

УДК 621.9.04

Роман Рогатинський, д.т.н., проф.; Андрій Дячун, к.т.н., доц.; Тарас Пелешок, к.т.н.; Павло Леськів; Владислав Пенсьонжко

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ХОЛОДНОГО НАВИВАННЯ СПІРАЛЕЙ ШНЕКІВ НА РЕБРО

Анотація. Розглядається процес навивання спіралей шнеків на оправу на ребро у щільний пакет із подальшим розтягуванням витків на крок та калібруванням на валу. Визначено технологічні похибки розмірів, а саме кроку, зовнішнього та внутрішнього діаметрів витків, з урахуванням виробничих допусків заготовки, оправки та вала. Виведено математичну залежність для оцінки похибки кроку за умови пропорційного розподілу похибок розтягу та калібрування та полів допусків оправки та вала.

Ключові слова. Гвинтові конвеєри, навивання спіралей на ребро, похибки кроку, оправка, калібрування витків.

Roman Rogatynskyi, Andrii Diachun, Taras Peleshok, Pavlo Leskiv, Vladyslav Penionschko

ENSURING THE ACCURACY OF EDGEWISE COLD COILING OF SCREW CONVEYOR FLIGHTS

Abstract. The paper considers the technological process of edgewise winding of flights onto a mandrel into a tight pack, followed by stretching the turns to the required pitch and calibrating them during assembly directly on the shaft. Technological dimensional errors, including pitch, as well as the outer and inner diameters of the turns, are determined for each operation, taking into account manufacturing tolerances of the blank, mandrel, and shaft.

Keywords: screw conveyor flights, edgewise winding, pitch error, mandrel, turns calibration.

Шнекові робочі органи широко використовуються у сільськогосподарському машинобудуванні, переробній та буровій галузях. Функціональна придатність та ефективність їх роботи безпосередньо залежать від геометричної точності спіралей шнеків. Традиційні методи виготовлення часто призводять до значних похибок кроку та діаметрів через пружну післядію матеріалу при виготовленні. Найбільш точним та малоенергоємним є метод холодного навивання спіралей на ребро на оправу в щільний пакет з подальшим його розтягуванням на крок та калібруванням при встановленні на вал. А тому, дослідження формування та розподілу похибок формоутворення з урахуванням допусків оправки та вала, а також обґрунтування математичних залежностей для їх оцінки, є актуальним науково-прикладним завданням для забезпечення заданої точності гвинтових робочих органів.

Метою дослідження є розробка моделі технологічного забезпечення точності виготовлення гвинтових робочих органів, зокрема спіралі шнека при її навиванні на вал, подальшому розтягу на крок та встановленні на вал.

Типовий технологічний процес виготовлення спіралей шнеків методом перервного холодного навивання на оправці передбачає такі операції: розрізування штаб (смуг) на мірні заготовки та формування кінця для її закріплення на оправці; навивання суцільного пакету витків на оправу діаметром d_{on} , розтягування витків на крок T_0 , калібрування витків на валу діаметром d_0 з кроком T і внутрішнім діаметром $d \rightarrow d_0$. При цьому на всіх операціях нагромаджуються похибки

виготовлення та позиціонування, а тому досягнення необхідного рівня точності заданих параметрів є однією із вирішальних умов технологічної надійності процесу.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що внутрішній діаметр d_1 щільного пакету витків зв'язаний із параметрами спіралі $D \times d \times T$ при його розтягуванні залежністю:

$$d_1 = 2B(1 - 0,022T/d)/(\psi - 1), \quad (1)$$

де ψ - коефіцієнт нерівномірності витягування, $\psi = \sqrt{(\pi^2 D^2 + T^2)/(\pi^2 d^2 + T^2)}$; T, D , та d - відповідно, крок, зовнішній та внутрішній діаметри гвинтової спіралі; B - ширина штаби, $B = (D - d)/2$.

При навиванні щільних пакетів витків на оправку великого діаметру проходить пружне розкручування витків і збільшення їх внутрішнього діаметру після навивання та розкріплення. Теоретично величина пружного розкручування визначається на основі теореми про розвантаження. Якщо навивання проводиться тільки крутним моментом (чи силою із значним плечем прикладення згинальної сили) [1], то зміна кривини K_p нейтрального радіуса, який приймаємо рівним середньому радіусу витків, в результаті їх розкручування визначається як:

$$K_p = \frac{2}{d_{on} + B} - \frac{2}{d_1 + B} = \frac{M}{EI}, \quad (2)$$

де M - момент навивання; E - модуль пружності; I - момент інерції площі поперечного перерізу витка.

Дійсне значення внутрішнього діаметру витків після розкручування

$$d_1 = \frac{2(d_{on} + B)}{K_p(d_{on} + B) - 2}. \quad (3)$$

У випадку одночасного згину смуги моментом та осьюовою силою розтягу для оцінки зміни кривини витків можна використовувати приведені значення моменту навивання. В результаті впливу різних технологічних факторів відбувається розсіювання значень кривини витків K_p , яке позначимо ΔK . Похибка оцінки внутрішнього діаметра Δd_1 щільного пакету витків після розвантаження з врахуванням похибки розсіювання кривини ΔK буде

$$\Delta d_1 = \Delta d_{on} + \Delta K(d_{on} + B)^2, \quad (4)$$

де Δd_{on} - похибка навитого витка від впливу оправки.

При щільному навиванні пакету витків похибку Δd_{on} можна прийняти рівною допуску виготовлення оправки $\Delta d_{on} = \delta d_{on}$. Похибка кривини залежить від схеми навивання і, в першому наближенні, визначається як $\Delta K = \Delta M / EI$. При розрахунку похибки виготовлення пакету основною складовою є похибка від пружного розкручування, а похибкою від виготовлення оправки можна нехтувати, оскільки вона на порядок менше.

Похибка $\Delta \psi$ визначення коефіцієнта нерівномірності витягування буде

$$\Delta \psi = \frac{2B}{d_1} \left(\frac{\Delta d_1}{d_1} + \frac{\delta B}{B} \right), \quad (5)$$

де δB - допуск на ширину штаби, який, при виготовлення штаби відрізанням з листового металу, може бути суттєвим.

Похибки $\Delta \psi$ коефіцієнту нерівномірності витягування трансформуються, відповідно, у похибки діаметру спіралі Δd та похибки кроку ΔT . Похибка по

зовнішньому діаметру $\Delta D = \Delta d + \delta B$. Для каліброваних штаб, із малим допуском на ширину, $\Delta d \gg \delta B$ і можна прийняти, що $\Delta D = \Delta d$. В технічних вимогах на виготовлення гвинтових робочих органів назначають допуски на крок T спіралі та зовнішній діаметр витків D . Технологічно, при виготовленні витків із сформованим параметром ψ , розміри зв'язані функціональною залежністю

$$\pi^2 D^2 + T^2 = \psi^2 [\pi^2 (D - 2B)^2 + T^2]. \quad (6)$$

В процесі розтягування, зміна похибки одного із біжучих параметрів T чи D при автоматично призводить до зміни іншого у співвідношенні

$$\lambda_{\Delta} = \Delta T / \Delta D = \pi^2 [D - \psi^2 (D - 2B)] / [T(\psi^2 - 1)]. \quad (7)$$

Тому, при оцінці точності технологічного процесу виготовлення гвинтових робочих органів, можна визначити можливі похибки тільки по одному (незалежному) параметру спіралі, наприклад кроку, що отримується останнім і є завершальною ланкою просторового розмірного ланцюга. Нехтуючи факторами, вплив яких несуттєвий, із врахуванням (7) виведена залежність оцінки впливу похибок обробки на поле розсіювання величини кроку ΔT :

$$\Delta T = \frac{T}{\sin^2 \alpha} \left\{ \left[\frac{\Delta d_1 (\psi - 1)}{2B} + \frac{\delta B}{B} \right] \frac{\psi}{\psi + 1} + \frac{\Delta d \cos^2 \alpha}{d} \left[1 + \frac{2B}{d (\psi^2 - 1)} \right] \right\}, \quad (8)$$

де α_d - кут підйому витка по внутрішньому діаметру, $\tan \alpha_d = T / (\pi d)$.

Дана залежність включає як похибки на внутрішній діаметр щільно навитого пакту при його виготовленні так і похибки внутрішнього діаметру витягнутих і прикріплених до валу витків, а також допуск на ширину штаби, навитої на ребро.

Проведені дослідження показали, що при навиванні на типовому обладнанні надійність холодного процесу навивання рифів недостатньо висока. Так, для спіралей параметрами $T=180$ мм, $D=228$ мм, $d=168$ мм, виготовленої із штаби шириною 30 мм, залежність впливу технологічних факторів на похибку кроку прийме вигляд:

$$\Delta T = 6,4 \Delta d_1 + 32,9 \delta B + 13 \Delta d. \quad (9)$$

Тобто, для того, щоб досягти значення технологічного допуску $T = 180 \pm 4$ мм при пропорційальному розподілу поля допуску між складовими необхідно забезпечити: $\Delta d_1 = 0,56$ мм; $\delta B = 0,08$ мм, $\Delta d = 0,2$ мм, що, для випадку виготовлення великогабаритних шнеків досить складно. Із залежності (9) випливає, що найбільший вплив на похибку кроку мають значення допуску заготовки, менший - похибки позиціонування витої заготовки на валу і найменший - похибки, що виникають при навиванні суцільного пакету витків..

У роботі проведено комплексний аналіз технологічного процесу виготовлення спіралей шнеків методом холодного навивання на ребро та його розмірний аналіз. Встановлено закономірності формування похибок кроку, внутрішнього та зовнішнього діаметрів на кожній стадії виготовлення - від навивання щільного пакета на оправку до калібрування на валу. Запропонована математична залежність, яка дозволяє прогнозувати похибку кроку з урахуванням взаємного впливу полів допусків заготовки та похибок формоутворення, що забезпечує підвищення точності виготовлення та складання шнеків і підвищення їх якості.

Перелік посилань

1 Рогатинський Р. М. Особливості формування гвинтових та трубчатих профілів навиванням на циліндричній оправці / Р.М. Рогатинський, М.І. Пилипець, І.Г. Ткаченко, М.Д. П'єнтак, Т.М. Пелешок, П.О. Леськів. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2025. Вип. 12(2). С. 196-203.