

І.Б. Гевко, д.т.н., доц.
А.Є. Дячун, к.т.н., доц.
А.Б. Гупка, аспір.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ГВИНТОВИХ ОЧИСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Метою даної роботи є розроблення технології виготовлення гвинтових очисних елементів шляхом гнуття полочки на стрічці за допомогою роликів та навивання одержаної стрічки з полочкою на оправу. Наведена конструкція пристрою для виконання технологічного процесу гнуття полочки на гвинтовій заготовці за допомогою роликів. У роботі досліджено, що під час збільшення висоти полочки і кута її нахилу сила гнуття гвинтового елемента зростає, що зумовлює потребу у вдосконаленні існуючої технології виготовлення.

Ключові слова: гнуття; полочка; оправу; технологія; стрічка; момент; сила.

Постановка проблеми. Одним з важливих питань сучасного сільськогосподарського машинобудування є підвищення надійності машин, довговічності їх робочих органів, приводів, вузлів і окремих деталей. До цих важливих елементів також належать гвинтові робочі органи машин, що використовуються при транспортуванні, очищенні, подрібненні, змішуванні та інших операціях сільськогосподарського виробництва. Тому важливим питанням є створення оптимальних конструкцій гвинтових робочих органів та технологічних процесів їх виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням виготовлення гвинтових робочих органів присвячені роботи авторів: Б.М. Гевко [2, 6, 8], Р.М. Рогатинського [6], М.І. Пилипця [7], В.В. Васильківа [1]. Також проблемам експлуатації гвинтових робочих органів присвячені роботи А.М. Григор'єва, П.А. Преображенського [4], Х.Герман [3] та інших. Дослідженню проблеми виготовлення спеціальних профільних гвинтових робочих органів присвячені праці А.Л. Ляшука, А.П. Драгана [8] та інші. Однак питання, що виникають при виготовленні профільних гвинтових Г-подібних робочих органів, залишилися малодослідженими і потребують доопрацювання.

Реалізація результатів досліджень. Виготовлення гвинтових очисних елементів проходить у такій послідовності:

1. Гнуття полочки на стрічці за допомогою роликів.
2. Навивання одержаної стрічки з полочкою на оправу.

Розглянемо процес навивання такої стрічки на оправу, що представлено на рисунку 1.

У процесі навивання відбувається стиснення волокон стрічки на внутрішньому діаметрі і розтяг волокон стрічки на зовнішньому діаметрі гвинтового очисного елемента. Тобто, в зоні полочки виникають лише деформації розтягу, а на вертикальній частині заготовки – деформації стиску. Визначимо момент згину стрічки в цих зонах, розглянувши процес деформації в гарячому стані.

Як відомо, радіальні напруження, що виникають у полочці стрічки, визначаються за формулою [5]:

$$\sigma_{\rho 1} = -\beta \sigma_s \cdot \ln \frac{R}{\rho}, \quad (1)$$

де β – коефіцієнт, що враховує вплив середнього головного напруження, дорівнює 1,15;

σ_s – межа текучості матеріалу гвинтового затискного елемента, МПа;

R – зовнішній радіус гнуття, мм;

ρ – полярна координата радіуса гнуття, мм.

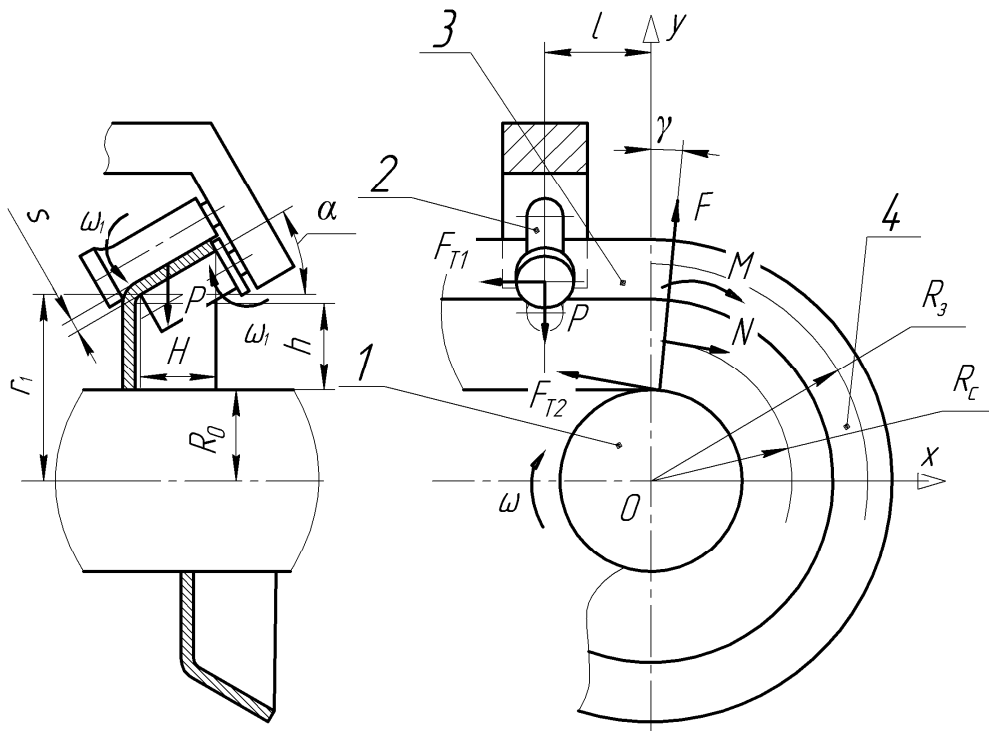


Рис. 1. Розрахункова схема процесу навивання стрічки на оправу:
1 – оправу; 2 – притискний ролик; 3 – стрічка; 4 – гвинтовий елемент

Аналогічно визначаємо радіальні напруження в зоні стиску [5]:

$$\sigma_{\rho 2} = -\beta \sigma_s \cdot \ln \frac{\rho}{r}, \quad (2)$$

де r – внутрішній радіус гнuttя, мм.

Тангенціальні напруження в зоні розтягу:

$$\sigma_{\theta 1} = \beta \sigma_s \cdot \left(1 - \ln \frac{R}{\rho}\right). \quad (3)$$

Тангенціальні напруження в зоні стиску:

$$\sigma_{\theta 2} = -\beta \sigma_s \cdot \left(1 + \ln \frac{\rho}{r}\right). \quad (4)$$

Згідно з розрахунковою схемою, на рисунку 1 радіус гнuttя полички заготовки змінюється від r_1 до $r(x)$:

$$r(x) = r_1 + x \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

де r_1 – найменший внутрішній радіус гнuttя полички, мм;

α – кут нахилу полички, град.

Зовнішній радіус гнuttя заготовки:

$$R(x) = r_1 + \frac{s}{\cos \alpha} + x \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (6)$$

де s – товщина стрічки, мм.

Значення моменту гнuttя під час навивання із підігрівом визначимо як інтегральну суму по висоті заготовки елементарних елементів від тангенціальних напружень:

$$M = \int_0^H \int_{r(x)}^{R(x)} \sigma_{\theta 1} \rho d\rho dx + s \int_{R_0}^{R_0+h} \sigma_{\theta 2} \rho d\rho, \quad (7)$$

де ρ_n – радіус нейтральної поверхні напружень, мм;

h – висота вертикальної частини заготовки, мм;

H – висота полички гвинтового елемента, мм.

Підставляючи (3)-(6) у (7), одержимо:

$$M = \int_0^{Hr_1 + \frac{s}{\cos\alpha}} \int_{r_1 + x \cdot \operatorname{tg}\alpha}^{\frac{s}{\cos\alpha}} \beta \sigma_s \cdot \left(1 - \ln \frac{r_1 + \frac{s}{\cos\alpha} + x \cdot \operatorname{tg}\alpha}{\rho} \right) \cdot \rho d\rho dx + s \int_{R_0}^{R_0+h} -\beta \sigma_s \cdot \left(1 + \ln \frac{\rho}{R_0} \right) \rho d\rho \quad (8)$$

де R_0 – радіус оправы, мм.

Після перетворень рівняння (8) одержуємо:

$$M = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot \sigma_s \cdot \left(bH \left(r_1 + \frac{1}{2}b + H \operatorname{tg}\alpha \right) + \frac{H}{3} (H \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot (-r_1 D + \operatorname{tg}\alpha KH + \frac{1}{2}b + 3r_1 K - D \operatorname{tg}\alpha H)) + \right. \\ \left. + 3r_1^2 (K - D) - b(b + r_1) \right) + \frac{r_1^3 (K - D - C + \ln r_1) + b^3 (K - C) + r_1 b^2}{\operatorname{tg}\alpha} + s \left(-\frac{1}{2} ((R_0 + h)^2 - R_0^2) - \right. \\ \left. - (R_0 + h)^2 \ln \left(\frac{R_0 + h}{R_0} \right) \right),$$

де використано такі позначення:

$$b = \frac{s}{\cos\alpha}; \\ K = \ln(r_1 + b + H \operatorname{tg}\alpha); \\ C = \ln(r_1 + b); \\ D = \ln(r_1 + H \operatorname{tg}\alpha). \quad (9)$$

Згідно з розрахунковою схемою (рис. 1) рівняння рівноваги частини стрічки, що піддається деформації, запишемо таким чином:

$$\left. \begin{aligned} \text{по осі } x: -F_{T1} - F_{T2} \cdot \cos\gamma + N \cdot \cos\gamma + F \cdot \sin\gamma &= 0; \\ \text{по осі } y: -P + F_{T2} \cdot \sin\gamma - N \cdot \sin\gamma + F \cdot \cos\gamma &= 0; \\ \text{сума моментів: } P \cdot l + F_{T1} \cdot R_3 + F_{T2} \cdot R_0 - N \cdot R_c - M &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де F_{T1} – сила тертя між роликом та стрічкою, Н;

F_{T2} – сила тертя між стрічкою та оправою, Н;

γ – кут повороту оправы, град.;

N – поздовжня сила, Н;

F – рівнодіюча нормальних контактних напружень на стрічці, Н;

P – сила гнуття притискним роликом, Н;

l – відстань між центрами оправы та притискного ролика, мм;

R_3 – середній радіус взаємодії гвинтового елемента, мм;

R_c – середній радіус гвинтового елемента, мм.

Сили тертя визначаємо за залежностями:

$$F_{T1} = \mu_1 \cdot P; \quad (1) \\ F_{T2} = \mu_2 \cdot F, \quad (1) \quad (2)$$

де μ_1 – коефіцієнт тертя між притискним роликом та стрічкою;

μ_2 – коефіцієнт тертя між оправою та гвинтовим елементом.

Рівнодіючу нормальних контактних напружень знаходимо за формулою:

$$F = \sigma_r \cdot s \cdot L, \quad (13)$$

де σ_r – контактні нормальні напруження на внутрішньому радіусі гвинтової заготовки, МПа;

s – товщина стрічки, мм;

L – довжина контакту по внутрішньому діаметру, мм.

При відомому моменті гнуття M можна знайти усі сили, що виникають у процесі навивання, розв'язавши систему рівнянь (7). У даному випадку:

$$F = \frac{-P \cdot (\mu_1 \cdot \operatorname{tg}\gamma - 1)}{\mu_2 \cdot \sin\gamma + \operatorname{tg}\gamma \cdot (-\mu_2 \cdot \cos\gamma + \sin\gamma) + \cos\gamma}; \quad (14)$$

$$N = \frac{\mu_1 \cdot P + F \cdot (\mu_2 \cdot \cos \gamma + \sin \gamma)}{\cos \gamma}. \quad (15)$$

Експериментальні дослідження показали, що максимальна сила гнуття P притискним роликом виникає на початковій стадії деформування, тобто, коли кут γ дорівнює нулю. Тому, для спрощення розрахунків, розв'язання системи рівнянь (10) буде таким:

$$P = F; \quad (16)$$

$$N = (\mu_1 + \mu_2) \cdot P; \quad (17)$$

$$P = \frac{M}{l + \mu_1 \cdot (R_s - 1) + \mu_2 \cdot (R_0 - 1)}. \quad (18)$$

Слід зауважити, що тут коефіцієнт тертя μ_1 між притискним роликом і профільною стрічкою є величиною приведеною і не відповідає безпосередньому значенню коефіцієнта тертя для контактуючих матеріалів. Момент, який необхідно прикласти для обертання оправ, залежить від конструктивних особливостей оправ і в загальному випадку визначається згідно з рисунком 1 за залежністю:

$$M_o = k_M \cdot P \cdot (l + \mu_1 \cdot R_s), \quad (19)$$

де k_M – коефіцієнт, що враховує конструктивні виконання оправ.

На основі зазначених формул можна проектувати необхідне технологічне оснащення. При цьому для зменшення моменту обертання оправ, а отже, і зменшення необхідної потужності навивання гвинтової заготовки, потрібно звести до мінімуму коефіцієнт тертя μ_1 , наприклад, використовуючи змащувальні речовини.

Якщо процес навивання гвинтового елемента виконувати в холодному стані, в матеріалі заготовки проходить процес зміцнення, внаслідок чого зростає момент гнуття, що можна визначити за формулою:

$$M = \int_0^H \int_{r_1 + x \cdot \operatorname{tg} \alpha}^{r_1 + \frac{s}{\cos \alpha} + x \cdot \operatorname{tg} \alpha} \beta \left[\sigma_{T0} \cdot \left(1 - \ln \frac{r_1 + \frac{s}{\cos \alpha} + x \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\rho} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\Pi}{2} \cdot \left(2 \ln \frac{\rho}{R_c} - \ln \frac{\rho \left(r_1 + \frac{s}{\cos \alpha} + x \cdot \operatorname{tg} \alpha \right)}{R_c^2} \ln \frac{\left(r_1 + \frac{s}{\cos \alpha} + x \cdot \operatorname{tg} \alpha \right)}{\rho} \right) \right] \cdot \rho d\rho dx + \\ + s \beta \int_{R_0}^{R_0+h} \left[\sigma_{T0} \left(1 + \ln \frac{\rho}{R_0} \right) + \frac{\Pi}{2} \left(2 \ln \frac{R_0+h}{\rho} + \ln \frac{(R_0+h)^2}{\rho R_0} \ln \frac{\rho}{R_0} \right) \right] \rho d\rho, \quad (20)$$

де $\sigma_{T,0}$ – екстрапольована межа текучості, МПа;

Π – лінійний модуль зміцнення, МПа.

Розв'язання рівняння (20) аналітичним методом є досить громіздким, тому визначення конкретного числового значення моменту гнуття доцільно проводити числовим методом, використовуючи відповідні комп'ютерні програми, що значно зменшить час на розрахунок.

Приклад такого розрахунку представлено у вигляді графіка (рис. 2).

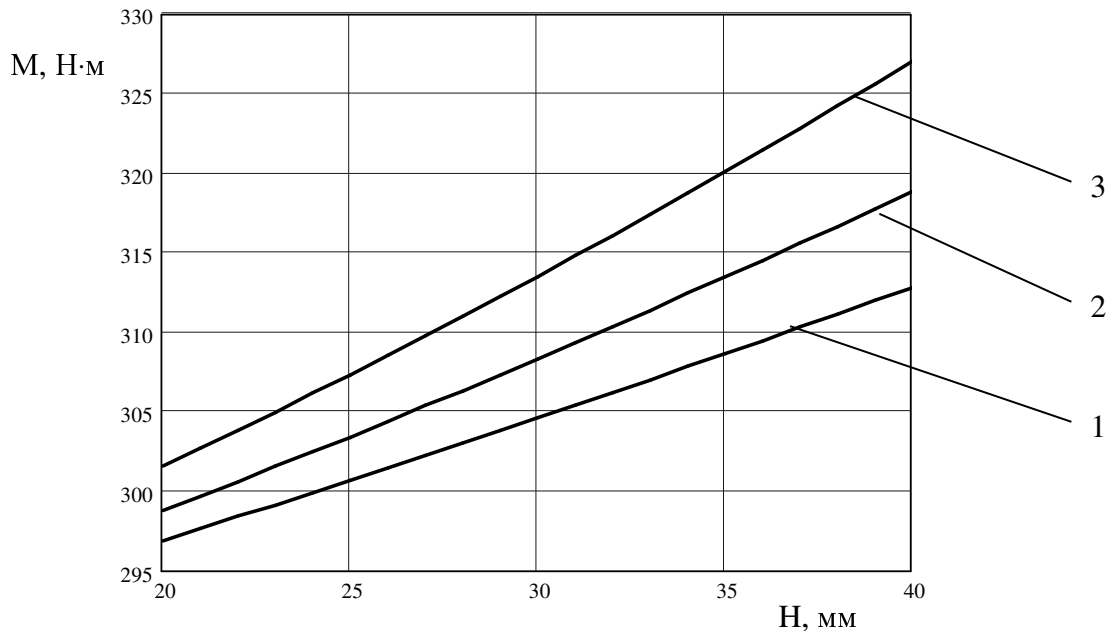


Рис. 2. Графік залежності моменту гнуття стрічки від висоти полицки (сталь 08кп)
 $s = 1,5$ мм, $R_0 = 30$ мм: 1 - $\alpha = 10$ град., 2 - $\alpha = 20$ град.; 3 - $\alpha = 30$ град.

Згідно з графіком (рис. 2) дійдемо висновку, що при збільшенні висоти полицки і кута її нахилу момент гнуття гвинтового елемента зростає.

На основі даних рисунка 2 та (18) будемо наступний графік (рис. 3).

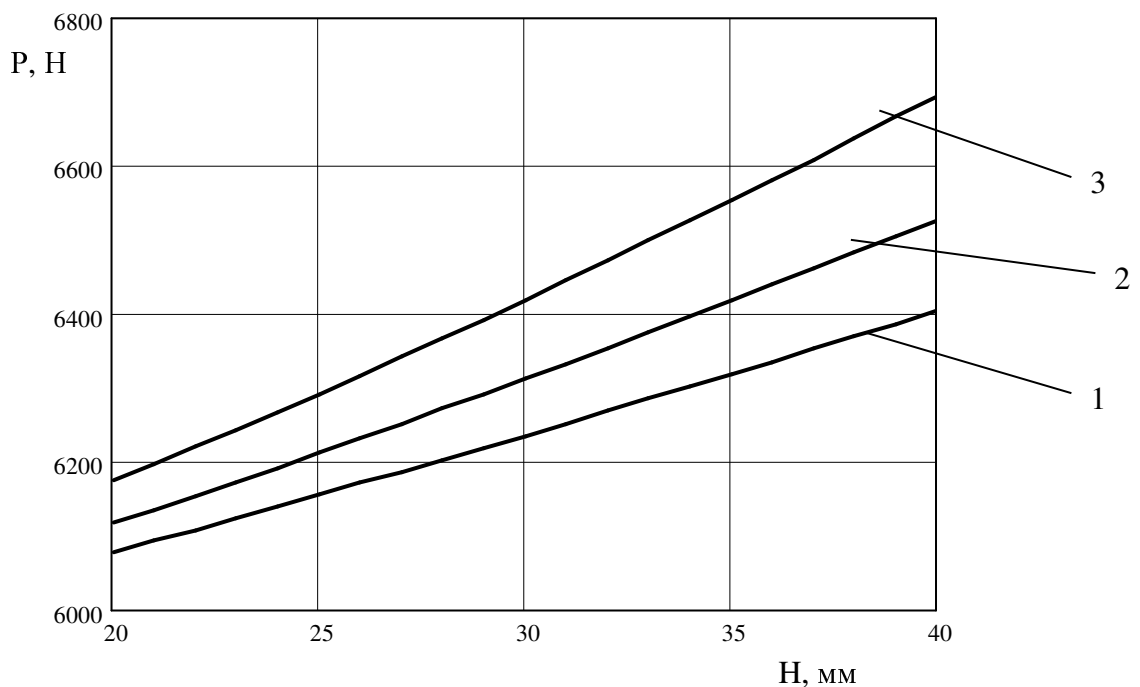


Рис. 3. Графік залежності сили гнуття стрічки від висоти полицки (сталь 08кп)
 $s = 1,5$ мм, $R_0 = 30$ мм: 1 - $\alpha = 10$ град., 2 - $\alpha = 20$ град.; 3 - $\alpha = 30$ град.

Аналіз одержаних графіків на рисунках 2 та 3 показав, що більша частина деформації заготовки припадає на її вертикальну частину, при збільшенні висоти полицки і кута її нахилу сила гнуття гвинтового елемента зростає. Оскільки основною робочою поверхнею гвинтового очисного елемента є

полічка, то для зменшення моменту гнуття такої стрічки необхідно виконувати вирізи на вертикальній частині стрічки.

Висновок. У результаті досліджень запропонована технологія виготовлення гвинтових очисних елементів шляхом гнуття полічки на стрічці за допомогою роликів та навивання одержаної стрічки з полічкою на оправу.

Встановлено, що при збільшенні висоти полічки і кута її нахилу сила гнуття гвинтового елемента зростає. Оскільки основною робочою поверхнею гвинтового очисного елемента є полічка, то для зменшення моменту гнуття такої стрічки необхідно виконувати вирізи на вертикальній частині стрічки.

Список використаної літератури:

1. *Васильків В.В.* Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових заготовок з листового прокату / *В.В. Васильків, Л.Д. Радик, І.Б. Гевко* // Наукові нотатки : міжвуз. збірник (за напрямом «Інженерна механіка»). – 2004. – Вип. 14. – С. 12–18.
2. *Гевко Б.М.* Технология изготовления спиралей шнеков / *Б.М. Гевко.* – Львов : Вища школа, 1986. – 128 с.
3. *Герман Х.* Шнековые механизмы в технологии ФРГ / *Х.Герман.* – Л. : Машиностроение, 1975. – 230 с.
4. *Григор'єв А.М.* Комплексна механізація і автоматизація вантажорозвантажувальних і транспортних робіт в машинобудуванні і приладобудуванні / *А.М. Григор'єв, П.А. Преображенський.* – К. : Наукова думка, 1967. – 116 с.
5. *Зубцов М.Е.* Листовая штамповка / *М.Е. Зубцов.* – Л. : Машиностроение, 1980. – 432 с.
6. Механізми з гвинтовими пристроями / *Б.М. Гевко, М.Г. Данильченко, Р.М. Рогатинський* та ін. – Львів : Світ, 1993. – 208 с.
7. *Пилипець М.І.* Науково-технологічні основи виробництва навивних заготовок деталей машин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / *М.І. Пилипець.* – Львів, 2002. – 35 с.
8. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей / *Б.М. Гевко, О.Л. Ляшук, І.Б. Гевко* та ін. – Тернопіль : ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. – 367 с.

ГЕВКО Іван Богданович – доктор технічних наук, професор Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

- металообробний інструмент;
- технологія машинобудування.

ДЯЧУН Андрій Євгенович – кандидат технічних наук, доцент Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

- металообробний інструмент;
- технологія машинобудування.

ГУПКА Андрій Богданович – аспірант Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

- металообробний інструмент;
- технологія машинобудування.

Стаття надійшла до редакції 22.05.2015