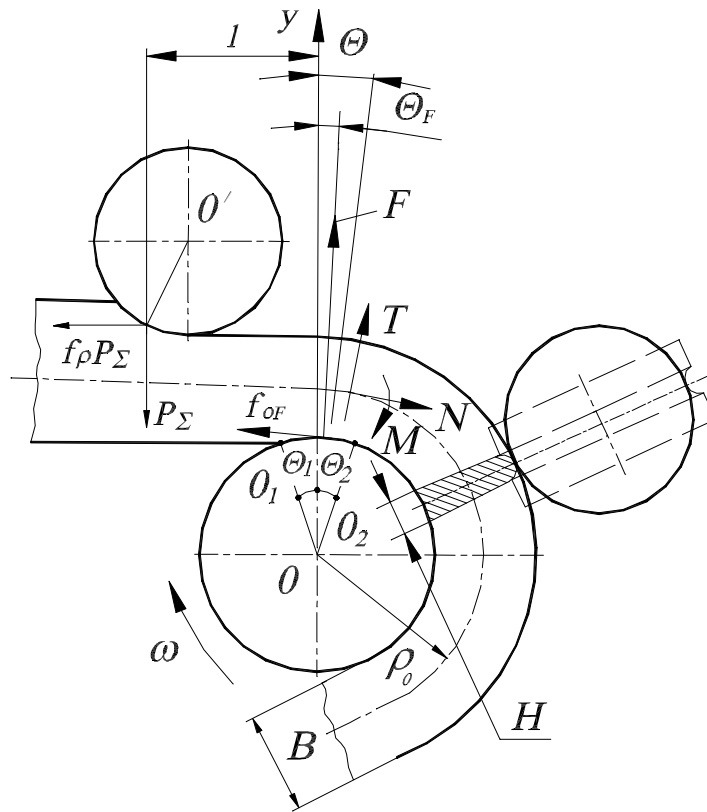


Рис. 1. Схема дії сил під час навивання спіралей на оправу

У зоні пластичної деформації контактні дотичні напруження  $\tau_k$ , прикладені до стрічки, направлені протилежно до контактних дотичних напружень залишкової частини внаслідок того, що в результаті згинання внутрішні шари стрічки у зоні пластичної деформації стискаються (скорочуються) й відбувається їх ковзання по оправі у напрямку, протилежному навиванню.

Згідно [1] на межі зони пластичної деформації ( $\theta \rightarrow \theta_2$ ) існує д.  $\Omega$ , де контактні дотичні напруження відсутні. Існування вказаної граничної зони експериментально підтверджено як під час навивання заготовок на різноманітні типи оправ, так і у випадку згинання вузьких стрічок у штампі.

За умови рівноваги елементарного кільцевого сектора дугою  $d\theta$  для  $\tau_{r\theta} = 0$  одержуємо:

$$dN = dM = dT = 0.$$

У цьому випадку напруження  $\sigma_{\theta}$  і  $\sigma_r$  головні, тоді рівняння (3) значно спрощуються. Як наслідок, у даному випадку задачу згинання поперечною силою можна звести до згинання від одночасної дії моменту й поздовжньої сили, які діють у граничному перерізі  $\theta \rightarrow \theta_2$  і визначаються із системи рівнянь (4):

$$N = P_{\Sigma} \frac{f_{\rho}(\cos \theta_F + f_o \sin \theta_F) + (f_o \cos \theta_F - \sin \theta_F)}{\cos \theta_2 (\cos \theta_F + f_o \sin \theta_F) - \sin \theta_2 (f_o \cos \theta_F - \sin \theta_F)}; \quad (6)$$

$$M_{3z} = P_{\Sigma} l + P_{\Sigma} f_{\rho} (r + s) + \frac{N \sin \theta_2 + P_{\Sigma}}{\cos \theta_F + f_o \sin \theta_F} f_o r - N \rho_{\sigma}. \quad (7)$$

Визначення моменту й поздовжньої сили спрощується з врахуванням результатів експериментальних досліджень, які підтвердили, що значення кутів  $\theta_1$  і  $\theta_2$  досить малі, а напрям рівнодійної  $F$  співпадає з напрямом осі  $O\rho$ . Тому залежності (6) і (7) у першому наближенні можна записати:

$$N = (f_{\rho} + f_o) P_{\Sigma}; \quad (8)$$

$$M_{\sigma} = [l + f_{\rho} (r + s) + f_o r] P_{\Sigma}. \quad (9)$$

Для напруженого стану в елементарному об'ємі з координатою  $\theta \rightarrow \theta_2$  умова рівноваги (3) має вигляд:

$$\frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + \frac{\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}}{\rho} + \frac{\sigma dh\rho}{h_{\rho} d\rho} = 0. \quad (10)$$

Для ділянок розтягу й стиску енергетична умова пластичності у спрощеній формі записується згідно [2,5]:

$$\text{у зоні стиску:} \quad \sigma_{\theta} - \sigma_z = \sigma_{\theta} = -\beta_{\sigma} \left[ \sigma_{TO} + \Pi \ln \left( \frac{\rho}{\rho_o} \right) \right]; \quad (11)$$

$$\text{у зоні розтягу:} \quad \sigma_{\theta} - \sigma_{\rho} = \beta_{\sigma} \left[ \sigma_{TO} + \Pi \ln \left( \frac{\rho}{\rho_o} \right) \right], \quad (12)$$

де  $\sigma_{TO}$  - екстрапольована межа текучості;

$\Pi$  - лінійний модуль зміцнення;

$\beta_{\sigma}$  - коефіцієнт, який залежить від співвідношення головних напружень.

У випадку, коли ширина гвинтової стрічки суттєво менша радіуса навівання, в першому наближенні

$$\ln \left( \frac{\rho}{\rho_o} \right) = \ln \left( 1 + \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} \right) = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} - 1.$$

Тоді умова пластичності набуває вигляду:

$$\text{для зони стиску:} \quad \sigma_{\theta} = -\beta_{\sigma} \sigma_{TO} + \beta_{\sigma} \Pi \left( \frac{\rho}{\rho_o} - 1 \right);$$

$$\text{для зони розтягу:} \quad \sigma_{\theta} = \beta_{\sigma} \sigma_{TO} + \beta_{\sigma} \Pi \left( \frac{\rho}{\rho_o} - 1 \right).$$

Розв'язок рівняння рівноваги й пластичності для згинання моментом і поздовжніми силами відрізняється від розв'язку, наведеного в роботі [2] граничними значеннями радіальних стискувальних напружень на оправі, де вони:

$$\sigma_r = \frac{N}{h_r r} = \frac{N}{H \sqrt{r \rho_o}}. \quad (13)$$

У будь-якій точці зони деформації радіальні та колові напруження із врахуванням зміцнення згідно з [1] відповідно дорівнюють:

у зоні розтягу:

$$\sigma_{\rho} = -2\beta_{\sigma}\sigma_{TO}\left(1 - \sqrt{\frac{\rho}{r+s}}\right) - 2\beta_{\sigma}\Pi\left\{\ln\left(\frac{\rho}{\rho_o}\right) + 2 - \sqrt{\frac{\rho}{r+s}}\left[\ln\left(\frac{r+s}{\rho_o}\right) + 2\right]\right\}; \quad (14)$$

$$\sigma_{\theta} = \beta_{\sigma}\left[\sigma_{TO} + \Pi\ln\left(\frac{\rho}{\rho_o}\right)\right] + \sigma_{\rho}, \quad (15)$$

у зоні стиску:

$$\sigma_{\rho} = -2\beta_{\sigma}\sigma_{TO}\left(1 - \sqrt{\frac{r}{\rho}}\left[1 - \frac{\sigma_r}{2\beta_{\sigma}\sigma_{TO}}\right]\right) + 2\beta_{\sigma}\Pi\left\{\ln\left(\frac{\rho}{\rho_o}\right) - 2 - \sqrt{\frac{r}{\rho}}\left[\ln\left(\frac{r}{\rho_o}\right) - 2\right]\right\}; \quad (16)$$

$$\sigma_{\theta} = -\beta_{\sigma}\left[\sigma_{TO} - \Pi\ln\left(\frac{\rho}{\rho_o}\right)\right]. \quad (17)$$

У випадку навивання стрічки на ребро із врахуванням зміцнення значення поздовжньої сили та згинального моменту визначали як інтегральну суму по висоті заготовки елементарних сил і моментів від тангенційних напружень аналогічно [1]:

$$N = 2\beta_{\sigma}\sigma_{TO}H\sqrt{\rho_o}\left(\sqrt{r} - \frac{\rho_H}{\sqrt{r+s}}\right) + 2\beta_{\sigma}\Pi H\sqrt{\rho_o}\left\{2\sqrt{\rho_H}\ln\left(\frac{\rho_H}{\rho_o}\right) + \sqrt{r}\cdot\left[2 - \ln\left(\frac{r}{\rho_o}\right)\right] - \left(\frac{\rho_H}{\sqrt{r+s}}\right)\left(2 + \ln\left(\frac{r+s}{\rho_o}\right)\right)\right\}; \quad (18)$$

$$M_{\sigma} = \frac{\beta_{\sigma}\sigma_{TO}}{3}\left[H\sqrt{\frac{\rho_o}{r+s}}\left((r+s)^2 + 2r\sqrt{r(r+s)} - 3\rho_H^2\right)\right] + \frac{\beta_{\sigma}\Pi}{9}H\frac{\sqrt{\rho_o}}{r+s}\times \\ \times 3\ln\left(\frac{r+s}{\rho_o}\right)\left((r+s)^2 - 3\rho_H^2\right) + 4\rho_H\sqrt{\rho_H(r+s)}\left(4 + 3\ln\frac{\rho_H}{\rho_o}\right) - 2\left[(r+s)^2 + 9\rho_H^2\right] - \\ - 2r\sqrt{(r+s)r}\left(3\ln\frac{r}{\rho_o} - 2\right). \quad (19)$$

Експериментальні дані підтверджують, що радіуси нейтрального шару деформації  $\rho_o$  та нейтральної поверхневої напруженості  $\rho_H$  відрізняються несуттєво.

Оскільки теоретичне визначення  $\rho_o$  пов'язане з великими труднощами, то у першому наближенні приймаємо  $\rho_o = \rho_H$ . Тоді рівняння (18),(19) і (7), (8) складають систему рівнянь із чотирма невідомими  $N$ ,  $M_{\sigma}$ ,  $P_{\Sigma}$  і  $\rho_H$ . Її розв'язок відносно  $P_{\Sigma}$  дозволяє визначити значення поперечної сили, необхідної для згинання стрічки.

Для гарячого згинання ( $\Pi=0$ ) рівняння (18) і (19) значно спрощуються, вказана система має аналітичний розв'язок. Тоді радіус нейтральної поверхні напружень

$$\rho_H = \rho_{np} - \left[\rho_{np} - \sqrt{r(r+s)}\right] \sqrt{1 + \frac{s^2\left[1 - \left(\frac{1}{\sqrt{(r+s)/r} + 1}\right)^2\right]}{3(\rho_{np} - \sqrt{r(r+s)})^2}}. \quad (20)$$

Поздовжню  $N$  і поперечну  $P_{\Sigma}$  згинальні сили визначали за залежностями (7) і (18) у випадку, коли значення радіуса нейтральної поверхні відоме. Використовуючи наближені формули перетворення підкореневого виразу та логарифмічної функції, отримуємо наближені залежності для визначення зусиль:

$$N = \frac{\beta_{\sigma} H s^2 (f_{\rho} + f_o)}{3(l + f_{\rho}(r + s - \sqrt{r(r+s)}) + f_o(r - \sqrt{r(r+s)}))} \times \left( \sigma_{TO} + \Pi \ln \sqrt{\frac{r+s}{r}} \right)^4 \sqrt{\frac{r}{r+s}} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{r+s}{r} + 1}} \right)^2; \quad (21)$$

$$P_{\Sigma} = \frac{\beta_{\sigma} H s^2}{3} \frac{\left( \sigma_{TO} + \Pi \ln \sqrt{\frac{r+s}{r}} \right)^4 \sqrt{\frac{r}{r+s}} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{r+s}{r} + 1}} \right)^2}{l + f_{\rho}(r + s - \sqrt{r(r+s)}) + f_o(r - \sqrt{r(r+s)})}. \quad (22)$$

З врахуванням, що  $\rho \ll r$ , залежності (21) можна представити у вигляді:

$$N = \frac{\beta_{\sigma} H s^2 (f_{\rho} + f_o)}{3 \left[ l + \frac{s}{2} (f_{\rho} - f_o) \right]} \cdot \left( \sigma_{TO} + \Pi \frac{s}{2r} \right) \left( 1 - \frac{s}{4(r+s)} \right) \left( \frac{2r+s}{4r} \right);$$

$$P_{\Sigma} = \frac{\beta_{\sigma} H s^2}{3} \cdot \frac{\left( \sigma_{TO} + \Pi \frac{s}{2} \right) \left( 1 - \frac{s}{4(r+s)} \right) \left( \frac{2r+s}{4r} \right)}{l + \frac{s}{2} (f_{\rho} - f_o)}$$

або

$$N = \frac{\beta_{\sigma} H s^2 (f_{\rho} + f_o)}{3 \left[ l + \frac{s}{2} (f_{\rho} - f_o) \right]} \cdot \left( \sigma_{TO} + \Pi \frac{s}{2r} \right) \left( \frac{4r+s}{8r} + \frac{s^2}{16r(r+s)} \right); \quad (21')$$

$$P_{\Sigma} = \frac{\beta_{\sigma} H s^2}{3} \cdot \frac{\left( \sigma_{TO} + \Pi \frac{s}{2} \right) \left( 1 - \frac{s}{4(r+s)} \right) \left( \frac{2r+s}{4r} \right)}{l + \frac{s}{2} (f_{\rho} - f_o)}. \quad (22')$$

Момент, необхідний для навивання спіралей на оправу, залежить від конструктивних особливостей оправ і у загальному випадку описується залежністю [6]:

$$M_n = k_o P_{\Sigma} [l + f_{\rho}(r + s)], \quad (23)$$

де  $k_o$ - коефіцієнт, що враховує конструктивне виконання оправ.

Якщо величина поздовжньої розтягувальної сили відома, то радіус нейтральної поверхні можна визначити із співвідношень:

для  $\Pi = 0$ :

$$\rho_n = \sqrt{r(r+s)} \left( 1 - \frac{\sigma_r}{2\beta_{\sigma}\sigma_s} \right); \quad (24)$$

$$\text{для } \Pi \neq 0: \quad \rho_n = \sqrt{r(r+s)} \frac{\sigma_{TO} \left( 1 - \frac{\sigma_\rho}{2\beta_\sigma \sigma_{TO}} \right) + \Pi \left( 2 - \ln \left( \frac{r}{\rho_o} \right) \right)}{\sigma_{TO} + \Pi \left( 2 - \ln \frac{\rho_o}{r+s} \right)}. \quad (25)$$

### Висновки

Проведені дослідження підтверджують, що значення радіусів нейтральної поверхні для холодного й гарячого деформування згином відрізняються несуттєво. Тому в розрахунках згинання стрічки холодним деформуванням, коли аналітичний розв'язок приведеної системи ускладнений, у першому наближенні радіус нейтральної поверхні напружень слід визначати без врахування зміцнення.

Одержані аналітичні залежності дозволяють з високою точністю здійснювати розрахунки силових параметрів процесів навивання та можуть братись за основу в розробленні теоретичних передумов процесів пластичного деформування методами холодного та гарячого згинання.

*The theoretical preconditions of technological processes of screw and circular blanks shaping by method of cold and hot winding of bands on mounting were under consideration. Analytical dependencies for estimation of elastic-strained state during the process of strip bending on rib were determined. The dependencing for practical calculations of winding processes' power parameters were suggested*

### Література

1. Гевко Б.М. Технология изготовления спиралей шнеков. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львовском университете, 1986. – 128 с.
2. Аверкиев Ю.А. Характер формоизменения и силовые условия при гибке полосы на ребро // Вестн. машиностроения. – 1981.- № 1.- С.64-66.
3. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
4. Мошнин Е.Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах. – М.: Машгиз, 1959. – 360с.
5. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 427 с.
6. Гевко Б.М. Исследование процесса навивки спиралей шнеков на оправку // Изв. вузов. Машиностроение. – 1984. - № 8. - С. 117 - 122.

Одержано 11.02.2003 р.