

УДК 621.981

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.196-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.196-203)

Р. М. Рогатинський, проф., д-р техн. наук, **М. І. Пилипець**, проф., д-р техн. наук,
І. Г. Ткаченко, доц., канд. техн. наук, **М. Д. П'єнтак**, **Т. М. Пелешок**, канд. техн. наук,
П. О. Леськів

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
e-mail: rogatynskyi@gmail.com*

Особливості формування гвинтових та трубчатих профілів навиванням на циліндричній оправці

Дослідження присвячено моделюванню та технологічному проектуванню способів навивання гвинтових та трубчатих профілів обертовою циліндричною оправкою. У статті розглянуто напружено-деформований стан при навиванні профілів із різним співвідношенням висоти стрічок (смуг) до їх ширини в умовах чистого згину та згину поперечною силою. Встановлено відмінності при згині на циліндричній оправці широких смуг та вузьких стрічок на ребро, а також проміжних профілів. Виведена узагальнена залежність для розрахунку моментів навивання для різних випадків. Показано, що при згині поперечною силою з малим плечем її прикладання, внаслідок значних сил тертя на оправці, які протидіють стисненню внутрішніх шарів заготовки, виникають сили розтягу, тобто реалізується згин моментом із дією поздовжніх і сил. При цьому, сумарний момент навивання буде дещо вищий, ніж при чистому згині. При цьому зростає радіальне навантаження на оправку, що негативно впливає на довговічність технологічного обладнання. Проте, згин вузьких стрічок на ребро поперечною силою із малим плечем прикладання дозволяє суттєво підвищити стійкість процесу їх навивання та розширити використання досліджуваного технологічного процесу для виготовлення витих профілів та розширити їх діапазон, зокрема, витих гвинтових спіралей.

технологічне проектування, згин поперечною силою, навивання на оправку, напружено-деформований стан, гвинтова спіраль

Постановка проблеми. Формування гвинтових та трубчатих профілів на оправку широко використовується у виробництві. Згідно прийнятої класифікації згин може проводитись як згинальним моментом, так і поперечною силою чи їх поєднанням. Зокрема, при виготовленні спіралей шнеків із вузьких стрічкових заготовок на оправку для забезпечення стійкості згину стрічки на ребро, навивання проводиться поперечною силою із малим плечем прикладання. Такий технологічний процес є складний, оскільки при цьому на оправці виникають суттєва реакція протидії згинальній силі та відповідні сили тертя, які створюють розтягуючи силу, що потребує детального розгляду напружено-деформованого стану. Певні складності виникають при встановленні силових параметрів процесу згину профілів із співрозмірними шириною та висотою профілю в зв'язку із реалізацією при цьому складного об'ємного напружено-деформованого стану. А тому, важливим для забезпечення стійкості процесу формування та збереження заданої форми профілів є встановлення узагальнених закономірностей зміни його енергосилових параметрів, приведених до одиничної ширини перерізу заготовки для різних перерізів смуг (стрічок) та умов навивання, а також побудова відповідної методики інженерного розрахунку технологічного процесу формування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню дослідження процесів згину профілів, в тому числі на циліндричній оправці, присвячена достатньо велика кількість джерел. Зокрема розробка теорії та прогресивних технологій навивання спіралей шнеків на ребро із великим співвідношенням висоти профілю до ширини із стрічок сприяла теоретичній розробці цих технологій [1-3, 11-15]. В [1,2] розглянуто напружено

деформований стан, який виникає при навиванні заготовок на ребро із значним співвідношенням висоти профілю до ширини, виведені залежності для встановлення енергосилових параметрів. В [3] розроблена теорія навивання профільних гвинтових елементів. Теорія формоутворення деталей із листових заготовок вкладає в [4]. Особливості гнуття смугових заготовок поперечною силою в умовах плоского деформованого стану розглянуто [5,6]. Розробка моделі чистого згину смуги на основі енергетичного критерію пластичності проведена в [7], а результати дослідження напружено-деформованого стані згину при розтягуванні заготовки подано у [8]. В [9] отримано аналітичні залежності для оцінювання жорсткості різнопрофільних шнекових заготовок у процесі їх виготовлення способом холодного навивання смугових заготовок ребром на оправу. В праці [10] розроблена математична модель кінцевої стадії процесу згинання смуги змінної ширини й товщини матрицею й пуансоном.

У монографіях [11-13] наведено теоретичне узагальнення і нове рішення розроблення моделей та високопродуктивних ресурсощадних технологічних процесів виготовлення гвинтових деталей з покращеними експлуатаційними характеристиками. В роботі [14] встановлено закономірності виготовлення навиванням профільних труб. В праці [15] дано теоретичне та експериментальне обґрунтування навивання спіралей шнеків зовнішньою трубчатою оправою. В [16] розроблено й експериментально апробовано технологічні процеси формоутворення вигнутого профілю на гвинтових заготовках з використанням шнекових оправ.

Постановка завдання. Метою дослідження є забезпечення стійкості процесу навивання профілів на циліндричну оправку та його економічної ефективності шляхом встановлення узагальнених закономірностей формування гвинтових та трубчатих профілів навиванням на оправку, зокрема поперечною силою з малим плечем прикладання, та вибору раціональних параметрів процесу.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо особливості формування листових та смугових заготовок на циліндричній оправці з невеликим відносним радіусом, тобто з високим ступенем нерівномірності витягування матеріалу, для якого характерна пластична деформація матеріалу практично по всій висоті профілю, тобто пружними деформаціями можна нехтувати. Виберемо циліндричну систему координат $O\rho\varphi z$, в якій вісь Oz співпадає із віссю оправки, а вісь $O\rho$ спрямована до зони, в якій проходить деформація згину. При згині стрічок на ребро, ширина початкового профілю яких B_0 суттєво менша початкової висоти H_0 , тобто $B_0 \ll H_0$, реалізується плоский напружений стан, в якому нормальне напруження по осі Oz та тангенціальні напруження в площинах $O\rho z$ і $O\varphi z$ будуть відсутні або несуттєві: $\sigma_z = 0$; $\gamma_{\rho z} = \gamma_{\varphi z} = 0$. В цьому випадку напруження σ_z буде середнім головним напруженням і, відповідно, $\sigma_z = \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3) = 0$ і профіль у перерізі буде змінювати свою форму. Із врахуванням утяжки, висота профілю витої деталі буде $h = \eta H_0$, де $0,95 \leq \eta \leq 0,99$, а ширина профілю буде функцією радіуса кривини відповідного шару $b_\rho = b(\rho)$, рис.1,а.

При згині смуг, ширина профілю B_0 яких суттєво більша, ніж його висота H_0 , $B_0 \gg H_0$, рис. 1,б, реалізується плоский деформований стан, при якому нормальна деформація ε_z по осі Oz та тангенціальні деформації $\gamma_{\rho z}$ та $\gamma_{\varphi z}$ в площинах $O\rho z$ та $O\varphi z$ будуть відсутні або несуттєві, $\varepsilon_z = \gamma_{\rho z} = \gamma_{\varphi z} = 0$. Відповідно, тангенціальні напруження $\tau_{\rho z}$ та $\tau_{\varphi z}$ будуть відсутні, $\tau_{\rho z} = \tau_{\varphi z} = 0$, а головні напруження $\sigma_{1,3}$ із осьовими $\sigma_{\rho,\varphi}$ та тангенціальним $\tau_{\rho\varphi}$ напруженнями будуть пов'язані залежностями:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_p + \sigma_\varphi}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_p + \sigma_\varphi)^2 + \tau_{p\varphi}^2}; \quad \sigma_2 = \sigma_z = \frac{\sigma_p + \sigma_\varphi}{2}. \quad (1)$$

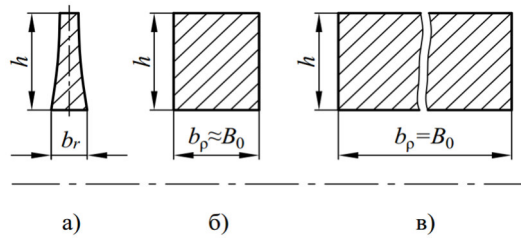


Рисунок 1 – Схеми витих профілів при навиванні на оправку із заготовок різного перерізу $B_0 \times H_0$:

а – із стрічки незначної товщини на ребро, $B_0 \ll H_0$; б – із заготовки прямокутного профілю із співрозмірними B_0 та H_0 ; в – із широкої смуги, $B_0 \gg H_0$

Джерело: розроблено авторами

При згині (навиванні) широких стрічок на оправку тобто для випадку реалізації плоского деформованого стану, при зміні радіального параметру ρ ширина смуги залишається постійною $b_p = B_0$.

Для навивання профілю із співрозмірними шириною B_0 та висотою H_0 , у повздовжніх перерізах заготовки будуть виникати тангенціальні напруження τ_{pz} та $\tau_{\varphi z}$, проте вони будуть незначні і не будуть мати суттєвого впливу на визначення енергосилових параметрів процесу згину. Нормальне напруження по осі Oz буде визначатись залежністю $\sigma_z \approx \sigma_2 = 0,5k_\sigma(\sigma_p + \sigma_\varphi)$, де k_σ - коефіцієнт впливу профілю на рівень осевих напружень, який залежить від питомої ширини профілю, $k_\sigma = k_\sigma(\zeta)$, де $\zeta = B/H$. При $\zeta \rightarrow 0$, $k_\sigma = 0$ при $\zeta \rightarrow \infty$, $k_\sigma = 1$. Виходячи із закономірностей пластичної деформації, функція $k_\sigma(\zeta)$ має бути неперервною та тричі диференційованою. Із функцій, якими можна апроксимувати функцію $k_\sigma = k_\sigma(\zeta)$, вибрано логістичну криву виду $k_\sigma(\zeta) = e^{\lambda(2\zeta - \zeta_m)} / (1 + e^{\lambda(2\zeta - \zeta_m)})$, де λ та ζ_m - параметри моделі, $\lambda \geq 1$, $\zeta_m \geq 4$.

Розглянемо умови навивання заготовок прямокутного перерізу різної питомої висоти профілю на циліндричну оправку поперечною згинальною силою P_y , з якою на заготовку діє притискний ролик і яка спрямована перпендикулярно напрямку подачі стрічки, рис. 2. Зі сторони притискного ролика, внаслідок можливого зминання заготовки та сил тертя, також діє горизонтальна сила P_x , спрямована протилежно напрямку подачі заготовки, $P_x = P_y \tan \gamma$, де γ - кут нахилу рівнодійної до нормального перерізу заготовки. Зі сторони оправки на заготовку діятиме нормальна реакція F , яка є рівнодійною контактних сил в зоні деформації стрічки на оправці, що поширюється від φ_1 до φ_2 , а також сили контактного тертя F_x , що появляються від скорочення внутрішньої крайки витка, $F_x = \mu F$, де μ - приведений коефіцієнт тертя. При обертанні оправки заготовка перерізом $B_0 \times H_0$ навиватиметься під дією згинального моменту M та поздовжньої сили розтягу витка N , рис. 2.

Рівняння рівноваги всіх сил, прикладених до заготовки, в зоні згину матиме вигляд, [1,2]:

$$\sum X = -P_x - F_x + N = 0; \quad (2)$$

$$\sum Y = -P_y + F = 0;$$

$$\sum M = P_y l_x + P_x R + F_x r - N r_c - M = 0.$$

де r_c - радіус центра перерізу профілю; l_x - плече прикладання сили P_y .

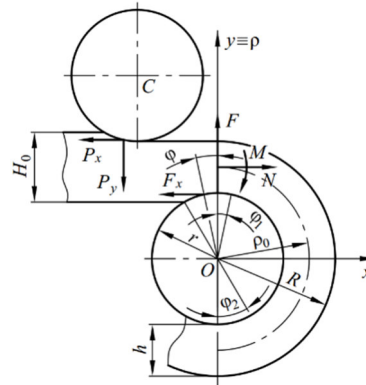


Рисунок 2 – Схема до розрахунку навивання стрічок поперечною силою з малим плечем її прикладання
Джерело: розроблено на підставі [2]

Із (2) випливає, що, із врахуванням $F = P_y$, сила розтягу витка N , згинальний момент M та сумарний момент $M_z = M + N r_c$ дії напружень σ_ϕ відносно осі Oz із силою згину P_y пов'язані залежністю.

$$N = (\mu + \operatorname{tg} \gamma) P_y;$$

$$M = (l_x + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r) P_y - N r_c = [l_x + \operatorname{tg} \gamma (R - r_c) - \mu (r_c - r)] P_y;$$

$$M_z = (l_x + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r) P_y.$$
(3)

Технологічно, ступінь кривини навитої стрічки оцінюють коефіцієнтом нерівномірності витягування ψ - відношенням радіуса зовнішньої крайки витка до радіуса його внутрішньої крайки, $\psi = R/r$, де r - внутрішній радіус витка спіралі. Радіус нейтральної поверхні напружень в умовах згину чистим моментом буде $\rho_n = \sqrt{Rr}$, [1,2,15]. Для випадку чистого згину радіус нейтральної поверхні деформацій ρ_{0n} знаходиться між радіусом центра ваги перерізу профілю r_c та радіусом нейтральної поверхні напружень та незначно від нього відрізняється, а тому прийнемо $\rho_0 = \rho_n$. [1,2]. Для випадку навивання стрічки на ребро, рис.1а, ширина її профілю (товщина стрічки) b_p при згині змінюється залежно від коефіцієнта нерівномірності витягування ψ за законом, $b_p = B_0 \sqrt{\rho_0 / \rho}$. Відповідно ширина профілю по зовнішньому радіусу буде $b_R = B_0 \sqrt[4]{r/R} = B_0 / \sqrt[4]{\psi}$, а по внутрішньому - $b_r = B_0 \sqrt[4]{R/r} = B_0 \sqrt[4]{\psi}$. Тоді радіус центра ваги нормального перерізу витка буде $r_c = (R + r + \sqrt{Rr})/3$ [1,2], а уточнена залежність зміна його товщини b_p від ψ опишеться залежністю:

$$b_p = B_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} = \frac{2\eta B_0 (1 + \psi + \sqrt{\psi})(\sqrt{R} + \sqrt{r})}{3(1 + \psi + 2\sqrt{\psi})\sqrt{\rho}}.$$
(4)

В загальному вигляді, рівняння рівноваги для плоского напруженого стану буде

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho\phi}}{\rho \partial \phi} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\phi}{\rho} + \frac{\sigma_\rho \partial b_p}{b_p \partial \rho} = 0;$$
(5)

$$\frac{\partial \tau_{\rho\varphi}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_{\varphi}}{\rho \partial \varphi} + \frac{2\tau_{\rho\varphi}}{\rho} + \frac{\tau_{\rho\varphi}}{b_{\rho}} \frac{\partial b_{\rho}}{\partial \rho} = 0.$$

Для випадку навивання заготовок чистим моментом поперечною силою з великим плечем l_y , поперечні тангенціальні напруження $\tau_{\rho\varphi}$ є незначні і ними в осередку деформації нехтуємо. Крім цього, безпосередньо в осередку усталеної пластичної деформації $\partial \sigma_{\varphi} / \partial \varphi = 0$. Відповідно, умова рівноваги прийме вид

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} + \frac{\sigma_{\rho} - \sigma_{\varphi}}{\rho} + \frac{\sigma_{\rho}}{b_{\rho}} \frac{\partial b_{\rho}}{\partial \rho} = 0 \quad (6)$$

Для широких смуг, тобто для випадку плоскої деформації, $b_{\rho} = B_0 = \text{const}$, звідки $\partial b_{\rho} / \partial \rho = 0$, і рівняння (6) суттєво спрощується.

Енергетичну умову пластичності для матеріалів, які піддаються зміцненню, приймемо у спрощеному вигляді. Для зони розтягу: $\sigma_{\varphi} - \sigma_{\rho} = \beta[\sigma_{T0} + \Pi \ln(\rho/\rho_0)]$, де σ_{T0} - екстрапольована границя текучості матеріалу стрічки; Π - лінійний модуль зміцнення матеріалу стрічки. Для зони стискування: $\sigma_{\varphi} - \sigma_{\rho} = -\beta[\sigma_{T0} - \Pi \ln(\rho/\rho_0)]$ - для плоского деформованого стану та $\sigma_{\varphi} - \sigma_2 = \sigma_{\varphi} = -\beta[\sigma_{T0} - \Pi \ln(\rho/\rho_0)]$ - для плоского напруженого стану.

Відповідно, із врахуванням (6), сила розтягу N визначиться інтегруванням напружень σ_{φ} , а момент згину відносно осі Oz - інтегруванням добутку $\rho \sigma_{\varphi}$ по висоті профілю. Для випадку чистого згину широких смуг, рис. 1.а, тобто для плоского деформованого стану, силою розтягу N нехтуємо і момент навивання M_0 визначається, як

$$M_0 = \frac{\beta B_0 H_0^2}{4} \left(\sigma_{T0} + \Pi \ln \sqrt{\frac{R}{r}} \right) = \frac{\beta B_0 H_0^2}{4} (\sigma_{T0} + \Pi \ln \sqrt{\psi}). \quad (7)$$

Для випадку чистого згину тонких стрічок на ребро рис. 1.б, тобто для плоского напруженого стану, момент навивання при чистому згині M_0 буде

$$M_0 = \frac{\beta B_0 (R^2 + 2r\sqrt{Rr} - 3Rr)}{3} (\sigma_{T0} + \Pi \ln \sqrt{\psi}) = \frac{\beta k_M B_0 H_0^2}{4} (\sigma_{T0} + \Pi \ln \sqrt{\psi}), \quad (8)$$

де k_M - коефіцієнт приведення, що враховує плоский напружений стан. Із врахуванням розгляду плоского напруженого стану аналогічно [1], можна вивести наближене значення k_M ,

$$k_M = \frac{4(\sqrt{\psi} + 2)\sqrt[4]{\psi}}{3(\sqrt{\psi} + 1)^2} \approx \psi^{-0,1} \quad (9)$$

Для профілів із співрозмірними B_0 та H_0 , рис.1,б, коефіцієнт приведення $\psi^{-0,1} < k_M < 1$ і залежить від співвідношення $\zeta = B_0 / H_0$, $k_M = k_M(\zeta)$. Аналітичне визначення функції $k_M(s)$ є ускладненим і її доцільно апроксимувати функцією, яка повинна бути неперервною і тричі диференційованою. Цим вимогам відповідає логістична функція виду

$$k_M(\zeta) = \frac{\psi^{-1} + e^{\lambda(2\zeta - \zeta_m)}}{1 + e^{\lambda(2\zeta - \zeta_m)}}. \quad (10)$$

Залежність коефіцієнта приведення $k_M(\zeta)$ від питомої ширини профілю ζ з параметрами моделі $\lambda = 1$ та $\zeta_m = 4$ для різних значень коефіцієнтів витягування ψ

наведена на рис.3. На рис 4 наведена зміна моментів згину M від параметру перерізу профілю $\zeta = B/H$.

Побудова аналітичної залежності дозволяє використовувати виведені залежності для встановлення енергосилових параметрів не тільки для випадків плоского деформованого чи плоского напруженого стану. Але і проміжних випадків, коли ширина та висота гнутих профілів співрозмірні.

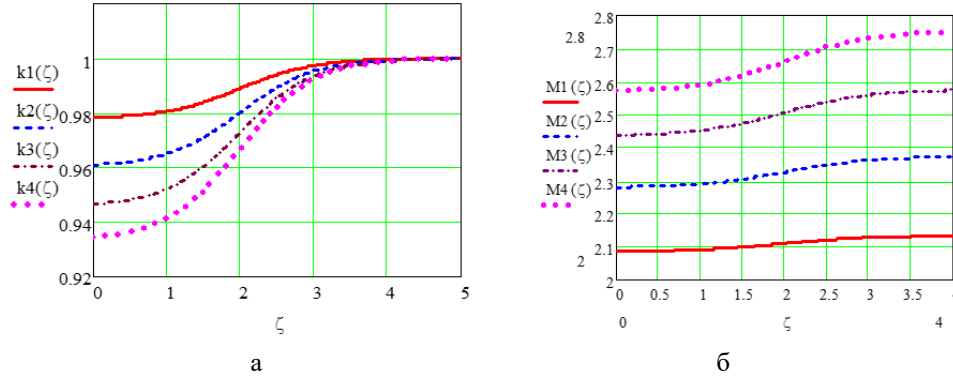


Рисунок 3 - Графіки зміни функції згладжування $k_M(\zeta)$ та моментів згину M від параметру перерізу

профілю $\zeta=B/H$ для різних коефіцієнтів витягування $\psi = \sqrt{R/r}$: 1 - $\psi=1,25$ ($k_1; M_1$);
2 - $\psi=1,5$ ($k_2; M_2$); 3 - $\psi=1,75$ ($k_3; M_3$); 4 - $\psi=2$ ($k_4; M_4$)

Джерело: розроблено авторами

Прийmemo, що сумарний момент M_z дії напружень σ_φ відносно осі Oz буде

$$M_z = M + Nr_c = k_N M_0, \quad (11)$$

де k_N - коефіцієнт перевищення осьового моменту M_z при згині поперечною силою k_N моменту чистого згину M_0 , $k_N = 1,05 - 1,25$.

Відповідно, силу N розтягу, із врахуванням (8) можна виразити через момент чистого згину M_0 .

$$N = \frac{k_N(\mu + \operatorname{tg} \gamma) M_0}{(l_x + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r)} = \frac{\beta k_N k_M(\zeta)(\mu + \operatorname{tg} \gamma) B_0 H_0^2}{4(l_y + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r)} \quad (12)$$

Згідно (3), при відомому плечі прикладання поперечна сила згину буде

$$P_y = \frac{\beta k_N k_M(\zeta) B_0 H_0^2}{4(l_y + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r)} \quad (13)$$

За відомим сумарним моментом M_z відносно осі Oz визначаємо момент згину стрічки при одночасній дії сили розтягу і моменту згину можемо визначити

$$M = M_z - Nr_c = (l_x + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r) P - Nr_c = N[(l_x + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r)/(\operatorname{tg} \gamma + \mu) - r_c] \quad (14)$$

В зоні, поза осередком згинання ($\varphi = \varphi_l$, рис.2), внаслідок розтягування стрічки поздовжньою силою N , вона бути обтискувати циліндричну оправку із виникненням на її поверхні радіальних контактних напружень

$$\sigma_r = \frac{N}{B_0 \sqrt[4]{\psi}}. \quad (15)$$

Уточнене значення нейтрального радіуса із врахуванням (15) буде

$$\rho_{HN} = \sqrt{Rr} \left(1 - \frac{\sigma_r}{2\beta\sigma_s} \right). \quad (16)$$

Уточнений розрахунок моделі, із врахуванням (16), показує, що сумарний момент M_z дії напружень буде дещо більшим порівняно із значенням, отриманим за

залежністю (11). Оскільки таке перевищення компенсується складовою Nr_c від сил тертя на оправці, яка є внутрішньою силою розподілу напружень, то сумарний момент M_n навивання прикладений до оправки, тобто до приводу технологічного обладнання, при цьому практично не зміниться і визначається за залежністю

$$M_n = P_y(l_x + R \operatorname{tg} \gamma) = \frac{\beta k_N k_M(\zeta) B_0 H_0^2 (l_x + R \operatorname{tg} \gamma)}{4(l_y + R \operatorname{tg} \gamma + \mu r)} \quad (17)$$

де значення кута γ рівнодійної сили згину визначається експериментально чи через приведений коефіцієнт тертя (опору).

Висновки. На основі виявлених закономірностей навивання профілів різного січення показано, що зміну моменту навивання обертовою оправкою можна описати узагальненою залежністю для всіх профілів. Відповідно, розрахунок всіх енергосилових параметрів процесу навивання можна проводити по одній методиці, розробленій на основі даного дослідження, із врахуванням конкретних особливостей процесу навивання та характеристик заготовки.

Встановлено, що згин профілів поперечною силою із малим плечем прикладання відбувається при сумарному моменті навивання вищому, ніж при чистому згині, та, відповідно, при вищих енерговитратах. При цьому, суттєве зростання радіального навантаження на оправку негативно впливає на довговічність технологічного обладнання. Проте, при використанні відповідного технологічного обладнання, згин вузьких стрічок на ребро поперечною силою із малим плечем прикладання дозволяє суттєво підвищити стійкість процесу їх навивання. Це дозволяє значно розширити використання технологічного процесу виготовлення витих профілів навиванням на оправку та розширити їх діапазон, зокрема гвинтових спіралей для шнеків, що застосовується у гвинтових конвеєрах, змішувачах, іншому технологічному обладнанні.

Список літератури

1. Гевко Б. М. *Технология изгоовления спиралей инеков : монография*. Львов: Вища школа, 1986. 128 с.
2. Гевко Б. М., Рогатынский Р. М. *Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин*. Львов: Вища школа, изд-во при Львов. ун-те, 1989. 176 с.
3. Hevko I., Dyachun A., Lyashuk O., Martsenko G. A. Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 49(1). P. 77–82.
4. Marciniak Z., Duncan J. L., Hu S. J. *Mechanics of sheet metal forming*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 75 p.
5. Рогатынский Р. М., Данильченко Л. Н. Исследование поперечного изгиба полос в штампах. *Технология и организация производства*. 1990. № 4. 16 с. Деп. в УНИИНТИ 02.12.90 г., № 1160-Ук.
6. Данильченко Л. М., Гевко І. Б., Драган А. П. Дослідження напружено-деформованого стану в процесі формоутворення гнучких гвинтових заготовок. *Наукові нотатки*. Луцьк: ЛДТУ, 2002. С. 49–57.
7. Молтасов А. В., Мотрунич С. И. Исследование чистого изгиба полосы при больших деформациях на основании энергетического критерия пластичности. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*. 2014. 1(70). С. 152–158.
8. Ma J., Welo T. Analytical springback assessment in flexible stretch bending of complex shapes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021. Vol. 160. 103653. DOI: doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103653.
9. Vasykiv V., Pylypets M., Danylchenko L., Radyk D. Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU*. 2021. Vol. 104, № 4. P. 33–43. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.033.
10. Краєвський В. О., Михалевич О. В. Математичне моделювання заключної стадії процесу згинання. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2011. № 1. С. 58–65.
11. Рогатынский Р. М., Гевко І. Б., Дячун А. Є. *Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : монографія*. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2014. 280 с.
12. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Дячун А. Є., Гупка А. Б., Третьяков О. Л. *Технологічне проектування та виготовлення гвинтових транспортно-технологічних робочих органів*. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2025. 457 с.
13. Гевко І. Б., Лешук Р. Я., Гудь В. З. та ін. *Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження*. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 208 с.
14. Гевко І. Б., Рогатынский Р. М., Комар Р. В. та ін. Технологічне проектування способів виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), Ч. 2. С. 109–116. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.109-116](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.109-116).
15. Study of power parameters of the screw spirals forming / O. Lyashuk, R. Rogatynskyy, I. Hevko та ін. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 7th International Conference DSMIE-2024* (4–7

- June 2024, Pilsen, Czech Republic). Vol. 1: Manufacturing and Materials Engineering. P. 287–298. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_24.
16. Hevko I., Hypka A., Krugluk O. Experimental research of power parameters of the process of forming a shelf on screw blank. *Scientific Journal of TNTU*. 2017. Vol. 87, № 3. P. 102–110. URI: elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/22911.

References

1. Hevko, B. M. (1986). Technology of manufacturing auger spirals: monograph. Lviv: Vyscha shkola [in Russian].
2. Hevko, B. M., & Rogatynskyi, R. M. (1989). Screw feeding mechanisms of agricultural machines. Lviv: Vyscha shkola, vyd-vo pry Lviv. un-te [in Russian].
3. Hevko, I., Dyachun, A., Lyashuk, O., & Martsenko, H. A. (2016). Research of the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 49(1), 77–82.
4. Marciniak, Z., Duncan, J. L., & Hu, S. J. (2002). Mechanics of sheet metal forming. Oxford: Butterworth-Heinemann.
5. Rogatynskyi, R. M., & Danylchenko, L. N. (1990). Study of transverse bending of strips in dies. *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva*, (4), 16 pp. Deposited in UNINTI 02.12.1990, No. 1160-Uk [in Russian].
6. Danylchenko, L. M., Hevko, I. B., & Drahan, A. P. (2002). Study of the stress–strain state in the process of shaping flexible screw blanks. *Naukovi notatky*, 49–57 [in Ukrainian].
7. Moltasov, A. V., & Motrunych, S. I. (2014). Study of pure bending of a strip at large deformations based on the energy criterion of plasticity. *Visnyk NTUU “KPI”. Mashynobuduvannia*, 1(70), 152–158 [in Ukrainian].
8. Ma, J., & Welo, T. (2021). Analytical springback assessment in flexible stretch bending of complex shapes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 160, 103653. doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103653.
9. Vasylykiv, V., Pylypets, M., Danylchenko, L., & Radyk, D. (2021). Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU*, 104(4), 33–43. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.033
10. Kraievskyi, V. O., & Mykhalevych, O. V. (2011). Mathematical modeling of the final stage of the bending process. *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia*, (1), 58–65 [in Ukrainian].
11. Rohatynskyi, R. M., Hevko, I. B., & Diachun, A. Ye. (2014). Scientific and applied foundations of creation of screw transport-technological mechanisms: monograph. Ternopil: TNTU im. I. Puliuia [in Ukrainian].
12. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Diachun, A. Ye., Hupka, A. B., & Tretiakov, O. L. (2025). Technological design and manufacturing of screw transport-technological working bodies. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
13. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Hud, V. Z., et al. (2019). Flexible screw conveyors: design, manufacturing technology, experimental research. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
14. Hevko, I. B., Rohatynskyi, R. M., Komar, R. V., et al. (2025). Technological design of methods for manufacturing U-shaped screw surfaces of transport pipes. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42/2), 109–116. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.109-116](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.109-116)
15. Lyashuk, O., Rogatynskyy, R., Hevko, I., et al. (2024). Study of power parameters of the screw spirals forming. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 7th International Conference DSMIE-2024*, 1, 287–298. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_24
16. Hevko, I., Hypka, A., & Krugluk, O. (2017). Experimental research of power parameters of the process of forming a shelf on screw blank. *Scientific Journal of TNTU*, 87(3), 102–110. URI: elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/22911

Roman Rohatynskyi, Prof., DSc., **Mykhailo Pylypets**, Prof., DSc., **Igor Tkachenko**, Assoc. Prof., PhD, **Mariia Pientak**, **Taras Peleshok**, PhD, **Palvo Leskiv**
Ternopil Ivan Pulu National Technical University, Ternopil, Ukraine

Features of Forming Screw and Tubular Profiles by Winding on a Cylindrical Mandrel

The article presents models of winding profiles from strips with different height-to-width ratios of the cross-section using a rotating cylindrical mandrel, along with a justification for the technological design of winding methods for screw and tubular profiles. The stress–strain state during winding is analyzed for plane strain and plane stress conditions under pure bending and bending by transverse force. Differences were established between the bending behavior of wide strips, narrow strips bent on edge, and intermediate profiles on a cylindrical mandrel. A generalized expression was derived to calculate the winding moments for profiles of different cross-sections.

It was demonstrated that when bending by a transverse force with a short lever arm, significant friction forces on the mandrel resist the compression of the inner layers of the workpiece, resulting in tensile stresses; thus, bending occurs due to a moment combined with longitudinal forces. Consequently, the total winding moment is higher than under pure bending, leading to greater energy consumption. At the same time, the radial load on the mandrel increases significantly, which negatively affects the durability of the technological equipment.

However, bending narrow strips on edge by a transverse force with a short lever arm improves the stability of the winding process and enables broader application of this technological method for the production of twisted profiles. This, in turn, expands the range of wound profiles, in particular screw spirals used in screw conveyors, mixers, and other technological equipment.

technological design, transverse force bending, mandrel winding, stress–strain state, screw spiral

Одержано (Received) 27.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 01.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025