

МАШИНОБУДУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА ТА ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

УДК 621.81

М. Пилипець, докт. техн. наук; О. Ляшук

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ФОРМОУТВОРЕННЯ РЕБРИСТИХ ГВИНТОВИХ ПРОФІЛІВ

Розроблено динамічну модель технологічного процесу формоутворення Г- і П-подібних гвинтових профілів з визначенням силових характеристик. Дані практичні рекомендації виробів з розрахунком технологічних параметрів формоутворення.

Умовні позначення

On — вісь вздовж нормалі;

Ob — вісь вздовж бінормалі;

$\bar{n}$, $\bar{t}$, $\bar{b}$ — орти супровідного трикутника;

K та χ — відповідно кривизна та кручення осьової гвинтової лінії по орту t , що проходить через т. С;

C' — параметр кроку гвинтової поверхні;

σ_{ij+} , σ_{ij-} — відповідно напруження на додатній та від'ємній стороні елементарного об'єму;

τ_{nt} , τ_{nb} , τ_{tn} , τ_{tb} , τ_{bn} , τ_{bt} — дотичних напружень;

σ_n , σ_b , σ_t — напруження відповідно на осі супровідного трикутника n, b, t ;

B — висота полицки;

B_o — висота елемента профілю;

ρ_o — радіус нетрального шару деформації;

ρ — побіжний радіальний параметр точки гвинтової поверхні;

L_3 — довжина заготовки;

n_0 — радіальний параметр нейтрального шару;

T — крок витка;

N — кількість витків, отриманих із заготовки довжиною L_0 ;

β — радіальний параметр розтягнутого витка;

$\sigma_s = const$;

L_o — довжина заготовки;

R та r — максимальні та мінімальні радіуси гвинтової стрічки;

V — центр елементарного об'єму.

У машинобудуванні є актуальними питання щодо розроблення нових прогресивних, ресурсоощадних, відносно недорогих способів виготовлення гвинтових ребристих деталей машин. Це, зокрема, гвинтоподібні профілі і спіралі, які широко

використовуються в сучасному машинобудуванні для виконання багатфункціональних завдань, а також у ремонтній справі.

Питання дослідження технологічних процесів навивання гвинтових ребрих заготовок розглянуті в роботах [1,2,3], але воно в повній мірі ще не вирішено.

Робота виконується згідно з координаційним планом Комітету з питань науки і техніки Міністерства освіти і науки України з розділу “Машинобудування” “Високоєфективні технологічні процеси в машинобудуванні” на 2002-2006 роки.

Метою роботи є розроблення моделі технологічного процесу формоутворення гвинтових Г і П подібних профільних заготовок з визначенням силових параметрів.

Особливість навивання кутових профілів [3] полягає у створенні таких умов, за яких попереджується втрата стійкості вертикального ребра під час згинання і передбачається поєднання згинального моменту осьовим підтискуванням витків, які навиваються.

Напружено-деформаційний стан, що симетричними тензорами другого рангу [4]. При цьому в прямокутних декартових координатах (рис. 1) для довільного елемента рівняння рівноваги має такий вигляд [1]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0.\end{aligned}\tag{1}$$

Враховуючи гвинтову симетрію спіралі, замість декартових координат зручно використовувати спеціальну систему гвинтових координат $Onth$, в якій вісь Ot напрямлена вздовж дотичної до гвинтової лінії (напрямної), вісь On – вздовж нормалі, а вісь Ob – вздовж бінормалі (рис.1). Оскільки розглядається напружено-деформівний стан у тонких пластинах, то приймаємо, що вісь Ob напрямлена вздовж нормалі до серединної поверхні по прямій, а система може розглядатись як ортогональна в першому наближенні.

Для складання рівняння рівноваги в системі гвинтових координат $Onth$ розглянемо виділений елементарний об’єм:

$$dV = dn \cdot dt \cdot db.\tag{2}$$

Нехай центр елементарного об’єму dV (т.С) в декартовій системі має координати $C(x,0,0)$. Осі Ox та Op співпадають з віссю On і проходять через т.С, що знаходиться на віддалі $n = \rho$ від початку O системи координат, рис.1.

Вектори напружень, що діють на кожній із граней елементарного об’єму, направлені відповідно вздовж дотичної t , нормалі n і бінормалі b до гвинтової напрямної лінії. Враховуючи, що $d\varphi \rightarrow 0$ із точністю до нескінченно малих першого порядку, приймаємо:

$$\sin \frac{d\varphi}{2} = \frac{d\varphi}{2}; \quad \cos \frac{d\varphi}{2} = 1.\tag{3}$$

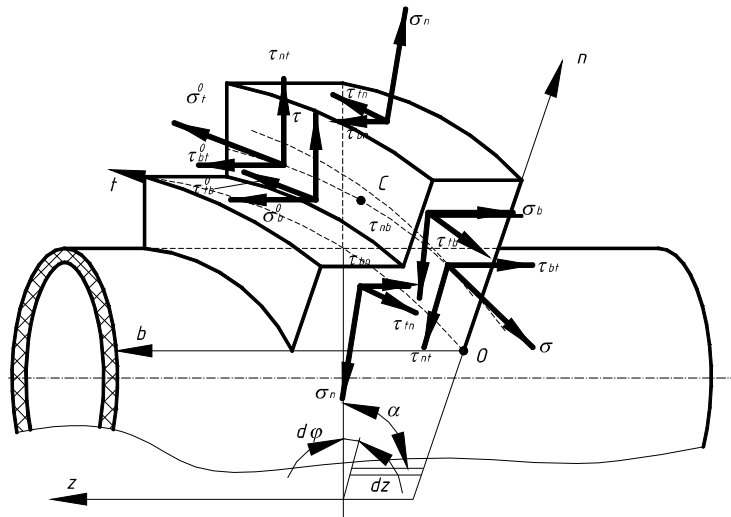


Рис. 1. Розрахункова схема напружено-деформованого стану елемента НЗ у гвинтовій системі координат

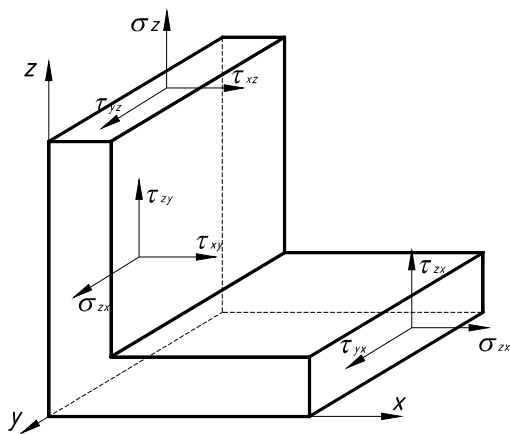


Рис. 1, а

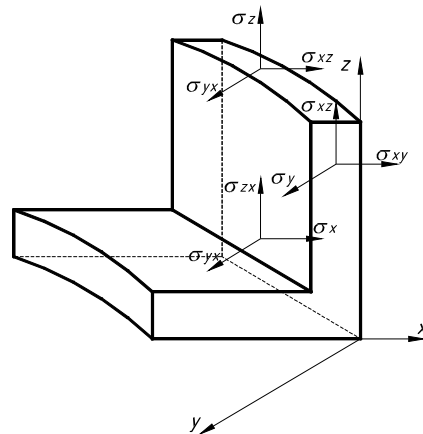


Рис. 1, б

Тоді вектори напружень у декартовій ортогональній системі $Ox^1x^2x^3$, базисами якої є орти супровідного трикутника $\bar{n}$, $\bar{t}$, $\bar{b}$, а центр розміщений в т.С, розкладаються на орти таким чином:

$$\begin{aligned}
 \bar{\sigma}_{bb-} &= -\sigma_b \bar{b}; & \bar{\tau}_{nb} &= -\tau_{nb} \bar{n}; & \bar{\tau}_{tb} &= -\tau_{tb} \bar{t}; & \sigma_{tt-} &= -\sigma_t \left(\cos \alpha \frac{d\varphi}{2} \bar{n} + \bar{t} \right); \\
 \bar{\tau}_{nt-} &= -\tau_{nt} \left(\bar{n} - \cos \alpha \frac{d\varphi}{2} \bar{t} + \sin \alpha \frac{d\varphi}{2} \bar{b} \right); & \bar{\tau}_{bt-} &= -\tau_{bt} \left(-\sin \alpha \frac{d\varphi}{2} \bar{n} + \bar{b} \right); \\
 \bar{\sigma}_{nn-} &= -\sigma_n \bar{n}; & \bar{\tau}_{tn-} &= -\tau_{tn} \left(\bar{t} - \chi \frac{dp}{2} \bar{b} \right); \\
 \bar{\tau}_{bn-} &= -\tau_{bn} \left(-\chi \frac{dp}{2} \bar{t} + \bar{b} \right); \\
 \sigma_{bb+} &= \sigma_b \bar{b}; & \tau_{nb+} &= \tau_{nb} \bar{n}; & \tau_{tb+} &= \tau_{tb} \bar{t}; \\
 \sigma_{tt+} &= \sigma_t \left(-\cos \alpha \frac{d\varphi}{2} \bar{n} + \bar{t} \right); & \bar{\tau}_{nt+} &= \tau_{nt} \left(\bar{n} + \cos \alpha \frac{d\varphi}{2} \bar{t} - \sin \alpha \frac{d\varphi}{2} \bar{b} \right); \\
 \bar{\tau}_{bt+} &= \tau_{bt} \left(\sin \alpha \frac{d\varphi}{2} \bar{n} + \bar{b} \right); & \bar{\tau}_{bn+} &= \tau_{bn} \left(\chi \frac{dp}{2} \bar{t} + \bar{b} \right); \\
 \bar{\sigma}_{nn+} &= \sigma_n \bar{n}; & \bar{\tau}_{tn+} &= \tau_{tn} \left(\bar{t} + \chi \frac{dp}{2} \bar{b} \right),
 \end{aligned} \tag{4}$$

де K та χ – відповідно кривизна та кручення осьової гвинтової лінії по орту t , що проходить через т.С:

$$K = \frac{n}{n^2 + C'^2}; \quad \chi = \frac{C'}{n^2 + C'^2} = \frac{T}{2\pi(n^2 + C'^2)}. \quad (5)$$

Тут $C' = \frac{T}{2\pi}$ – параметр кроку гвинтової поверхні; $\sigma_{ij+} = \sigma_j + \frac{\partial \sigma_j}{\partial x_i} dx_i$;
 $\sigma_{ij-} = \sigma_j - \frac{\partial \sigma_j}{\partial x_i} dx_i$ – відповідно напруження на додатній та від'ємній стороні елементарного об'єму.

Із рівності нулю проекцій всіх сил відповідно на осі супровідного трикутника nbt отримуємо умову рівноваги в гвинтових координатах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_n}{\partial n} + \frac{\partial \tau_{nt}}{\partial t} + \frac{\partial \tau_{nb}}{\partial b} + K(\sigma_n - \sigma_t) + \chi \tau_{bt} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_t}{\partial t} + \frac{\partial \tau_{tn}}{\partial n} + \frac{\partial \tau_{tb}}{\partial b} + 2K\tau_{tn} + \chi \tau_{bn} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_b}{\partial b} + \frac{\partial \tau_{bn}}{\partial n} + \frac{\partial \tau_{bt}}{\partial t} + K\tau_{bn} - 2\chi \tau_{nt} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Для випадку згину кутника на ребро приймаємо, що за висотою полицки B напруження будуть однорідними. Відповідно

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial b} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial \tau} = 0. \quad (7)$$

Якщо висота полицки змінюється за заданим законом [2]

$$B = B_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}, \quad (8)$$

то рівняння рівноваги внутрішнього елемента $dn \times dt$ змінного висотою B буде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_n}{\partial n} + \frac{\partial \tau_{nt}}{\partial t} + K(\sigma_n - \sigma_t) + \frac{\sigma_n dB}{Bdn} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{nt}}{\partial n} + \frac{\partial \sigma_t}{\partial t} + 2K\tau_{nt} + \frac{\tau_{nt} dB}{Bdn} &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Згідно заданої границі зони пластичної деформації завжди можна виділити раціональний перетин, в якому дія дотичних напружень τ_{nt} зводиться до нуля. В цьому перетині умова рівноваги набуде вигляду

$$\frac{d\sigma_n}{dn} + K(\sigma_n - \sigma_t) + \frac{\sigma_n dB}{Bdn} = 0. \quad (10)$$

Навиваючи профіль на крок, висоту ребра змінюємо залежно від міри витягування профілю за зовнішнім і внутрішнім краями.

Нейтральний шар радіусом $\rho_b = n_0$ визначається із умови рівності довжини навитого витка початкової довжини заготовки:

$$N\sqrt{4\pi^2 n_0^2 + T^2} = L_s, \quad (11)$$

де L_s – довжина заготовки; n_0 – радіальний параметр нейтрального шару; T – крок витка; N – кількість витків, отриманих із заготовки довжиною L_0 .

Якщо позначити $L_0 = L_s / N$ – довжину заготовки, що йде на один виток, то зміну товщини при згині стрічки визначають за залежністю

$$B = B_0 \sqrt{\frac{L_0}{L_n}} = B_0 \sqrt{\frac{n_0^2 + C'^2}{n^2 + C'^2}}, \quad (12)$$

Похідна

$$\frac{dB}{dn} = \frac{n(n_0^2 + C'^2)B_0}{(n^2 + C'^2)^2 \sqrt{\frac{n_0^2 + C'^2}{n^2 + C'^2}}}. \quad (13)$$

Відповідно рівняння (10) набуде вигляду

$$\frac{d\sigma_n}{dn} + K(\sigma_n - \sigma_t) - \frac{\sigma_n n}{2(n^2 + C'^2)} = 0. \quad (14)$$

Умова пластичності набуває різного вигляду для зон розтягування та стискування.

В зоні стискування:

$$\sigma_t = -\beta_\sigma \left[\sigma_{t_0} - \Pi \ln \left(\frac{L_n}{L_0} \right) \right]. \quad (15)$$

В зоні розтягування:

$$\sigma_t - \sigma_\rho = \beta_\sigma \left[\sigma_{t_0} + \Pi \ln \left(\frac{L_n}{L_0} \right) \right]. \quad (16)$$

Тоді для зони стискування і розтягування рівняння рівноваги:

$$\frac{d\sigma_n}{dn} \pm \frac{K}{2} \sigma_n = \beta K \left[\sigma_{t_0} \pm \Pi \ln \sqrt{\frac{n^2 + C'^2}{n_0^2 + C'^2}} \right]. \quad (17)$$

Оскільки координата n співпадає із радіальним параметром ρ розтягнутого витка, то в подальших дослідженнях приймаємо $\rho = n$.

Якщо прийняти, що величина $\sigma_s = \beta \left[\sigma_{t_0} \pm \ln \sqrt{\frac{\rho^2 + C'^2}{\rho_0^2 + C'^2}} \right]$ незначно змінюється в часі, то умовно $\sigma_s = const$.

Тоді рівняння рівноваги зведеться до диференціального рівняння:

$$\frac{2d\sigma_\rho}{\mp \sigma_\rho + 2\sigma_s} = \frac{\rho d\rho}{\rho^2 + C'^2}, \quad (18)$$

де для зони розтягування приймаємо знак (+), для зони стискування - (-).

Розв'язок рівняння (19) для зони розтягування:

$$\sigma_{\rho} = -2\sigma_s \left(1 - \sqrt{\frac{\rho^2 + C'^2}{R^2 + C'^2}} \right), \quad (19)$$

для зони стискування:

$$\sigma_{\rho} = -2\sigma_s \left(1 - \sqrt{\frac{r^2 + C'^2}{\rho^2 + C'^2}} \right), \quad (20)$$

де R та r – максимальні та мінімальні радіуси гвинтової стрічки; ρ – побіжний радіальний параметр довільної точки гвинтової поверхні.

Реалізувати формоутворення Г-подібного профілю можна за допомогою пристрою.

Технологічні параметри процесу навівання – граничні напруження, розтягувальну силу, момент від тангенційних напружень – визначаємо за методикою, описаною вище.

Розподіл деформацій і напружень за перерізом профілю під час навівання зображено на рис.2.

Внаслідок проведених теоретичних досліджень розроблені технологічні основи формоутворення ребристих Г-подібних заготовок деталей машин методами холодного навівання на основі ресурсощадних технологій. Встановлено, що запропонована технологія навівання ребристих профілів забезпечує виготовлення гвинтових заготовок за умови, що граничне відношення висоти до ширини ребра обмежується не втратою стійкості, а ресурсом пластичності металу.

Наведені залежності дають змогу визначити енергетичні, силові та конструктивні параметри гвинтових ребристих заготовок, технологічного оснащення та інструменту для реалізації технологічного процесу, на основі конструкції розроблено пристрій для реалізації енергозбиральної технології [7].

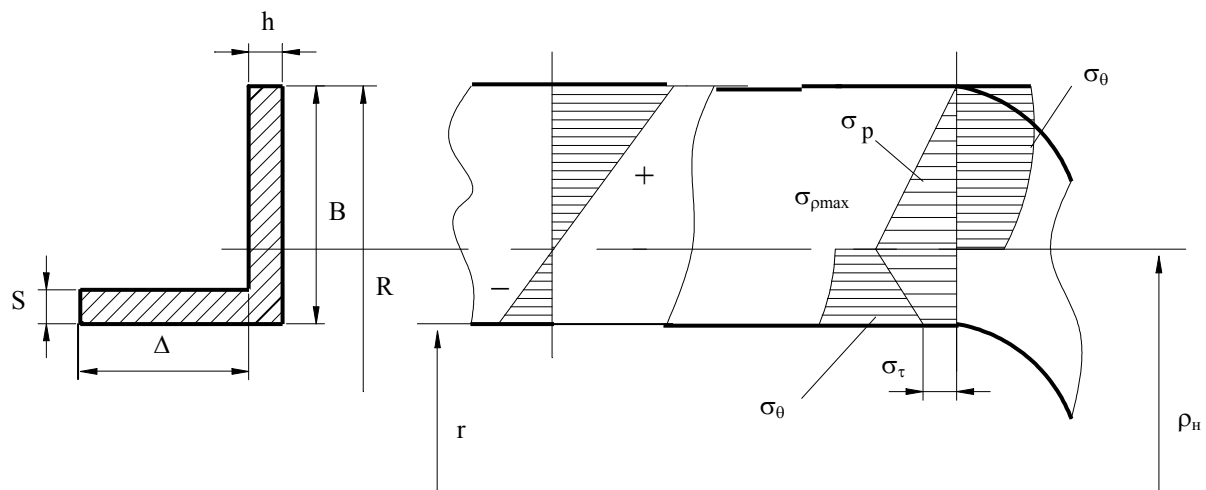


Рис.2. Розподіл деформацій і напружень за перерізом профілю заготовки в процесі навівання на оправу кутника

На основі проведених досліджень можна зробити наступні **висновки**:

- Розроблено динамічну модель технологічного процесу формоутворення Г- і П-подібних гвинтових заготовок в машинобудуванні на основі ресурсощадних технологій.

- Виведено аналітичні залежності для визначення силових характеристик технологічного процесу формоутворення і на їх основі побудовано технологічні схеми формоутворення.
- На основі проведеного комплексу досліджень дані практичні рекомендації виробництву з проектуванням технологічного оснащення і формувальних інструментів.

Is developed dynamic model of technological process formings Γ - and Π -similar screw structures with definition of the force characteristics. Is given the practical recommendations of products with account of technological process formings.

Література

1. Рене И.П. Пластический изгиб листовой заготовки. // Тр. Тульского мех. Ин-та. - 1950, вып. 4. - С.146 - 162.
2. Гевко Б.М. Технология изготовления спиралей шнеков. -Львов.: Вища школа. Изд-во при Львов. Ун-те, 1986. - 128 с.
3. Пилипець М.І. Науково-технологічні основи виробництва навивних заготовок деталей машин: Дис. докт. техн. наук: 05.02.08, – Львів, 2001. – 346 с.
4. Сокольников И.С. Тензорный анализ: Пер. С англ.-М.: Наука, 1971. – 376 с.
5. Рогатинський Р.М. Дослідження напружено-деформівного стану гвинтових робочих органів // Вісник національного аграрного університету. - Т.1. - Сучасні проблеми сільськогосподарського машинобудування. К., 1997. - С. 34 - 39.
6. Данильченко Л. М. Технологічне забезпечення точності формоутворення витих заготовок: Дис. канд. техн. наук: 05.02.08, –Львів, 2000. – 175 с.
7. Ляшук О.І.Способи виготовлення профілів гвинтових та кільцевих заготовок. – Луцьк: Наукові нотатки, 2003.- №12. -С. 160-165.

Одержано 20.01.2005 р.