

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

НАВРОЦЬКА ТЕТЯНА ДЕМ'ЯНІВНА

УДК 621.9.04

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ
ГВИНТОВИХ СЕКЦІЙНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ МАШИН**

05.02.08 – технологія машинобудування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2021

Дисертація на правах рукопису.

Роботу виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ляшук Олег Леонтійович,
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, завідувач кафедри автомобілів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Марчук Віктор Іванович,
Луцький національний технічний університет, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки;

кандидат технічних наук,
Кондратюк Олександр Михайлович,
Національний університет водного господарства та природокористування,
доцент кафедри теоретичної механіки, інженерної графіки та машинознавства.

Захист відбудеться «11» травня 2021 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.03 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, аудиторія 79.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, корпус №2.

Автореферат розіслано « 9» квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.Є. Дячун

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній час розвиток машинобудування в умовах ринкової економіки вимагає нових підходів до підвищення експлуатаційних і технологічних параметрів машин, що дають можливість підвищити продуктивність праці та ефективність виробництва, покращити якість продукції. Це вимагає розширення номенклатури, створення й використання високоефективних ресурсощадних технологій виготовлення робочих органів машин.

Незважаючи на значну кількість наукових праць, які присвячені проектуванню та виготовленню гвинтових секційних робочих органів (ГСРО), залишаються відкритими питання щодо підвищення ефективності їх виготовлення із врахуванням їх конструктивних особливостей. Принциповою відмінністю таких конвеєрів є те, що гнучкий гвинтовий секційний робочий орган вільно (без опор) розташовується в еластичному кожусі і по його внутрішній поверхні переміщає матеріал в зону вивантаження. Перевагою такого типу конвеєра є можливість зміни траси транспортування і, відповідно, зони вивантаження виключно переміщенням технологічної магістралі при стаціонарному розташуванні бункера і елементів приводу.

Відповідно, важливою задачею є дослідження та розроблення ефективних технологічних процесів виготовлення ГСРО із вдосконаленням їх конструкції, що знаходять важливе застосування в різних галузях народного господарства.

Тому в межах означених завдань створення та практична реалізація раціональних технологічних процесів виготовлення нових конструкцій гнучких гвинтових секційних робочих органів з розширеними технологічними можливостями є **актуальним**, що сприяє впровадженню конкурентоздатної технології з високими техніко-економічними показниками, значному підвищенню експлуатаційної надійності та продуктивності праці.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Вирішення актуальної проблеми, що складає основу дисертаційної роботи, виконано відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 6 серпня 2014 р. № 385 “Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на період до 2020 року”. Дисертаційна робота виконано відповідно до тематик наукового напрямку Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя в рамках науково-дослідних держбюджетних тем: «Синтез гвинтових транспортно-технологічних механізмів з розширеними технологічними можливостями на основі САПР «Гвинтові конвеєри»» (№ державної реєстрації 0115U002450); «Моделювання, синтез і розроблення енергоефективних транспортуючих та перевантажувальних систем для технологічної обробки насипних вантажів» (№ державної реєстрації 0117U002240); «Розробка та комплексне дослідження синтезованих транспортно-технологічних механізмів автоматизованих виробничих систем» (№ державної реєстрації 0117U003998).

Мета роботи й завдання дослідження. *Метою роботи* є підвищення технологічності гвинтових секційних робочих органів машин, удосконалення технологічного процесу та розроблення високопродуктивного технологічного оснащення для їх виготовлення.

Для досягнення мети в роботі поставлені та вирішені такі завдання:

- проведено аналіз відомих технологій виготовлення ГСРО та на цій основі вдосконалено технологію їх виготовлення із подальшим розвитком теоретичних передумов і удосконаленням їх конструкції;
- виведено аналітичні залежності для визначення основних силових параметрів процесу навивання гвинтових секційних заготовок (ГСЗ) пристроєм з обертовою втулкою залежно від їх конструктивних та інших параметрів;
- розроблено математичну модель процесу калібрування на крок витків гвинтового секційного робочого органу із щільного навивання, виведено аналітичну залежність для визначення крутного моменту на приводі для здійснення калібрування;
- розроблено динамічну модель процесу калібрування на крок витків гвинтового секційного робочого органу із щільного навивання з виведенням диференціальних рівнянь руху елементів приведеної системи та їх розв'язком;
- спроектовано і виготовлено технологічне устаткування для виготовлення сферичної втулки ГСРО, формоутворення гвинтових секційних заготовок пристроєм з обертовою втулкою, процесу калібрування на крок витків гвинтового секційного робочого органу із щільного навивання та сили різання під час проточування ГСЗ;
- проведено комплекс експериментальних досліджень для визначення основних конструктивних та силових параметрів процесу формоутворення заготовок для ГСРО пристроєм з обертовою втулкою, процесу калібрування на крок витків гвинтового робочого органу із щільного навивання, виготовлення сферичної втулки ГСРО та проточування ГСЗ;
- розроблено інженерну методика проектування технологічного устаткування для виготовлення секційних гвинтових робочих органів з подальшим впровадженням у виробництво результатів досліджень.

Об'єкт дослідження – прогресивні технологічні процеси виготовлення гвинтових секційних робочих органів конвеєрів.

Предмет дослідження – взаємозв'язок конструктивних та технологічних параметрів виготовлення гвинтових секційних робочих органів машин.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження ґрунтувались на фундаментальних засадах загальної технології машинобудування, основах теорії різання матеріалів, пластичного деформування, пружності, а також математичному апараті аналізу й синтезу процесів формоутворення, аналітичної механіки. Експериментальні результати дослідження параметрів та перевірка теоретичних результатів проводились з використанням розроблених алгоритмів, програм, комп'ютерного оброблення результатів досліджень, методів математичної статистики, а також запропонованих у роботі методик визначення технологічних, силових і конструктивних параметрів виготовлення ГСРО.

Наукова новизна отриманих результатів: На основі системного підходу до дослідження технологічних процесів виготовлення ГСРО в роботі отримано такі наукові результати:

- вперше виведені аналітичні та емпіричні залежності для розрахунку силових і конструктивних параметрів процесу виготовлення елементів секційних гвинтових робочих органів конвеєрів методом навивання стрічок пристроєм з

обертовою втулкою, який дозволяє розподілити навантаження на формоутворюючі ролики.

➤ отримала подальший розвиток модель формоутворення гвинтових секційних елементів способом навивання на оправу складного профілю, отримано аналітичні залежності для розрахунку силових параметрів формування гвинтових секційних заготовок складного профілю та їх зв'язок з конструктивними параметрами технологічного спорядження;

➤ набуло подальшого розвитку дослідження динамічних характеристик процесу калібрування ГСЗ на крок із щільно навитих витків змінного зовнішнього діаметра, що дає змогу визначити основні параметри процесу калібрування та встановити характер зміни величини деформацій складових приведеної системи із встановленням силових параметрів та динамічних навантажень процесу.

Практичне значення отриманих результатів. Найважливіше практичне значення отриманих результатів роботи полягає в удосконаленні технології формоутворення ГСРО підвищеної продуктивності, зменшенні собівартості та енергомісткості процесів їх виготовлення. Запропоновано практичні рекомендації щодо створення нових методів формоутворення та оброблення ГСРО, устаткування для їх виготовлення, спорядження для контролю технологічних параметрів.

Основні результати роботи впроваджено в навчальний процес підготовки бакалаврів за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» для викладання дисциплін «Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин», «Технологія обробки типових деталей та складання машин», «Технологія та устаткування машинобудівних виробництв» на кафедрі інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Технічну новизну одержаних результатів захищено 5 патентами України на корисні моделі. Основні результати роботи впроваджено у ТДВ «Булат» (смт. Микулинці).

Особистий внесок здобувача. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень отримані автором самостійно. Розробка методик досліджень, аналіз і узагальнення одержаних результатів, формулювання основних підсумкових положень роботи виконано автором особисто. В роботах, опублікованих в співавторстві, автором: розроблено теоретичні основи процесу калібрування витків гвинтового робочого органа [1, 2, 5, 18], досліджено силові параметри формоутворення гвинтових елементів різного профілю [3, 9], розглянуто підвищення надійності і довговічності гвинтових секційних робочих органів [6], згину гнучкого гвинтового конвеєра виготовленого з секційних елементів [14], відпрацювання конструкції гвинтових секційних робочих органів на технологічність [7], розглянуто методику проектування гвинтових робочих органів гнучких гвинтових конвеєрів [8], досліджено динаміку процесу калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок [4], представлено особливості проектування та виготовлення навивних заготовок деталей машин [11-13, 17] та результати їх експериментальних досліджень [18], запропоновано конструкції механізмів ГСРО [15, 19, 20, 22, 24] спорядження для контролю конструктивних параметрів заготовок [10, 18, 20]. Постановка задач, аналіз і трактування

результатів виконано спільно з науковим керівником та, частково, із співавторами публікацій.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати наукових досліджень, що містяться в дисертації, доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях: XVIII науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, ТНТУ, 2014); IV Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій”(м. Тернопіль, ТНТУ, 2015); XIX науковій конференції ТНТУ ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, ТНТУ, 2016 р.); III Всеукраїнській науково-технічній конференції «Інноваційні розробки студентів і молодих науковців в галузі технічного сервісу машин» (м. Харків, ХНТУСГ, 2016 р.); XIX науковій конференції ТНТУ ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, ТНТУ, 2017 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 60 річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175 річчя з дня народження Івана Пулюя, (м. Тернопіль, ТНТУ, 2020). Робота доповідалась й отримала позитивний відгук на розширеному засіданні науково-технічного семінару Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 24 наукових праці, з них 1 – монографія у співавторстві, 13 – у наукових фахових виданнях, одна з яких опублікована в журналі за кордоном, 5 – патенти України на корисні моделі, 5 – у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, загальних висновків, і додатків. Загальний обсяг дисертації – 253 сторінки, в тому числі 84 рисунків, 22 таблиць, список використаних літературних джерел із 147 найменувань, 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації – 155 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету та завдання роботи, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналіз та узагальнення відомих наукових напрацювань і проблемних питань із застосування методів проектування та виготовлення гвинтових робочих органів машин, обґрунтовано доцільність проведення досліджень та перспективність виготовлення ГСРО запропонованим новим методом.

Значний внесок у формування наукових основ дослідження й проектування технологічних процесів, нового технологічного оснащення для виготовлення гвинтових механізмів, їх розроблення, удосконалення та оптимізації конструкторсько-технологічних рішень зробили вчені Аверкієв Ю.А., Васильків В.В., Гевко Б.М., Гевко І.Б., Герман Х., Григор'єв О.М., Гурвич В. Е., Данильченко Л.М., Журавльов А.З., Мошнін Є.М., Пилипець М.І., Преображенський П.А., Рене І.П., Рогатинський Р.М., Церна А.Е., Шифрін Д.Я., Chris Rorres, Alain Holeyman, Helmut Glawion, Rosin Erwin та інші.

Проведено патентний пошук комплексних методів проектування та виготовлення гвинтових робочих органів машин. На основі проведеного аналізу визначено наукові підходи та напрямки досліджень як вихідні дані для вирішення поставлених в роботі завдань.

У другому розділі наведено теоретичні передумови розроблення процесу формоутворення гвинтових секційних заготовок, зокрема із використанням пристрою з обертовою втулкою. Процес навивання стрічки на ребро з калібруванням за зовнішнім діаметром, внаслідок розподілу зусилля згину в контактній зоні притискної оправи, має свої особливості. Для їх виявлення розглянуто навивання стрічкової заготовки шириною B_0 та товщиною H_0 у пристосуванні, в якому пустотіла обертова втулка, що обертається від приводу верстату з кутовою швидкістю ω , формувє зовнішній радіус витка R (рис. 1).

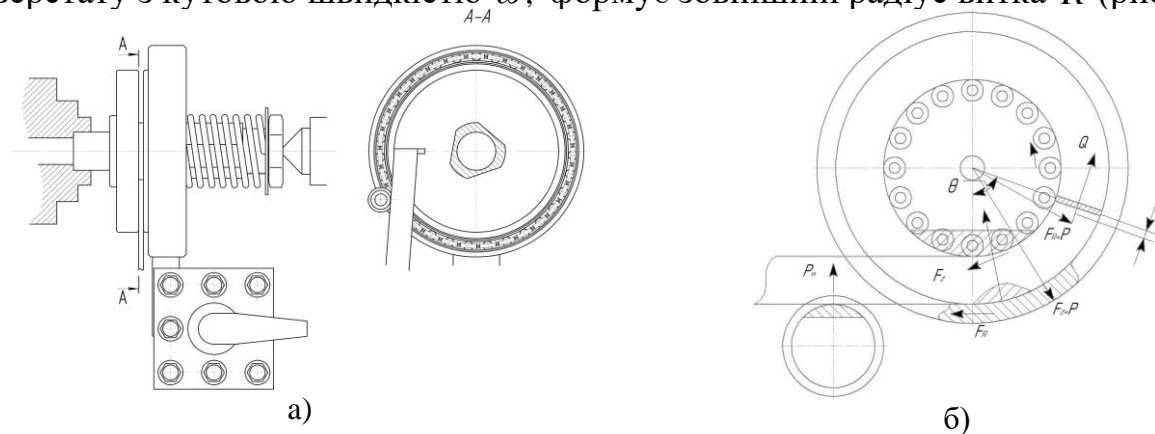


Рис. 1. Схеми навивання ГСЗ обертовою втулкою:

а) - конструктивна схема пристрою для навивання ГСЗ; б) – розрахункова схема навивання ГСЗ

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. Товщина стрічки при згині змінюється залежно від коефіцієнта нерівномірності витягування ψ за законом,

$$h_\rho = H_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} = \frac{2\beta B_0 (1 + \psi + \sqrt{\psi})(\sqrt{R} + \sqrt{r})}{3(1 + \psi + 2\sqrt{\psi})\sqrt{\rho}}, \quad (1)$$

де ρ - біжучий радіальний параметр виділеного поздовжнього шару навитої стрічки; ρ_0 - радіус нейтрального шару деформації, довжина якого при навиванні (згині) не змінюється; $\beta = B/B_0 = (R-r)/B_0$ - відношення ширини B навитої спіралі до ширини стрічки (заготовки).

Через складність напружено-деформованого стану стрічки при її згині на ребро за зовнішнім діаметром обертової пустотілої оправи (матриці) (рис. 1б) енергосилові параметри процесу визначали із балансу робіт.

Для цього виділено елемент заготовки довжиною l_0 , довжина якого по лінії нейтрального шару деформацій радіусом ρ_0 після навивання залишається незмінною і визначається дугою з кутом Θ , $\Theta = l_0 / \rho_0$. Робота, затрачена тільки на згин елемента стрічки довжиною l_0 , буде $A_M = M_{32} \Theta$.

Момент згину M_{32} створюється парою сил P згину, прикладених до стрічки від дії направляючого ролика P_r та обтискної втулки P_R , ($P_R \approx P_r \approx P = M_{32}/l_P$), де l_P - плече прикладення пари сил, залежить від конструктивного виконання обтискної втулки. Ці сили направлені перпендикулярно до зовнішньої та внутрішньої крайок витків в зоні деформації і мають складові сили тертя μP . Сили тертя, в основному, локалізуються по направляючому ролику, що контактує з внутрішньою, найширшою крайкою спіралі і визначаються радіальним параметром r . Робота сил тертя ковзання по направляючому ролику, $A_{mp} = k_P r \mu P \Theta$, де k_P - коефіцієнт приведення радіального параметру сил тертя до r , для даної конструкції $k_P \approx 1$.

Витки при формоутворенні підтискаються по осі притискною привідною втулкою із силою F_z , пропорційною силі P , що забезпечується вибором притискних пружин, $F_z = k_Z P = k_Z M_{32}/l_P$, де k_Z - коефіцієнт пропорційності. Тоді робота на подолання сил опору від тертя стрічки до притискної втулки $A_{on} = r_F \mu F_z \Theta$, де r_F - радіальний параметр (плече) прикладання сили F_z по внутрішній крайці спіралі (із найбільшою товщиною), $r_F = k_F r$, де $k_F \approx 1$.

Процес навивання здійснюється крутним моментом на шпинделі $M_{нав}$, який через притискну привідну втулку стрічки створює тангенціальну силу Q , і протягує закріплену у втулці стрічку через калібр, утворений направляючою та обтискною втулками $M_{нав} = Q \cdot r_c$, де r_c - радіальний параметр центра ваги січення, $r_c = (R + r + \sqrt{Rr})/3$. Робота зовнішніх сил формоутворення елемента заготовки довжиною l_0 буде $A_Q = Q \cdot l_0$, а потужність, відповідно, $N_n = M_{нав} \omega$.

Сила Q , що втягує стрічку в зону згину, одночасно буде її розтягувати на величину $\Delta l = \varepsilon l_0$, де ε - відносне видовження стрічки, $\varepsilon = r_c / \rho_0 - 1$. Робота, що затрачається на розтяг стрічки при її навиванні, визначається, як $A_\varepsilon = Q \varepsilon l_0$.

Відповідно, рівняння балансу робіт при навиванні стрічки

$$Q \cdot l_0 = M_{32} \Theta + k_P r \mu P \Theta + r_F \mu F_z \Theta + Q \varepsilon l_0. \quad (2)$$

Звідки, з врахуванням того, що $l_0 = \rho_0 \Theta$,

$$Q = \frac{M_{32} [1 + \mu r P (k_P + k_Z k_F)]}{r_c (1 - \varepsilon)} = K_Q \frac{M_{32}}{r_c}, \quad (3)$$

де параметр приведення $K_Q = [1 + \mu k_\mu (k_P + k_Z k_F) (r/l_P)] / (1 - \varepsilon)$.

За результатами досліджень виведена залежність моменту навивання стрічки на ребро від коефіцієнта нерівномірності витягування ψ

$$M_{32} = \frac{K_M \beta B_0^2 H_0}{4} (\sigma_{T0} + \Pi \ln \sqrt{\psi}), \quad (4)$$

де σ_{T0} - екстрапольована границя текучості матеріалу стрічки, МПа; Π - лінійний модуль зміцнення матеріалу стрічки, МПа; K_M - параметр впливу кривини згину на момент згину $K_M = (4/3) \psi^{0.25} (\sqrt{\psi} + 2) / (\sqrt{\psi} + 1)^2 \approx \psi^{-0.1}$.

Відповідно, момент та потужність навивання на шпинделі верстату

$$M_{\text{наб}} = r_c Q = K_Q M_{32} ; \quad (5)$$

$$N_H = K_Q M_{32} \omega. \quad (6)$$

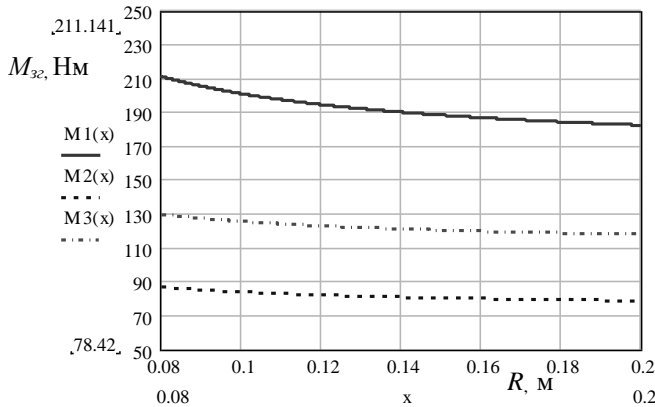


Рис. 2. Графіки зміни моменту навивання M_{32} від зовнішнього радіуса спіралі ($x \equiv R$) при: 1 - $H_0 = 2$ мм, $B_0 = 30$ мм – суцільна лінія; 2 - $H_0 = 3$ мм, $B_0 = 20$ мм – штрих-пунктирна лінія; 3 - $H_0 = 2$ мм, $B_0 = 20$ мм – штрихова лінія

На рис. 2 відображено зміну залежності моменту згину M_{32} при навиванні стрічки із матеріалу Ст 3 постійної ширини B_0 та товщини H_0 заготовки від зовнішнього радіуса спіралі R . На рис. 3 наведено графіки залежності моменту згину M_{32} від ширини B_0 при навиванні стрічки із Ст 3 у пустотілій формувальній втулці зовнішнім діаметром від 100 до 300 мм із калібруванням за зовнішнім діаметром витків. На рис. 4 показано зміну залежності моменту згину від ширини заготовки B_0 із Ст 3 при навиванні із калібруванням за зовнішнім діаметром витків.

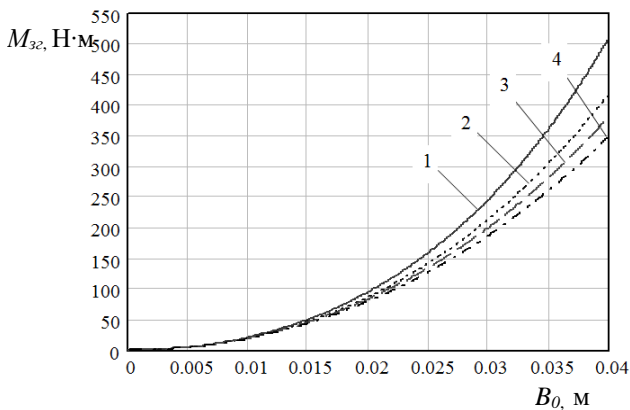


Рис. 3. Графіки зміни моменту згину M_{32} від ширини заготовки B_0 при навиванні витків із зовнішніми радіусами: 1 - $R = 50$ мм; 2 - $R = 75$ мм; 3 - $R = 100$ мм; 4 - $R = 150$ мм

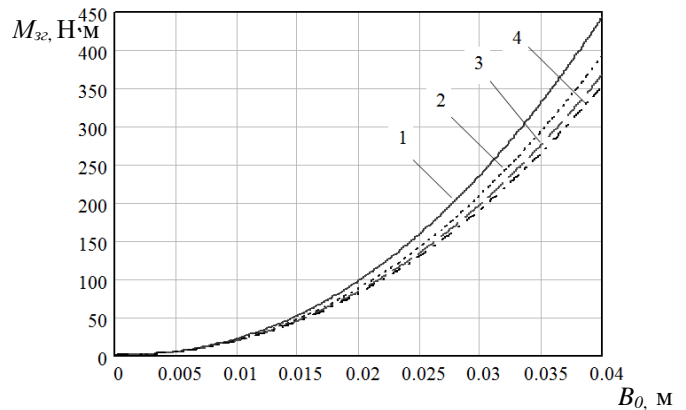


Рис. 4. Графіки зміна моменту згину M_{32} від ширини заготовки B_0 при навиванні витків із внутрішніми радіусами: 1 - $r = 25$ мм; 2 - $r = 50$ мм; 3 - $r = 75$ мм; 4 - $r = 100$ мм

При розвантаженні форма січення спіралі практично не змінюється, а радіус центру ваги січень та внутрішній радіуси витків збільшуються на величину пружного розгину Δr_c .

Відповідно зовнішній та внутрішній діаметри навитого пакету будуть: $D_c = 2(R + \Delta r_c)$, $d_c = D_c - 2\beta B_0$. Діаметр формуючої поверхні обтисної втулки визначають як

$$D_o = d_s + 2B_0 - 2\Delta r_c = \left(1 - \frac{k_T T}{d}\right) \left(\frac{D-d}{\psi-1}\right) + 2B_0 - \frac{2r_c^2 \Delta K}{1+r_c \Delta K}, \quad (7)$$

де D, d та T - відповідно зовнішній та внутрішній діаметри та крок готової розтягнутої спіралі; k_T - коефіцієнт зміни форми витків при розтягу, $k_T = 0,02-0,022$; ΔK - зміна кривини витків щільного пакету після вивільнення з пристосування внаслідок пружного розкручування, $\Delta K = M_{32} / EI$. Тут E -

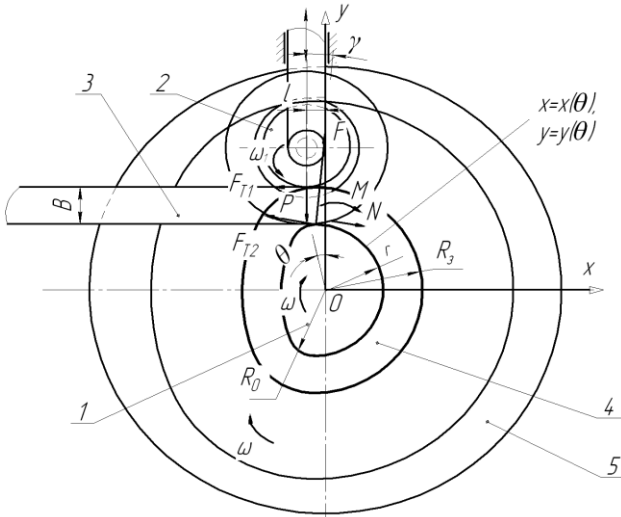


Рис. 5. Розрахункова схема процесу навивання стрічки на оправу складного профілю: 1 – оправу складного профілю; 2 – притискний ролик; 3 – стрічка; 4 – профільний гвинтовий елемент; 5 – торцевий кулачок, форма якого відповідає еквідистанті оправу 1

модуль пружності матеріалу стрічки, I – момент інерції площі поперечного січення витків.

При навиванні ГСЗ із підтримуючими роликами, процес розбивається на етапи гнуття стрічки на ребро на n -ому ролику. Сумарна робота для навивання елементарної довжини витка dl_0 з кінцевими параметрами R, r , кривиною нейтрального шару деформацій

$$\kappa_6 = \sum_{i=1}^n \Delta\kappa_i,$$

$\kappa_i = (\psi_i - 1)/(B\sqrt{\psi_i})$, буде

$$dA = M_{3z} d\Theta = M_{3z} \kappa_6 dl_0 = \sum_{i=1}^n dA_{i6}. \quad (8)$$

Звідки сумарний момент навивання стрічки обтискною оправкою з багатьма підтримуючими роликами визначається за залежністю (5), де M_{3z} обчислюється як

$$M_{3z} = \sum_{i=1}^n M_{3z,i}(\kappa_i) \Delta\kappa_i / \kappa_6, \quad (9)$$

де $\Delta\kappa_i$ – приріст кривини при формування стрічки на i -тому ролику; $M_{3z,i}(\kappa_i) = M_{3z,i}(\psi_i)$ – моменти згину стрічки на кожному ролику.

На рис. 5 наведено розрахункову схему для дослідження силових параметрів процесу навивання стрічки на оправу складного профілю в поперечному перерізі, що заданий в параметричному виді $x=x(\theta_1), y=y(\theta_1)$, де θ_1 – кутовий параметр, що визначає кут повороту оправу, рад.

В процесі навивання відбувається стиснення волокон стрічки на внутрішньому діаметрі і розтяг волокон стрічки на зовнішньому діаметрі гвинтового профільного елемента. Момент навивання стрічки на оправу складного профілю в холодному стані, коли відбувається зміцнення матеріалу стрічки

$$M_1 = \beta H_0 \left[\sigma_{TO} \frac{\beta_y B_0^2}{4} + \Pi \left(\frac{2r_2^2 + 2r_2 \beta_y B_0 + \beta_y^2 B_0^2}{4} \cdot \ln \sqrt{1 + \frac{\beta_y B_0}{r_2}} - \frac{2r_2 \beta_y B_0 + \beta_y^2 B_0^2}{8} \right) \right], \quad (10)$$

де β_y – коефіцієнт усадки стрічки під час навивання, β_1 – коефіцієнт, що враховує вплив середнього головного напруження, дорівнює 1,15; r_2 – внутрішній радіус гнуття, мм.

В процесі навивання стрічки на оправу складного профілю в холодному стані відбувається зміна моменту гнуття стрічки від кута повороту оправу. Згідно розрахункової схеми на рис. 5 рівняння рівноваги частини стрічки, що піддається деформації

$$\left. \begin{aligned} \text{по осі } x: & -F_{T1} - F_{T2} \cdot \cos \gamma + N \cdot \cos \gamma + F \cdot \sin \gamma = 0; \\ \text{по осі } y: & -P_1 + F_{T2} \cdot \sin \gamma - N \cdot \sin \gamma + F \cdot \cos \gamma = 0; \\ \text{сума моментів:} & P_1 \cdot l_1 + F_{T1} \cdot R_3 + F_{T2} \cdot R_0 - N \cdot \rho_n - M = 0, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де F_{T1} - сила тертя між роликом та стрічкою, Н; F_{T2} - сила тертя між стрічкою та оправою складного профілю, Н; γ - кут тиску оправи складного профілю, град; N - поздовжня сила, Н; F - рівнодіюча нормальних контактних напружень на стрічці, Н; P_1 - сила гнуття притискним роликом, Н; l_1 - відстань між центрами оправи складного профілю та притискного ролика, мм; R_s - зовнішній радіус взаємодії гвинтового елемента відносно центра обертання оправи, мм; R_0 - відстань від центра обертання оправи до її поверхні, мм.

Сили тертя визначено за залежностями $F_{T1} = \mu_1 \cdot P_1$; $F_{T2} = \mu_2 \cdot F$, де μ_1 - коефіцієнт тертя між притискним роликом та стрічкою; μ_2 - коефіцієнт тертя між оправою та гвинтовим елементом. Рівнодіюча нормальних контактних напружень $F = \sigma_r H_0 L$, де σ_r - контактні нормальні напруження на внутрішньому радіус гвинтового елемента, МПа; L - довжина контакту по внутрішньому діаметру гвинтового елемента, мм.

Оправку складного профілю (рис. 5) задано в параметричному вигляді:

$$\begin{aligned} x(\theta_1) &= (R_1 - d_1) \cos \theta_1 + d_1 \cos^2 \theta_1, \\ y(\theta_1) &= R_1 \sin \theta_1, \end{aligned} \quad (12)$$

де R_1 – максимальний радіус оправи складного профілю, мм; d_1 – параметр, що визначає відхилення профілю оправи, мм.

Внутрішній радіус гнуття заготовки r_2 визначено на основі рівняння радіуса кривизни профілю оправи

$$r_2 = \frac{\left[\left((-R_1 + d_1) \sin \theta_1 - 2d_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \right)^2 + R_1^2 \cos^2 \theta_1 \right]^{\frac{3}{2}}}{\left((-R_1 + d_1) \sin \theta_1 - 2d_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \right) (-R_1 \sin \theta_1) - \left((-R_1 + d_1) \cos \theta_1 + 2d_1 (\sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1) \right) R_1 \cos \theta_1}. \quad (13)$$

За результатами розрахунків побудовано графіки залежності радіуса кривизни складного профілю оправи від кутового параметру (рис. 6) та залежності зусилля гнуття і крутного моменту від кута повороту оправи складного профілю (рис. 7-8).

Після перетворення рівнянь одержано аналітичну залежність для визначення осьової сили деформації витків

$$W = \beta_1 \cdot B_0 \cdot \left[\sigma_{T.0} \cdot \frac{H_0^2}{4} + \Pi \cdot \left(\frac{R_1^2 + r_1^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{R_1}{r_1}} - \frac{R_1^2 - r_1^2}{8} \right) \right] / R, \quad (14)$$

де R_1 та r_1 - зовнішній і внутрішній радіуси згину відповідно, мм.

На основі досліджень силових параметрів процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок (рис. 9) з умови рівноваги сил та встановленого процесу калібрування із врахування сил тертя на обох поверхнях клина визначаємо необхідний крутний момент на приводі. Крутний момент на приводі для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок

$$M_{кр} = \beta_1 \cdot B_0 \cdot \left[\sigma_{T.0} \cdot \frac{H_0^2}{4} + \Pi \cdot \left(\frac{R_1^2 + r_1^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{R_1}{r_1}} - \frac{R_1^2 - r_1^2}{8} \right) \right] \cdot [\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1], \quad (15)$$

де α – кут нахилу клина, град; φ – кут тертя на похилій площині клина, град; φ_1 – кут тертя на вертикальній площині клина, град.

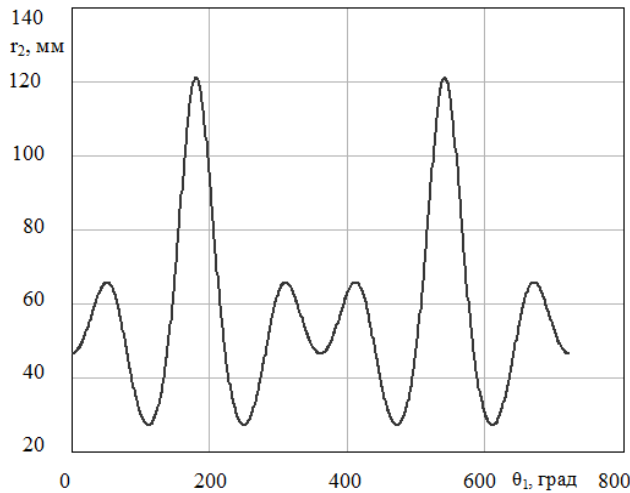


Рис. 6. Графік залежності радіуса кривизни складного профілю оправки від кутового параметру $R_l=50\text{мм}$; $d_1=15\text{мм}$

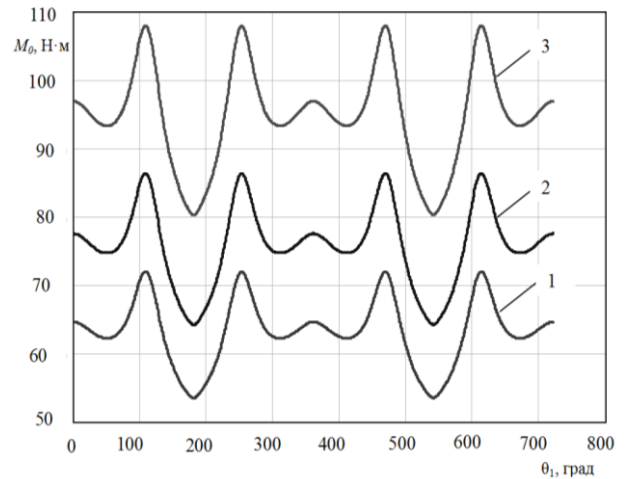


Рис. 8. Графіки залежності моменту, який необхідно прикласти для обертання оправки складного профілю від кута повороту оправки (Ст 3, $\sigma_B=440\text{МПа}$) $B_0=15\text{мм}$; $R_l=50\text{мм}$; $d_1=15\text{мм}$: 1 – $H_0=1\text{мм}$; 2 – $H_0=1,2\text{мм}$; 3 – $H_0=1,5\text{мм}$

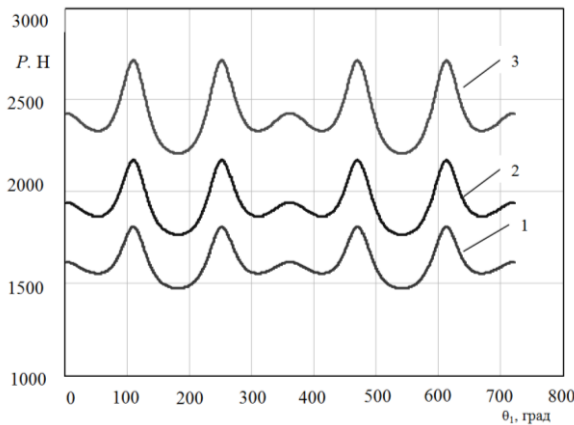


Рис. 7. Графіки залежності сили гнуття притисним роликком від кута повороту оправки складного профілю (Ст 3, $\sigma_B=440\text{МПа}$) $B_0=15\text{мм}$; $R_l=50\text{мм}$; $d_1=15\text{мм}$: 1 – $H_0=1\text{мм}$; 2 – $H_0=1,2\text{мм}$; 3 – $H_0=1,5\text{мм}$

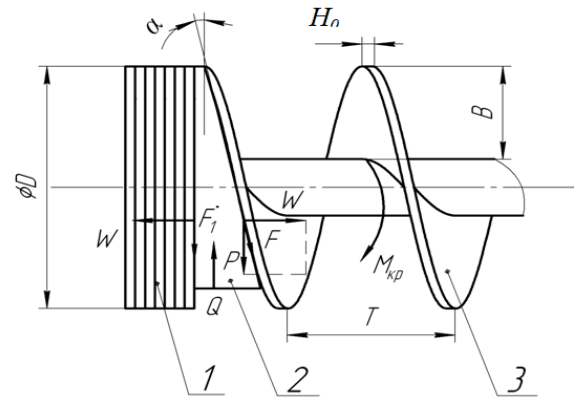


Рис. 9. Розрахункова схема пристосування для калібрування витка гвинтової заготовки на крок: 1 – щільно навіта заготовка, 2 – клин, 3 – калібровані витки гвинтової заготовки

На основі рівняння (15) побудовані графічні залежності крутного моменту на приводі для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок від ширини та товщини витка при куті нахилу клина $\alpha = 20$ град для сталі 08кп (рис. 10-11).

В процесі калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок виникають динамічні коливання оправки, при цьому амплітуда коливань збільшується із збільшенням ширини витка рис. 12. До зосереджених мас віднесено m_1 – маса конічної гвинтової заготовки та оправки для калібрування, m_2 – маса клина, m_3 – маса пристрою для закріплення клина, I_1 – момент інерції конічної гвинтової заготовки та оправки для калібрування, I_2 – момент інерції шпинделя установки, I_3 – момент інерції ротора двигуна. На рис. 12 наведено коефіцієнти жорсткості: C_{12} – приведена жорсткість на кручення шпинделя

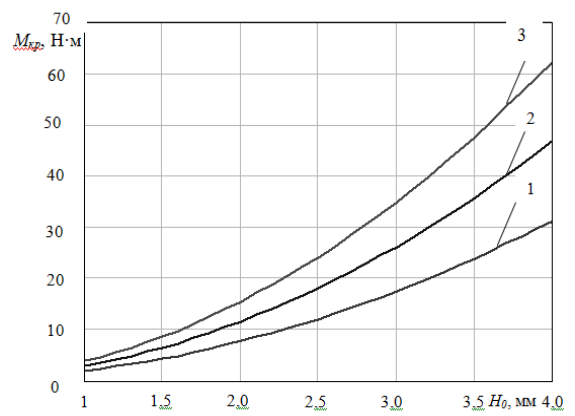
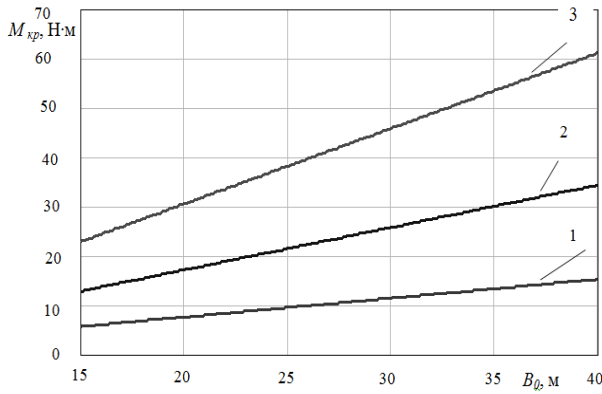


Рис. 10. Графіки залежності крутного моменту на приводі для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок від ширини витка (сталь 08кп) $\alpha = 20$ град:

1 – $H_0=2$ мм; 2 – $H_0=3$ мм; 3 – $H_0=4$ мм

Рис. 11. Графіки залежності крутного моменту на приводі для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок від товщини витка (сталь 08кп) $\alpha = 20$ град:

1 – $B_0=20$ мм; 2 – $B_0=30$ мм; 3 – $B_0=40$ мм

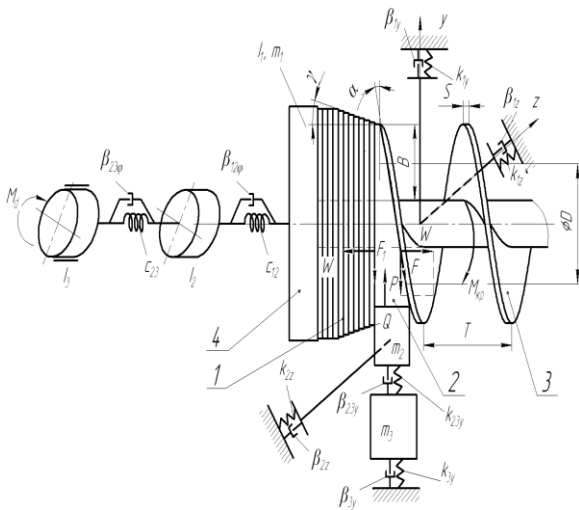


Рис. 12. Розрахункова схема процесу калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок: 1 – щільно навита конічна заготовка, 2 – клин; 3 – калібровані на крок T витки гвинтової заготовки; 4 – оправка для калібрування

установки та оправки для калібрування, C_{23} – приведена жорсткість на кручення вала між шпинделем та двигуном, k_{1z} , k_{1y} – приведені лінійні жорсткості оправки для калібрування відповідно в напрямках осей z та y ; k_{2z} – приведена лінійна жорсткість клина в напрямку осі z ; k_{23} – приведена лінійна жорсткість клина в напрямку осі y , жорсткість на кручення шпинделя установки та оправки для калібрування, C_{23} – приведена жорсткість на кручення вала між шпинделем та двигуном, k_{1z} , k_{1y} – приведені лінійні жорсткості оправки для калібрування відповідно в напрямках осей z та y ; k_{2z} – приведена лінійна жорсткість клина в напрямку осі z ; k_{23} – приведена лінійна жорсткість клина в напрямку осі y , k_{3y} – приведена лінійна жорсткість пристрою для закріплення клина в напрямку осі y . Крім цього позначені коефіцієнти демпфування: $\beta_{12\phi}$ – коефіцієнт демпфування крутильних коливань шпинделя установки та оправки для калібрування, $\beta_{23\phi}$ – коефіцієнт демпфування крутильних коливань вала між шпинделем та двигуном, β_{1z} , β_{1y} – коефіцієнти демпфування лінійних коливань оправки для калібрування відповідно в напрямках осей z та y ; β_{2z} – коефіцієнт демпфування лінійних коливань клина в напрямку осі z , β_{23y} – коефіцієнт демпфування лінійних коливань клина в напрямку осі y , β_{3y} – коефіцієнт демпфування лінійних коливань пристрою для закріплення клина в напрямку осі y . До клина прикладена сила подачі клина $Q(t)$ та сила удару P_y , що виникає в момент початку калібрування витків. На оправку діє крутний момент $M_{кр}$. Оправка обертається із частотою ω . Крім

жорсткості клина в напрямку осі y , k_{3y} – приведена лінійна жорсткість пристрою для закріплення клина в напрямку осі y . Крім цього позначені коефіцієнти демпфування: $\beta_{12\phi}$ – коефіцієнт демпфування крутильних коливань шпинделя установки та оправки для калібрування, $\beta_{23\phi}$ – коефіцієнт демпфування крутильних коливань вала між шпинделем та двигуном, β_{1z} , β_{1y} – коефіцієнти демпфування лінійних коливань оправки для калібрування відповідно в напрямках осей z та y ; β_{2z} – коефіцієнт демпфування лінійних коливань клина в напрямку осі z , β_{23y} – коефіцієнт демпфування лінійних коливань клина в напрямку осі y , β_{3y} – коефіцієнт демпфування лінійних коливань пристрою для закріплення клина в напрямку осі y . До клина прикладена сила подачі клина $Q(t)$ та сила удару P_y , що виникає в момент початку калібрування витків. На оправку діє крутний момент $M_{кр}$. Оправка обертається із частотою ω . Крім

цього на двигуні прикладений крутний момент M_d . В якості узагальнених координат φ_1 – кут повороту оправки (вважаємо додатнім в напрямку проти годинникової стрілки); φ_2 – кут повороту шпинделя; φ_3 – кут повороту ротора двигуна; z_2, y_2 – переміщення центра маси клина в напрямку осей z та y ; z_1, y_1 – переміщення центра маси оправки для калібрування в напрямку осей z та y ; y_3 – переміщення центра маси пристрою для закріплення клина в напрямку осей z та y . Складено диференціальні рівняння руху системи для вимушених коливань, використовуючи рівняння Лагранжа другого роду для мас, які здійснюють лінійні переміщення.

$$\left. \begin{aligned} I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 - C_{12} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) - \beta_{12\varphi} \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) - k_{1z} R_3 (z_1 - R_3 \varphi_1) - \beta_{1z} R_3 (\dot{z}_1 - R_3 \dot{\varphi}_1) &= M_{кр}(t), \\ I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 + C_{12} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) + \beta_{12\varphi} \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + C_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) + \beta_{23\varphi} \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) &= 0, \\ I_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 + C_{23} \cdot (\varphi_3 - \varphi_2) + \beta_{23\varphi} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) &= -M_d, \\ m_2 \cdot \ddot{z}_2 + k_{2z} z_2 + \beta_{2z} \dot{z}_2 &= Q(t) \operatorname{tg} \varphi, \\ m_1 \cdot \ddot{z}_1 + k_{1z} (z_1 - R_3 \varphi_1) + \beta_{1z} (\dot{z}_1 - R_3 \dot{\varphi}_1) &= Q(t) \operatorname{tg} \varphi, \\ m_3 \cdot \ddot{y}_3 + k_{23y} (y_3 - y_2) + \beta_{23y} (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + k_{3y} y_3 + \beta_{3y} \dot{y}_3 &= 0, \\ m_2 \cdot \ddot{y}_2 - k_{23y} (y_3 - y_2) - \beta_{23y} (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) &= Q(t), \\ m_1 \cdot \ddot{y}_1 + k_{1y} y_1 + \beta_{1y} \dot{y}_1 &= Q(t), \end{aligned} \right\} (16)$$

де R_3 - зовнішній радіуси гнуття витка під час калібрування, мм.

Оскільки сила подачі клина $Q(t)$ та крутний момент $M_{кр}(t)$ на оправці прямопропорційні зміні ширини витка $B(t)$, ці величини представимо зростаючими залежностями на конічній частині гвинтової заготовки із наступною стабілізацією на максимальному рівні для циліндричної частини заготовки.

За результатами досліджень, з врахуванням нульових початкових умов, представлено графічні залежності зміни кута деформації шпинделя установки та оправки для калібрування в часі (рис. 13), лінійної деформації оправки для калібрування в напрямку осі y в часі (рис. 14), лінійної деформації клина в напрямку осі z в часі (рис. 15) та лінійної деформації клина в напрямку осі y в часі (рис. 16) під час здійснення процесу калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок.

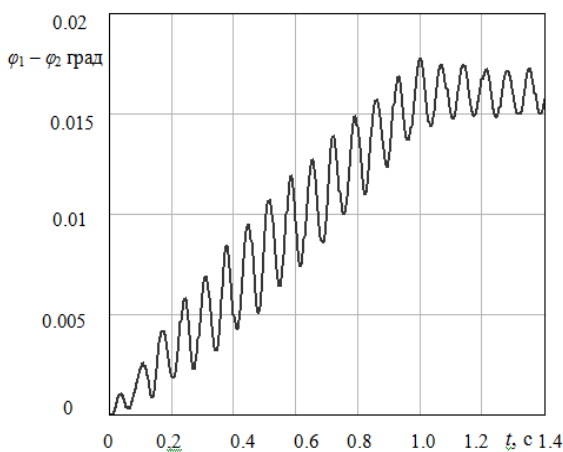


Рис. 13. Графік зміни кута деформації шпинделя установки та оправки для калібрування

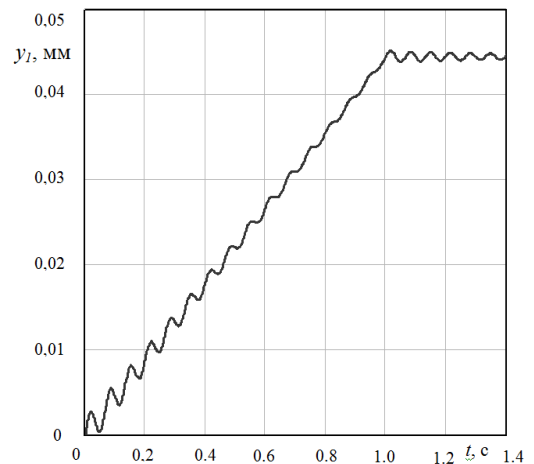


Рис. 14. Графік зміни лінійної деформації оправки для калібрування в напрямку осі y в часі t

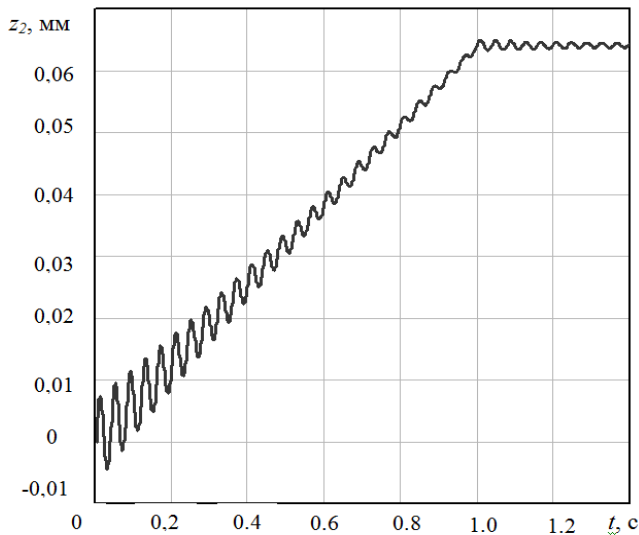


Рис. 15. Графік зміни лінійної деформації клина в напрямку осі z в часі t

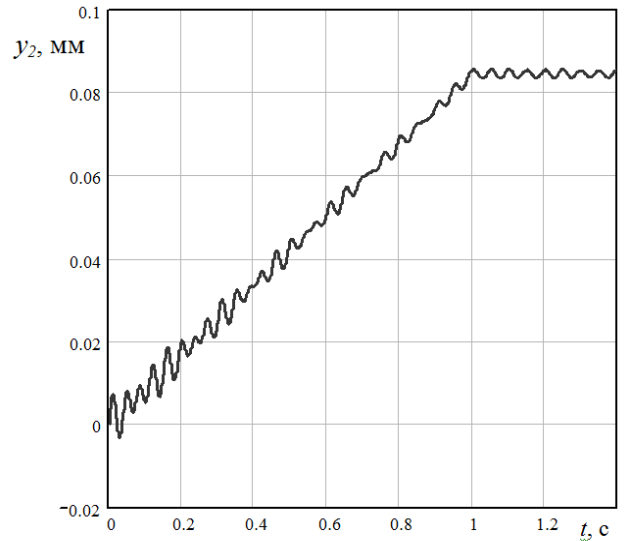
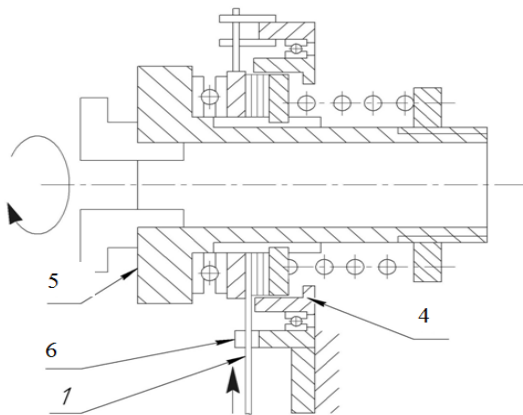


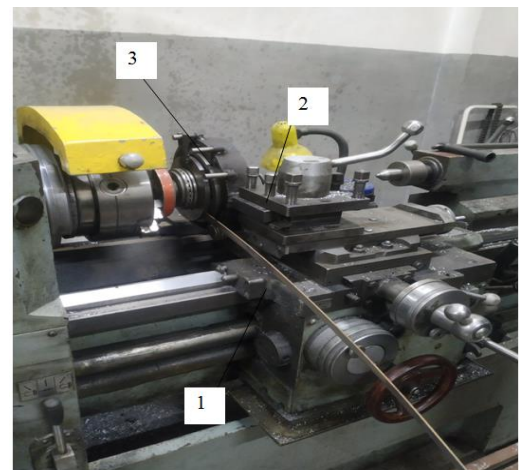
Рис. 16. Графік зміни лінійної деформації клина в напрямку осі y в часі t

Із представлених графічних залежностей (рис. 13 –16) встановлено, що кути деформації складових елементів системи в часі спочатку різко зростають до 0,018 градусів внаслідок ударних навантажень, а потім поступово зростають із затухаючими коливаннями при переміщенні клина до циліндричної частини заготовки.

У третьому розділі наведено програму та методику проведення експериментальних досліджень, представлено конструкцію стендового оснащення для проведення експериментів. Для проведення експериментальних досліджень процесу навивання гвинтової секційної заготовки використано пристрій з обертовою втулкою (рис. 17), що представлений у розібраному вигляді на рис. 18.



а)



б)

Рис. 17. Конструктивна схема -а) та експериментальна установка -б) для процесу навивання гвинтової заготовки пристроєм з обертовою втулкою: 1- стрічка для навивання; 2 – гвинтова заготовка; 3- пристрій для навивання; 4 - обертова втулка, 5- вал, 6 - ролик

Для проведення експериментальних досліджень використовували оправи із внутрішнім діаметром 40, 50, 60 мм, зовнішнім діаметром 100, 120, 150 мм. Дані оправи мають, з однієї сторони, наварені ребра жорсткості для підтримання витка гвинтової спіралі від прогинання в напрямку її формоутворення. Експерименти проводили для ГСЗ із матеріалів сталь 08кп,

Ст 3. Для проведення експериментальних досліджень калібрування витків гвинтових заготовок на крок розроблено та виготовлено дослідну установку, що представлена на рис. 19.

Робочу частину пристрою із закріпленим формувальним клином заводять у взаємодію із ГСЗ. Після налагодження пристрою для здійснення калібрування



Рис. 18. Загальний вигляд пристрою з обертовою втулкою у розібраному вигляді для процесу навивання гвинтової заготовки – а) навиті гвинтові заготовки - б) : 1 – зовнішня обойма; 2 – підшипник; 3 – кільце; 4 – направляючі втулки; 5 – внутрішня обойма; 6 – пружина; 7 – гвинтова секційна заготовка

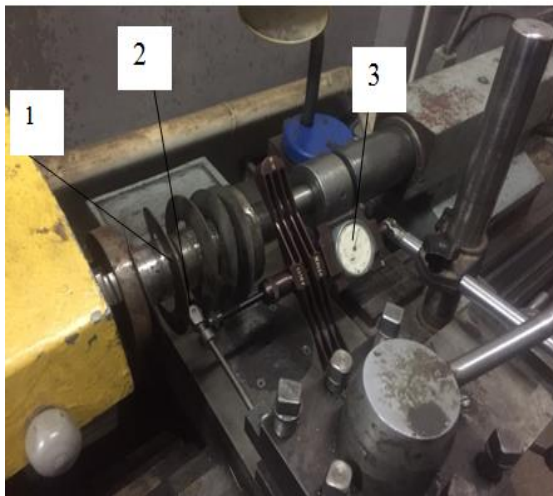


Рис. 19. Загальний вигляд експериментальної установки для калібрування кроку витків гвинтових заготовок: 1 – гвинтова заготовка; 2- клин для здійснення калібрування гвинтової заготовки; 3- динамометр

гвинтової заготовки на крок включають головний рух і рух подачі верстату. Для підвищення експлуатаційних характеристик гвинтових секційних робочих органів машин, зменшення зношування кожухів під час їх роботи та зменшення граничного радіусу їх згину виникає необхідність у формуванні конічних або радіусних профілів на двох сторонах циліндричних елементів ГСРО машин. Одним із способів формування конічних або радіусних профілів є проточування крайніх витків заготовок гвинтових елементів секційних робочих органів у стиснутому стані (рис. 20) після процесу навивання. Для проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів використовувались стандартні прохідні

різці із напаяними пластинами твердого сплаву Т15К6. Параметри різця: передній кут $\gamma=10^\circ$, задній кут $\alpha=10^\circ$, радіус заокруглення при вершині різця $\rho=0,5$ мм. Керування частотою приводів експериментальних установок для дослідження процесу навивання гвинтової заготовки обертовою втулкою, калібрування витків гвинтових заготовок на крок та величини тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих

органів машин (рис. 20) використовували частотний перетворювач Altivar 7.1 та стандартне ліцензоване програмне забезпечення Power Suite V2.3.0 з виведенням даних вимірювань у вигляді графіків та таблиць.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень навивання гвинтової заготовки пристроєм з обертовою втулкою,

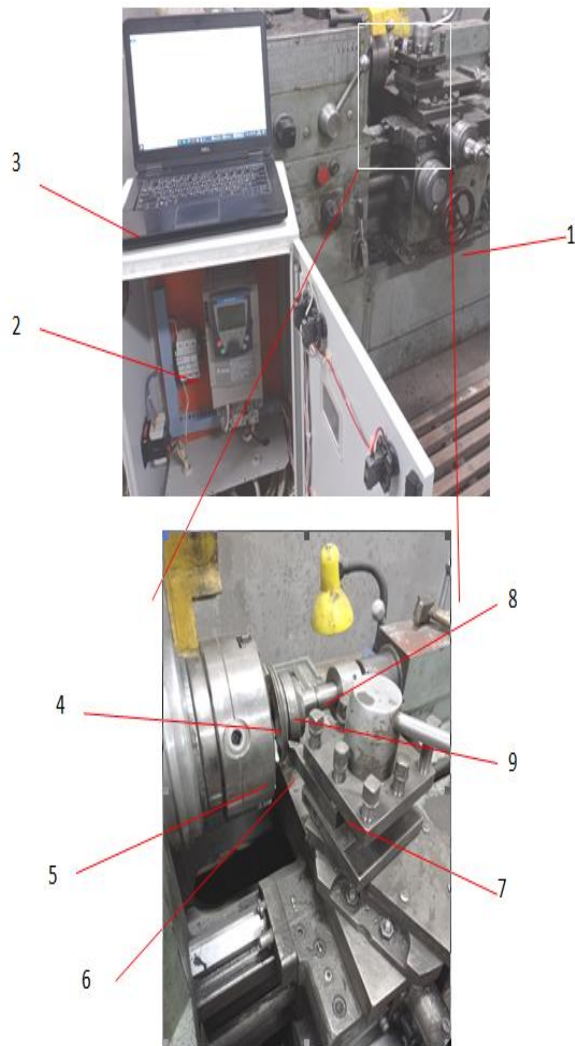


Рис. 20. Процес проточування витків заготовки гвинтового секційного робочого органу на токарно-гвинторізному верстаті: 1 – токарно-гвинторізний верстат; 2 – частотний перетворювач Altivar; 3 – комп’ютер; 4 – заготовка гвинтового секційного робочого органу із стиснутими витками; 5 – трьохкулачковий патрон; 6 – прохідний різець; 7 – різетримач; 8 – задній центр; 9 – затискна шайба

$$M_{(H_0, R_0, B_0)}^{(сталь08кп)} = -938,710 + 31,195R_0 + 15,952B_0 + 2,19H_0B_0 - 0,28R_0^2 + 0,141R_0B_0 - 0,301B_0^2; (17)$$

$$M_{(H_0, R_0, B_0)}^{(Ст3)} = -288,606 + 3,583R_0 + 18,221B_0 + 2,251H_0B_0 + 0,125R_0B_0 - 0,314B_0^2. (18)$$

За методикою проведення досліджень з використанням повнофакторного

калібрування витків гвинтових заготовок на крок та проточування крайніх витків заготовок гвинтових секційних робочих органів. На основі проведеного багатофакторного експерименту дослідження крутного моменту навивання гвинтової заготовки пристроєм з обертовою втулкою отримано регресійні залежності для визначення впливу величини зовнішнього радіуса оправки R_0 , товщини заготовки H_0 та ширини заготовки B_0 на величину крутного моменту процесу навивання для стрічок із матеріалів сталь 08кп та Ст 3.

Після перевірки адекватності апроксимуючих моделей і оцінки значущості коефіцієнтів рівняння регресії (17-18) за критеріями Фішера та Ст’юдента, побудовано поверхні відгуку (рис. 21) в межах змінних входних факторів: зовнішнього радіуса оправки $40 \leq R_0 \leq 60$ (мм), товщини заготовки $1 \leq H_0 \leq 3$ мм та ширини заготовки, $10 \leq B_0 \leq 30$ мм. З графічних залежностей рис. 21 встановлено, що для сталі 08кп при $H_0=2$ мм, $R_0=50$ мм і зміні B_0 у межах 10-30мм величина крутного моменту навивання набуває значень 399-511 Н·м. Для матеріалу Ст 3 встановлено, що величина крутного моменту навивання зростає в 1,07 рази порівняно із матеріалом сталь 08кп та знаходиться в межах від 431 Н·м до 548 Н·м:

експерименту визначали залежності крутного моменту процесу калібрування витків гвинтової секційної заготовки на крок від зміни трьох основних факторів: ширини витка B_0 , кута нахилу клина α та товщини витка H_0 для матеріалу сталь 08кп.

$$M_{кр}(B_0, \alpha, H_0) = -18,21 + 1,27\alpha + 0,066B_0H_0 - 0,37\alpha^2 + 0,21\alpha H_0 + 0,81H_0^2. (19)$$

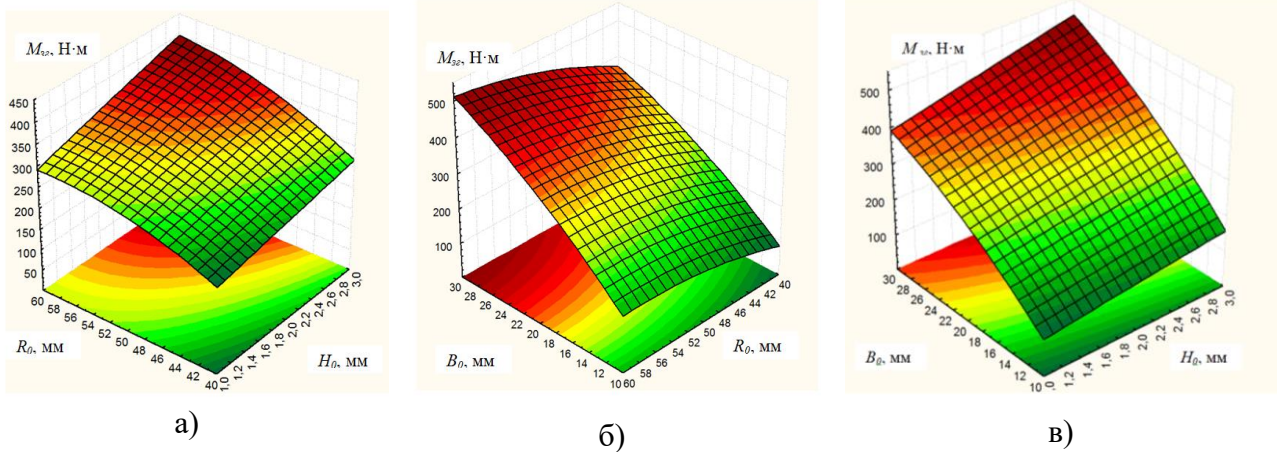


Рис. 21. Поверхні відгуку зміни крутного моменту процесу навивання ГСЗ пристроєм з втулкою для стрічок із сталі 08кп: а) $M_{кр} = f(H_0, R_0)$; б) $M_{кр} = f(B_0, R_0)$; в) $M_{кр} = f(H_0, B_0)$

На основі рівняння регресії (19) побудовані графічні залежності крутного моменту процесу калібрування витка гвинтової секційної заготовки на крок (рис. 22) від зміни трьох основних факторів: ширина витка B_0 , кута нахилу клина α , товщини витка H_0 для матеріалу сталь 08кп.

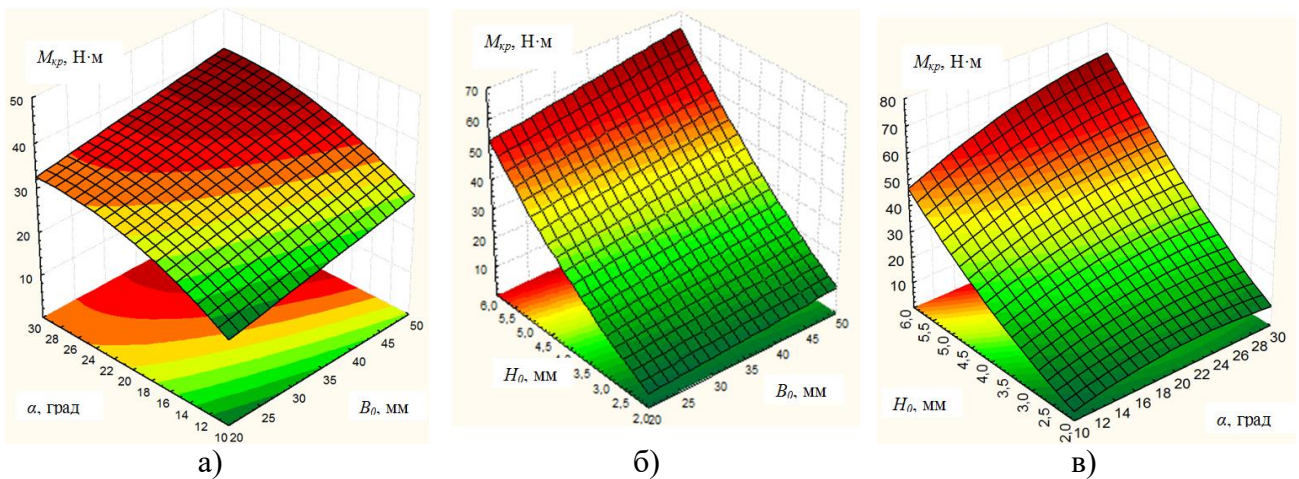


Рис. 22. Поверхні відгуку зміни крутного моменту процесу калібрування витка гвинтової секційної заготовки на крок для заготовок із сталі 08кп:

а) $M_{кр} = f(B_0, \alpha)$; б) $M_{кр} = f(B_0, H_0)$; в) $M_{кр} = f(\alpha, H_0)$

З рис. 22 видно, що процес калібрування витка гвинтової заготовки на крок залежить від ширини, товщини спіралі і від кута нахилу клина пристрою. Отже, при збільшенні кута нахилу клина пристрою α і товщини витка H_0 , для матеріалу ГСРО сталь 08кп момент зростає і досягає 79 Н·м. Факторне поле визначалось таким діапазоном зміни параметрів: $20 \leq B_0 \leq 50$ (мм); $10 \leq \alpha \leq 30$ (град); $2 \leq H_0 \leq 6$ (мм).

На основі повнофакторного експерименту та розробленої методики

проведення досліджень представлено закономірності зміни величини тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин. Величину тангенціальної сили різання P_z визначали залежно від зміни трьох основних факторів: глибини різання t прохідним різцем, подачі S прохідного різця та швидкості різання V , при цьому вивели рівняння регресії

$$P_{z(t,S,V)} = 24,17 + 307,84t + 761,75S - 0,832V + 665,2tS - 0,688tV - 1,66SV - 46,24t^2 - 939S^2 + 0,0035V^2. \quad (20)$$

Отримане рівняння регресії (20) можна застосовувати для прогнозування величини тангенціальної сили різання P_z під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп у таких межах змінних початкових факторів (рис. 22): $0,5 \leq t \leq 1$ (мм); $0,1 \leq S \leq 0,3$ (мм/об); $100 \leq V \leq 180$ (м/хв).

У п'ятому розділі наведено комп'ютерну модель гвинтового секційного робочого органу конвеєра. Порівняння отриманих результатів теоретичних досліджень, експериментів та комп'ютерного моделювання дозволяє зробити висновок про подібність отриманих значень та побудованих на їх основі відповідних графічних залежностей. Різниця між розрахунковими та експериментальними значеннями коливається в межах 8..14%.

Запропоновано технологічне оснащення для виготовлення та контролю якості ГСЗ. Розрахунковий річний економічний ефект від впровадження технологічних процесів навивання ГСЗ складає 16995,79 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової проблеми розроблення та практичної реалізації технологічного забезпечення виготовлення ГСРО, які характеризуються покращеними експлуатаційними характеристиками. Встановлено, що використання ГСРО забезпечує зменшення радіуса кривизни технологічної магістралі конвеєра на 15%, підвищення продуктивності праці на 3...7%.

2. Досліджено процес навивання ГСЗ пристроєм з обертовою втулкою. Отримано аналітичні залежності, на основі яких встановлено момент навивання (згину) M_{32} на ребро стрічки із матеріалу Ст 3 постійної ширини B_0 та товщини H_0 заготовки від зовнішнього радіуса ГСЗ (радіуса пустотілої формувальної втулки) R . На основі розрахункових залежностей побудовані графіки зміни моменту навивання M_{32} пристроєм з обертовою втулкою від ширини заготовки B_0 із зовнішніми радіусами в межах $R = 50-150$ мм. Встановлено, що розподіл навантаження на формоутворюючі ролики залежить від конструктивного виконання пристосування, від технологічних зазорів між стрічкою і калібром, утвореним поверхнями оправи та роликів. Встановлено, що основний процес формоутворення (до 70-90 % формування кривини профілю) припадає на перший ролик, де здійснюється згин на ребро, та другий і третій ролики, що завершують процес згину стрічки.

3. Проведено дослідження силових параметрів процесу навивання стрічки на оправу складного профілю. Виведено аналітичні залежності радіуса кривизни профілю оправки, що використовується для визначення сили гнуття. На основі цих рівнянь побудовані графічні залежності з яких видно, що при товщині стрічки $H_0=1$ мм, сила гнуття профільної стрічки притискним роликком знаходиться в межах $P_1=1500-1800$ Н, а момент, який необхідно прикласти для обертання оправки $M_{кр}=55-72$ Н·м, при $H_0=1,5$ мм сила гнуття знаходиться в межах $P_1=2200-2700$ Н, а момент $M_{кр}=80-108$ Н·м. Зусилля і момент формоутворення набувають максимального значення в процесі формування заготовки на частині оправки із найменшим радіусом кривизни, тобто в даному випадку при 105 та 250 градусах, найменші значення досягаються при 180 градусах, коли радіус гнуття є найбільшим.

4. Досліджено процес калібрування конічних витків гвинтових заготовок на крок з розробкою технологічного оснащення. Виведені аналітичні залежності для визначення силових і конструктивних параметрів процесу. Виведено рівняння пластичності з визначенням напружень в зонах стискування і розтягування витка, аналітичні залежності для визначення моменту розгинання витка, визначення осьової сили деформації витка і необхідного крутного моменту на приводі для здійснення калібрування ГСЗ на крок. На основі розрахункових залежностей побудовані графічні залежності крутного моменту на приводі для матеріалу сталь 08кп від ширини витка при $\alpha=20^\circ$, товщині $H_0=2-4$ мм, а також ширини заготовки $B_0=20-40$ мм. Встановлено, що збільшення ширини і товщини витка і кута нахилу клина приводить до збільшення крутного моменту на приводі при калібруванні заготовки на крок.

5. Досліджено динаміку калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок. Встановлено, що при цьому процесі виникають динамічні коливання оправки, амплітуда коливань яких збільшується із збільшенням ширини витка, що впливає на міцність оправки. При цьому виведено диференціальне рівняння коливань на основі рівняння Лагранжа другого роду. Досліджено ударну взаємодію клина із витком конічної гвинтової заготовки і виведено аналітичну залежність для визначення сили удару клина і заготовки. Побудовані графічні залежності зміни кута деформації шпинделя верстату та оправки в часі в межах від 0 до 0,018 рад., лінійної деформації оправки для калібрування в напрямку осі y в часі від 0 до 0,043 мм, зміни лінійної деформації клина в напрямку осі z в часі від 0 до 0,064 мм, зміни лінійної деформації клина в напрямку осі y в часі від 0 до 0,082 мм. Встановлено, що деформації складових елементів системи в часі спочатку різко зростають, як наслідок ударних навантажень, а потім поступово зростають із затухаючими коливаннями при переміщенні клина до циліндричної частини заготовки.

6. Для проведення експериментальних досліджень формування елементів ГСРО розроблено і виготовлено експериментальні дослідні установки для визначення величини крутного моменту навивання ГСЗ пристроєм з обертовою втулкою, крутного моменту калібрування ГСЗ на крок, зусилля утворення сферичної втулки секції гвинтового робочого органа P_f , та тангенціальної сили різання P_z під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих

органів. Проведено комплекс експериментальних досліджень впливу зовнішнього радіуса оправки R , товщини H_0 заготовки та ширини B_0 заготовки в межах $40 \leq R \leq 60$ (мм); $1 \leq H_0 \leq 3$ мм, $10 \leq B_0 \leq 30$ мм для заготовок із сталі 08кп та Ст 3 на зміни крутного моменту M_{32} процесу навивання ГСЗ пристроєм з обертовою втулкою. На основі рівняння регресії побудовані графічні залежності, які показують, що для сталі 08кп при $H_0=2$ мм, $R=50$ мм і зміні B_0 у межах від 10 до 30мм значення крутного моменту навивання знаходиться в межах від 399 до 511 Н·м, а для сталі Ст 3 значення крутного моменту навивання зростає в 1,07 рази в порівнянні із значенням для сталі 08кп та знаходиться в межах від 431 до 548 Н·м.

7. Наведено методику та результати експериментальних досліджень з отриманням рівнянь регресії для визначення залежності крутного моменту калібрування конічних витків гвинтової заготовки робочого органа на крок від зміни ширини B_0 , товщини спіралі H_0 та кута нахилу клина α для матеріалу сталь 08кп. Крутний момент зростає до 79 Н·м з факторним полем $20 \leq B_0 \leq 50$ (мм); $10 \leq \alpha \leq 30$ (град); $2 \leq H_0 \leq 6$ (мм). Також проведено дослідження зусилля утворення сферичної втулки секції робочого органа від величини товщини заготовки S_1 , діаметра заготовки D_1 , радіуса сфери r_3 у таких межах зміни вхідних факторів: $1,2 \leq S_1 \leq 1,7$ (мм); $40 \leq D_1 \leq 50$ (мм); $20 \leq r_3 \leq 30$ (мм) з максимальним зусиллям 6,28 кН. Встановлено, що значення тангенціальної сили різання P_z під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів збільшується при збільшенні глибини різання t прохідним різцем, подачі S прохідного різця та швидкості різання V у таких межах змінних параметрів $0,5 \leq t \leq 1$ (мм); $0,1 \leq S \leq 0,3$ (мм/об); $100 \leq V \leq 180$ (м/хв).

8. Наведено комп'ютерну модель гвинтового секційного робочого органу конвеєра. Порівняння отриманих результатів теоретичних досліджень, експериментів та комп'ютерного моделювання дозволяє зробити висновок про подібність отриманих значень та побудованих на їх основі відповідних графічних залежностей. Різниця між розрахунковими та експериментальними значеннями коливається в межах 8..14%. На основі проведеного комплексу теоретичних і експериментальних досліджень створено конкурентноздатні ГСРО, проведено їх техніко-економічне обґрунтування та розроблено методику інженерного розрахунку. Технічна новизна конструкцій захищена 5 патентами України на корисні моделі. Розрахунковий річний економічний ефект від впровадження технологічних процесів навивання ГСЗ складає 16995,79 грн. Технологічні процеси впроваджені у виробництво на підприємстві ТДВ «Булат» (сmt. Микулинці).

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження: монографія / І.Б. Гевко, Р.Я. Лещук, В.З. Гудь, О.Р.Дмитрів, Т. С. Дубиняк, Т.Д. Навроцька, О.А. Круглик. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2019. – 208 с. (Автором розроблено теоретичні аспекти виготовлення та калібрування гвинтових заготовок)

Публікації в наукових фахових виданнях України та закордоном

2. The study of power parameters of calibrating the turns of a screw working body / O. Lyashuk, A. Djachun, T. Navrocka, S. Biluk // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2016. – Vol.19, №.1. – P. 81-87. *(Автором запропоновано нову схему процесу калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок (Index Copernicus)).*

3. Дослідження силових параметрів формоутворення гвинтових елементів різного профілю / А.Є. Дячун, В.М. Клендій, Т.Д. Навроцька, Р.М. Котик // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир, 2017. – Вип. № 2(2). – С. 49-55. *(Автором визначено силові параметри процесу).*

4. Дослідження динаміки процесу калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок / О.Л. Ляшук, А.Є. Дячун, В.М. Клендій, В.О. Тесля, Т.Д. Навроцька, М.Д. Радик // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків, 2018. – №12.– С. 74-82. *(Автором визначено деформації складових елементів системи).*

5. Ляшук О. Дослідження технологічного процесу виготовлення і калібрування гвинтових робочих органів / О. Ляшук, Т. Навроцька, Т. Пиндус / Вісник ТНТУ ім. І. Пулюя. – Тернопіль, 2016. – Вип. №2(82). – С.90–96. *(Автором отримано аналітичні залежності для визначення зусилля розгинання витків зі зміцненням).*

6. Підвищення експлуатаційної надійності і довговічності гвинтових секційних робочих органів гнучких гвинтових конвеєрів / О.Л. Ляшук, Т.Д. Навроцька, М.Д. Радик, А.І. Пік, Р.М. Котик // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир, 2017. – Вип. № 2(1). – С. 45-48. *(Автором досліджено методи підвищення експлуатаційної надійності гвинтових секційних робочих органів).*

7. Гевко Б.М. Відпрацювання конструкції гвинтових секційних робочих органів на технологічність / Б.М. Гевко, В.М. Клендій, Т.Д. Навроцька // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. “Технічні системи і технології тваринництва”. – Харків, 2015. – Вип. 156. — С.498-505. *(Автором здійснено опис технологічного оснащення).*

8. Методика проектування гвинтових робочих органів гнучких гвинтових конвеєрів / Б.М. Гевко, В.М. Клендій, Т.Д. Навроцька, С.Л. Мельничук // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». – Вінниця, 2017. – №1(96). – С.176–180. *(Автором узагальнено опис проведення експериментальних досліджень)*

9. Дослідження неперервного процесу навивання гнучких гвинтових робочих органів конвеєрів / Б.М. Гевко, Т.Д. Навроцька, Р.М. Котик, І.М. Шуст, М.Д. Радик // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. “Технічні системи і технології тваринництва”. – Харків, 2017. – Вип. 181. – С. 280-284. *(Автором наведено перспективні способи навивання гнучких секційних робочих органів).*

10. Навроцька Т.Д. Технологічне оснащення для контролю якості деталей гвинтових механізмів / Т.Д. Навроцька // Збірник наукових статей

«Сільськогосподарські машини». – Луцьк, 2017. – Вип. 38. – С. 113-119.

11. Клендій В.М. Обґрунтування параметрів секційних гнучких гвинтових робочих органів конвеєрів / В.М. Клендій, Т.Д. Навроцька // «Перспективні технології та прилади»: збірник наукових праць. – Луцьк, 2017. – Вип. №7. – С. 64-68. *(Автором запропоновано конструктивне виконання робочих органів секційних гнучких гвинтових конвеєрів).*

12. Особливості технології виготовлення секцій гнучких гвинтових конвеєрів / Б.М. Гевко, Р.В. Комар, В.М. Клендій, Т.Д. Навроцька // «Перспективні технології та прилади»: збірник наукових праць. – Луцьк, 2015. – Вип. №7. – С. 13-16. *(Автор отримав залежності зміни зусилля розвальцювання від допустимого напруження матеріалу)*

13. Техніко-економічне обґрунтування процесу виготовлення гвинтових робочих органів / О.Л. Ляшук, А.Є. Дячун, О.Л. Третьяков, Т.Д. Навроцька, О.А. Круглик // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. «Механізація сільськогосподарського виробництва». – Харків, 2019. – Вип. 198. – С. 244-251. *(Автором проведено узагальнення представлених результатів).*

14. Визначення радіуса згину гнучкого гвинтового конвеєра виготовленого з секційних елементів / О.Л. Ляшук, В.М. Клендій, Т.Д. Навроцька, М.Р. Коневич // Подільський вісник: Сільське господарство, техніка, економіка. – Кам'янець-Подільський, 2018. – Вип. № 29. – С. 71-79. *(Автором отримано аналітичні залежності мінімального допустимого радіуса кривизни технологічної магістралі).*

Матеріали і тези конференцій

15. Дзюра В.О. Пристрій для калібрування і виготовлення гвинтових робочих органів зі змінними кроками / В.О. Дзюра, Т.Д. Навроцька // Матеріали ХІХ наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя: 18-19 травня 2016р.: тези допов. – Тернопіль, 2016. – С. 40. *(Автором запропоновано конструкцію гвинтового робочого органа).*

16. Клендій В.М. Результати експериментальних досліджень визначення деформаційних характеристик шарнірно-секційного робочого органу / В.М. Клендій, Т.Д. Навроцька // Матеріали ІV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2015р.: тези допов. – Т.: ТНТУ, 2015. – С. 154-156. *(Автором проведено експериментальні дослідження процесу).*

17. Навроцька Т.Д. Конструктивне виконання робочих органів гнучких гвинтових конвеєрів / Т.Д. Навроцька // Міжнародна науково-технічна конференція «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій»: 22–24 травня 2018 р.: тези допов. – Тернопіль, 2018. – С. 139-140.

18. Навроцька Т.Д. Обґрунтування параметрів гнучких гвинтових робочих органів гвинтових конвеєрів / Т.Д. Навроцька // Матеріали ІІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Інноваційні розробки студентів і молодих науковців в галузі технічного сервісу машин», 1 грудня 2016р.: тези допов. – Х.: ХНТУСГ, 2016. – С. 93.

19. Навроцька Т.Д. Секційна двохшарнірна гвинтова спіраль / Т.Д. Навроцька, В.М. Клендій, М.Д. Радик // Обладнання і технології

сучасного машинобудування: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті заслуженого винахідника України академіка АН вищої школи України, доктора технічних наук, професора Нагорняка Степана Григоровича, 11–12 травня 2017р.: тези допов. – Т.: ТНТУ, 2017. – С. 118. *(Автор запропонував конструкцію гвинтової спіралі).*

Патенти України на корисні моделі

20. Пат. №109876 Україна, МПК G01D 3/00 Індикатор універсальний / Ляшук О.Л.; Марчук Н.М.; Третяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Галан Ю.Я.; Заявник і патентовласник Ляшук О.Л.; Марчук Н.М.; Третяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Галан Ю.Я. – № u201602943, заявл. 22.03.2016, опубл. 12.09.2016, Бюл. №17. *(Частка всіх авторів однакова).*

21. Пат. №118403 Україна, МПК B65G 33/14 Універсальний пристрій для виготовлення гвинтових заготовок різного профілю / Дячун А.Є.; Клендій В.М.; Навроцька Т.Д.; Котик Р.М.; Радик М.Д.; заявники і патентотримувачі Дячун А.Є.; Клендій В.М.; Навроцька Т.Д.; Котик Р.М.; Радик М.Д. – №u201701002, заявл. 03.02.2017, опубл. 10.08.2017, Бюл. №15. *(Частка всіх авторів однакова).*

22. Пат. №98974 Україна, МПК G01B 3/20 Шнекомір / Дячун А.Є.; Тарасюк Ю.М.; Навроцька Т.Д.; Кучвара І.М.; Клендій В.М.; заявники і патентотримувачі Дячун А.Є.; Тарасюк Ю.М.; Навроцька Т.Д.; Кучвара І.М.; Клендій В.М. – № u201413360, заявл. 12.12.2014, опубл. 12.05.2015, Бюл. №9. *(Частка всіх авторів однакова).*

23. Пат. № 126986 Україна, МПК B65G 33/14 (2006.01) Секція гнучкого гвинтового конвеєра / Клендій В.М.; Навроцька Т.Д.; Клендій М. І.; Котик Р.М.; Радик М.Д.; заявники і патентотримувачі Дячун А.Є.; Клендій В.М.; Навроцька Т.Д.; Клендій М. І.; Котик Р.М.; Радик М.Д. – № u201801624, заявл. 19.02.2018, опубл. 10.07.2018, Бюл. №13. *(Частка всіх авторів однакова).*

24. Пат. № 108422. Україна, МПК (2006.01) B24B 39/04. Обкатний інструмент для зміцнення гвинтових робочих органів / Ляшук О.Л.; Сокіл М.Б.; Третяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Клендій В.М.; Марчук Р.М.; заявники і патентотримувачі Ляшук О.Л.; Сокіл М.Б.; Третяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Клендій В.М.; Марчук Р.М. – №u201601511; заявл. 18.02.2016; опубл. 11.07.2016, Бюл. №13. *(Частка всіх авторів однакова).*

АНОТАЦІЯ

Навроцька Т.Д. Технологічне забезпечення виготовлення гвинтових секційних робочих органів машин. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 «Технологія машинобудування». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021.

Дисертаційна робота присвячена теоретичним і експериментальним дослідженням параметрів виготовлення гвинтових секційних робочих органів машин.

Розроблені теоретичні передумови процесу навивання гвинтових секційних заготовок пристроєм з обертовою втулкою. Отримано аналітичні залежності моменту навивання на ребро стрічки постійної ширини та товщини від

зовнішнього радіуса пустотілої формувальної втулки. Проведено дослідження силових параметрів процесу навивання стрічки на оправу складного профілю. Виведено аналітичні залежності радіуса кривизни профілю оправы, що використовується для визначення сили гнуття. Досліджено процес калібрування конічних витків гвинтових заготовок на крок з розробкою технологічного оснащення.

Досліджено динаміку калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок. Досліджено ударну взаємодію клина із витком конічної гвинтової заготовки і виведено аналітичну залежність для визначення сили удару клина і заготовки.

На основі проведеного комплексу теоретичних і експериментальних досліджень створено конкурентноздатні гвинтові секційні робочі органи, проведено техніко-економічне обґрунтування технологій їх виготовлення, що впроваджені у виробництво.

Ключові слова: технологічний процес, калібрування витка, навивання стрічки, гвинтовий робочий орган.

АННОТАЦИЯ

Навроцкая Т.Д. Технологическое обеспечение изготовления винтовых секционных рабочих органов машин. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 «Технология машиностроения» - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2021.

Диссертационная работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям параметров изготовления винтовых секционных рабочих органов машин.

Разработаны теоретические предпосылки процесса навивки винтовых секционных заготовок устройством с вращающейся втулкой. Получены аналитические зависимости момента навивки на ребро ленты постоянной ширины и толщины от внешнего радиуса пустотелой формовочной втулки. Проведены исследования силовых параметров процесса навивки ленты на оправу сложного профиля. Выведены аналитические зависимости радиуса кривизны профиля оправы, которые используются для определения силы гибки. Исследован процесс калибровки конических витков винтовых заготовок на шаг с разработкой технологической оснастки.

Исследована динамика калибровки витка конической винтовой заготовки на шаг. Исследовано ударное взаимодействие клина с витком конической винтовой заготовки и выведено аналитическую зависимость для определения силы удара клина и заготовки.

На основе проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований создано конкурентно-способные винтовые секционные рабочие органы, проведено технико-экономическое обоснование технологий их изготовления, которые внедрены в производство.

Ключевые слова: технологический процесс, калибровки витка, навивки ленты, винтовой рабочий орган.

ANNOTATION

Navrotska T. D. Technological support for manufacturing the machine screw sectional working elements. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Ph. D. thesis in Engineering Science by specialty 05.02.08 “Mechanical Engineering Technology”. – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2021

The thesis deals with theoretical and experimental investigations of parameters of manufacturing the machine screw sectional elements.

Theoretical preconditions for the process of screw sectional blanks winding by the device with rotating bushing are developed. Analytical dependences are obtained. On their basis the moment of winding on the edge of the tape with constant width and thickness from the outer radius of the hollow forming bushing is determined. The investigation of force parameters of the tape winding process on intricate frame profile is carried out. Analytical dependences of the radius of the frame profile curvature used for bending force determination are derived. The process of calibration of cone windings of the screw workpieces in pitch of technological equipment development is investigated. The equation of plasticity with the determination of stresses in winding compression and tension areas, analytical dependences for the determination of winding straightening moment are derived, the axial forces of winding deformation and required torque on the drive for screw sectional workpieces calibration in pitch are determined.

The dynamics of winding calibration of conical screw workpiece in pitch is investigated. The differential equation of oscillations of the reduced system on the basis of Lagrange equations of the second kind is derived. The impact interaction of the wedge with the conical screw workpiece winding is investigated and the analytical dependence for the determination of the impact force of the wedge and the workpiece is derived. The graphical dependences of the change of deformation angle of the machine tool spindle and frame, linear deformation of the frame for calibration in axis y direction in time, changes of linear wedge deformation in axis z direction in time, changes of linear wedge deformation in axis y direction in time are constructed. It is established that the system components deformations in time initially increase sharply as a result of impact loads, and then gradually increase with damped oscillations while moving the wedge towards the cylindrical part of the workpiece.

The method and results of experimental investigation with obtaining the regression equations for the determination of dependence of the torque of screw tape sections winding by the rotating bushing, the torque of calibration of conical screw workpiece winding in pitch, efforts of forming the spherical bushing of the working element section and cutting force during the workpiece turning of screw sectional working elements are given.

On the basis of the carried out complex of theoretical and experimental investigations the competitive screw sectional working elements are created, the technical and economic substantiation of their manufacturing technologies introduced in manufacturing is made.

Key words: technological process, winding calibration, tape winding, screw working element.